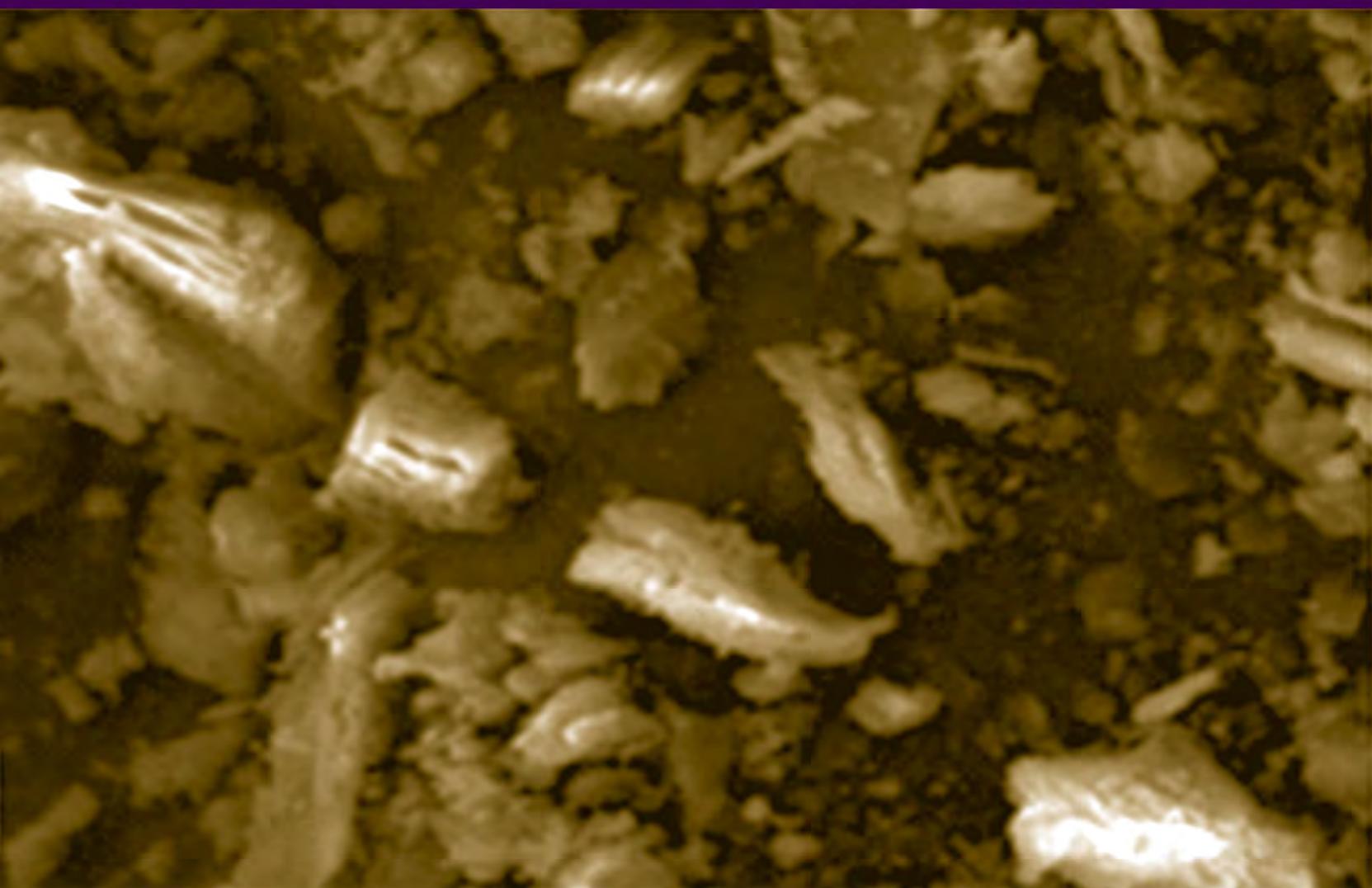


DYNA

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



DYNA 81 (184), April, 2014 - ISSN 0012-7353

Tarifa Postal Reducida No. 2014-287 4-72
La Red Postal de Colombia, Vence 31 de Dic. 2014.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS



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

John Willian Branch Bedoya, Ph.D.

Vice-Dean

Pedro Nel Benjumea Hernández, Ph.D.

Vice-Dean of Research and Extension

Santiago Arango Aramburo, Ph.D.

Director of University Services

Jhon Jairo Blandón Valencia, Ph.D.

Academic Secretary

Héctor Iván Velásquez Arredondo, Ph.D.

Representative of the Curricular Area Directors

Elkin Rodríguez Velásquez, Ph.D.

Representative of the Curricular Area Directors

Alejandro Molina Ochoa, Ph.D.

Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management

Iván Sarmiento Ordóñez, Ph.D.

Representative of the Basic Units of Academic-Administrative Management

Juan David Velásquez Henao, Ph.D.

Professor Representative

Jaime Ignacio Vélez Upegui, Ph.D.

Delegate of the University Council

Pedro Ignacio Torres Trujillo, Ph.D.

Undergraduate Student Representative

Nelson Joaquín Sierra Quiceno

FACULTY EDITORIAL BOARD

Dean

John Willian Branch Bedoya, PhD

Vice-Dean of Research and Extension

Santiago Arango Aramburo, PhD

Members

Hernán Darío Álvarez Zapata, PhD

Oscar Jaime Restrepo Baena, PhD

Juan David Velásquez Henao, PhD

Jaime Aguirre Cardona, MSc

Mónica del Pilar Rada Tobón MSc

JOURNAL EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Juan David Velásquez Henao, Ph.D.

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Editors

George Barbastathis, Ph.D

Massachusetts Institute of Technology, USA

Tim A. Osswald, Ph.D.

University of Wisconsin, USA

Juan De Pablo, Ph.D.

University of Wisconsin, USA

Hans Christian Öttinger, Ph.D.

Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Switzerland

Patrick D. Anderson, Ph.D.

Eindhoven University of Technology, the Netherlands

Igor Emri, Ph.D.

Associate Professor, University of Ljubljana, Slovenia

Dietmar Drummer, Ph.D.

Institute of Polymer Technology University Erlangen-Nürnberg, Germany

Ting-Chung Poon, Ph.D.

Virginia Polytechnic Institute and State University, USA

Pierre Boulanger, Ph.D.

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 Willian 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 Osvaldo Bustamante Rúa, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Hernán Darío Álvarez, PhD

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Jaime Aguirre Cardona, MSc

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

CONTENTS

Dean's Note	9
Editorial	10
Nonlinear time series forecasting using MARS Juan David Velásquez-Henao, Carlos Jaime Franco-Cardona, Paula Andrea Camacho	11
Valorization of residues from refining of used vegetable oils Dolores Hidalgo-Barrio, Marta Gómez-Rincón, Alicia Aguado-Pesquera, Jesús María Martín-Marroquín & Emilia Sastre-García	20
Methodology for distribution centers location through multicriteria analysis and optimization Diego Soto-de la Vega, José Geraldo Vidal-Vieira & Eli Angela Vitor-Toso	28
Analysis of vehicular traffic flow using a macroscopic model Fernando Pérez, Alejandro Bautista, Martín Salazar & Antonio Macías	36
Impact of electrical energy efficiency programs, case study: Food processing companies in Cuenca, Ecuador Galo Carrillo-Rojas, Juan Andrade-Rodas, Antonio Barragán-Escandón & Ana Astudillo-Alemán	41
Development of an application for quick comparison of pigments from their colorimetric coordinates Jessica Ingrid Piñeiro-Di Blasi, Javier Martínez-Torres, José Santiago Pozo-Antonio, Carla Iglesias-Comesaña, Luciano Cuesta, Javier Taboada-Castro, Pablo Gajino-Núñez & Eva Tresaco-Vidaller	49
A hazard index for roadside of two-lane rural roads Juan Ignacio Rivera & Tomás Echaveguren	55
Analytical model to determine optimal production lots considering several productive and logistics factors Javier Valencia, Mª Pilar Lambán & Jesús Royo	62
Microbicidal effect of solar radiation (SODIS) combined with <i>Artemisia annua</i> Mariana Muñoz-Restrepo, Leidy Viviana Orrego, Diana Carolina Muñoz-Arango, Carlos Neftaly Lozano-Andrade, Diana Carolina Guzmán-O., María Cecilia Escobar-Restrepo, Yamilet Arcos-Arango, Néstor Jaime Aguirre-R., Pierre Lutgen & Roberto Mejía-Ruiz	71
Unified model of shear modulus degradation curves in sand of Guayuriba river María del Pilar Ortiz-Pulido, Juan Felipe Gaitán-Serrano & Javier Fernando Camacho-Tauta	77
Influence of the normal stresses to direction of shear flow in the rheology of concentrated kaolin suspensions Néstor Ricardo Rojas-Reyes & Moisés Oswaldo Bustamante-Rua	85
Design of a three-finger end effector for optimal grip Vladimir Prada, Oscar Avilés & Mauricio Maledoux	93
The measurement of maintenance function efficiency through financial KPIS Diego Galar, Luis Berges, Mª Pilar Lambán & Bernardo Tormos	102
Theoretical and experimental analysis of structural joints of glued laminated pressed bamboo guadua for a housing project Patricia Luna, Ana Milena Olarte & Caori Takeuchi	110
Determination of the mechanical properties of anterior column units and functional spinal units of the L3-L4 lumbar porcine segment Ricardo Gustavo Rodríguez-Cañizo, Ariel Fuerte-Hernández, Guillermo Uriolagoitia-Sosa, Emmanuel Alejandro Merchán-Cruz, Paola Andrea Niño-Suárez & Alejandro González-Rebatu	115
Ionic liquids (IL) corrosion on A285 carbon steel Rogério F. Dos Santos, Tiago Falcade, Leonardo M. Antonini, Maria R. Ortega-V., Silvana Mattedi, Miguel Iglesias & Célia F. Malfatti	122
Effects of human-structure interaction in slabs Sandra Villamizar, Daniel Gómez & Peter Thomson	129
Thermal insulation produced from rice husk agglomerated using starch produced by <i>saccharomyces cerevisiae</i> Jaime Gutiérrez, Carolina Cadena & Antonio Bula	138
Relationship between the chemical composition and atomic volume in Ag- x % at Zn (x ≤ 20) solid solutions Danny Guzmán, Claudio Aguilar, Daniel Serafini, Paula Rojas, Stella Ordoñez & Juan F. Olivares-Pacheco	144

Methodology for the implementation of an economic and/or statistical design for x-bar charts with variable parameters (VP) Rita Peñabaena-Niebles, Oscar Oviedo-Trespalacios, Sandra Cuentas-Hernández & Ethel García-Solano	150
Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization Eduardo Gómez-Luna, Diego Fernando-Navas, Guillermo Aponte-Mayor & Luis Andrés Betancourt-Buitrago	158
Wireless surveillance system for greenhouse crops Alejandro Cama-Pinto, Francisco Gil-Montoya, Julio Gómez-López, Amos García-Cruz & Francisco Manzano-Aguilaro	164
Procedure of organization of the production for a company of drinks and sodas Iresis Borrero-Tinón, Rafael Espín-Andrade & Francis Hevia-Lanier	171
Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria Sergio Morales, Laura Corredor, Julio Paba & Leonardo Pacheco	178
Model-driven software development in the institutional repositories Jose Texier, Marisa De Guisti & Silvia Gordillo	186
Systems characterization and classification, a needed step for processes management and improvement. The specifics of health care organizations Arialy Hernández-Nariño, Alberto Medina-León, Dianelys Nogueira-Rivera, Ernesto Negrín-Sosa & Maylin Marqués-León	193
Proactive local search based on FDC Mailyn Moreno-Espino & Alejandro Rosete-Suárez	201
Analysis of a local innovation system: Agents and network of relations Jorge Coque, Pilar L. González-Torres, Nuria López-Mielgo & Daniel Vázquez	209
Soil management instruments for social housing: Case analysis César García-Ubaque, César Henao & Martha Vaca-Bohórquez	217
The importance of being chemical affinity. Part IV: The first flowers Guillermo Salas-Banuet, José Ramírez-Vieyra, Oscar Restrepo-Baena, María Noguera-Amaya & Bryan Cockrell	225

Our cover

Image alluding to Article:

Influence of the normal stresses to direction of shear flow in the rheology of concentrated kaolin suspensions

Authors:

Néstor Ricardo Rojas-Reyes & Moisés Osvaldo Bustamante-Rúa



CONTENIDO

Notas del Decano	9
Editorial	10
Predicción de series de tiempo no lineales usando MARS Juan David Velásquez-Henao, Carlos Jaime Franco-Cardona, Paula Andrea Camacho	11
Valorización de los residuos generados en el procesado de aceites vegetales usados Dolores Hidalgo-Barrio, Marta Gómez-Rincón, Alicia Aguado-Pesquera, Jesús María Martín-Marroquín & Emilia Sastre-García	20
Metodología para localización de centros de distribución a través de análisis multicriterio y optimización Diego Soto-de la Vega, José Geraldo Vidal-Vieira & Eli Angela Vitor-Toso	28
Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico Fernando Pérez, Alejandro Bautista, Martín Salazar & Antonio Macías	36
Impacto de programas de eficiencia energética eléctrica, estudio de caso: Empresas alimentarias en Cuenca, Ecuador Galo Carrillo-Rojas, Juan Andrade-Rodas, Antonio Barragán-Escandón & Ana Astudillo-Alemán	41
Desarrollo de una aplicación para la comparación rápida de pigmentos a partir de sus coordenadas colorimétricas Jessica Ingrid Piñeiro-Di Blasi, Javier Martínez-Torres, José Santiago Pozo-Antonio, Carla Iglesias-Comeña, Luciano Cuesta, Javier Taboada-Castro, Pablo Gajino-Núñez & Eva Tresaco-Vidaller	49
Un índice de peligrosidad para zonas laterales de carreteras de dos carriles Juan Ignacio Rivera & Tomás Echaveguren	55
Modelo analítico para determinar lotes óptimos de producción considerando diversos factores productivos y logísticos Javier Valencia, Mª Pilar Lambán & Jesús Royo	62
Efecto microbicida de la radiación solar (SODIS) combinado con <i>Artemisia annua</i> Mariana Muñoz-Restrepo, Leidy Viviana Orrego, Diana Carolina Muñoz-Arango, Carlos Neftaly Lozano-Andrade, Diana Carolina Guzmán-O., María Cecilia Escobar-Restrepo, Yamilet Arcos-Arango, Néstor Jaime Aguirre-R., Pierre Lutgen & Roberto Mejía-Ruiz	71
Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba María del Pilar Ortiz-Pulido, Juan Felipe Gaitán-Serrano & Javier Fernando Camacho-Tauta	77
Influencia de los esfuerzos normales a la dirección de flujo cizallante en la reología de suspensiones concentradas de caolín Néstor Ricardo Rojas-Reyes & Moisés Oswaldo Bustamante-Rua	85
Diseño de un efecto final de tres dedos para agarre óptimo Vladimir Prada, Oscar Avilés & Mauricio Maledoux	93
La medición de la eficiencia de la función mantenimiento a través de KPIs financieros Diego Galar, Luis Berges, Mª Pilar Lambán & Bernardo Tormos	102
Análisis teórico experimental de conexiones en elementos estructurales de bambú guadua laminado pegado prensado, para un proyecto de vivienda Patricia Luna, Ana Millena Olarte & Caori Takeuchi	110
Determinación de las propiedades mecánicas de unidades de columna anterior y unidades funcionales del segmento lumbar porcino L3-L4 Ricardo Gustavo Rodríguez-Cañizo, Ariel Fuerte-Hernández, Guillermo Uriolagoitia-Sosa, Emmanuel Alejandro Merchán-Cruz, Paola Andrea Niño-Suárez & Alejandro González-Rebatu	115
Corrosión de líquidos iónicos (LI) sobre acero al carbón A285 Rogério F. Dos Santos, Tiago Falcade, Leonardo M. Antonini, Maria R. Ortega V., Silvana Mattedi, Miguel Iglesias & Célia F. Malfatti	122
Efectos de interacción humano-estructura en losas Sandra Villamizar, Daniel Gómez & Peter Thomson	129
Aislamiento térmico producido a partir de cascarilla de arroz aglomerada utilizando almidón producido con <i>saccharomyces cerevisiae</i> Jaime Gutiérrez, Carolina Cadena & Antonio Bula	138

Relación entre la composición química y el volumen atómico en soluciones sólidas Ag- x % at Zn (x ≤ 20) Danny Guzmán, Claudio Aguilar, Daniel Serafini, Paula Rojas, Stella Ordoñez & Juan F. Olivares-Pacheco	144
Metodología para la implementación del diseño económico y/o estadístico de cartas de control x-barra con parámetros variables (VP) Rita Peñabaena-Niebles, Oscar Oviedo-Trespalacios, Sandra Cuentas-Hernández & Ethel García-Solano	150
Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización Eduardo Gómez-Luna, Diego Fernando-Navas, Guillermo Aponte-Mayor & Luis Andrés Betancourt-Buitrago	158
Sistema inalámbrico de monitorización para cultivos en invernadero Alejandro Cama-Pinto, Francisco Gil-Montoya, Julio Gómez-López, Amos García-Cruz & Francisco Manzano-Agugliaro	164
Procedimiento de organización de la producción para una empresa de bebidas y refrescos Iresis Borrero-Tinón, Rafael Espín-Andrade & Francis Hevia-Lanier	171
Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación Sergio Morales, Laura Corredor, Julio Paba & Leonardo Pacheco	178
El desarrollo de software dirigido por modelos en los repositorios institucionales Jose Texier, Marisa De Guisti & Silvia Gordillo	186
La caracterización y clasificación de sistemas, un paso necesario en la gestión y mejora de procesos. Particularidades en organizaciones hospitalarias Arialy Hernández-Nariño, Alberto Medina-León, Dianelys Nogueira-Rivera, Ernesto Negrín-Sosa & Maylin Marqués-León	193
Búsqueda local proactiva basada en FDC Maylin Moreno-Espino & Alejandro Rosete-Suárez	201
Análisis de un sistema local de innovación: Agentes y red de relaciones Jorge Coque, Pilar L. González-Torres, Nuria López-Mielgo & Daniel Vázquez	209
Instrumentos de gestión de suelo para vivienda de interés social en Colombia: Análisis de caso César García-Ubaque, César Henao & Martha Vaca-Bohórquez	217
La importancia de llamarse afinidad química. Parte IV: Las primeras flores Guillermo Salas-Banuet, José Ramírez-Vieyra, Oscar Restrepo-Baena, María Noguera-Ámaya & Bryan Cockrell	225

Nuestra Caratula

Influencia de los esfuerzos normales a la dirección de flujo cizallante en la reología de suspensiones concentradas de caolín

Autores:

Néstor Ricardo Rojas-Reyes & Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa



DEAN'S NOTE

The La Facultad de Minas 1970-2012

Bajo la autoría del historiador Luis Javier Villegas, el libro “La Facultad de Minas 1970-2012”, es una obra de carácter histórico que abarca el acontecer reciente de la institución, desde la década de los años setenta hasta cuando ella celebró 125 años.

Desde que la Escuela Nacional de Minas en Medellín inició labores docentes el 11 de abril de 1887, de sus aulas han egresado numerosos ingenieros que han contribuido en gran medida al desarrollo de la región, del país y aún fuera de las fronteras patrias, bajo el lema de Trabajo y Rectitud. Tanto en su primera época, como Escuela de Minas, como en la época de la Facultad, ha sido notable la contribución de ingenieros competentes, egresados de sus programas de pregrado y de posgrado, a la minería, los transportes, los servicios públicos, la construcción, la creación y gerencia de empresas, la administración pública y muchos otros campos.

Varias obras han querido describir cómo la institución ha logrado aportar a la plataforma de competitividad desde la ingeniería. Dos obras de carácter histórico publicadas en la última década del siglo anterior han dado buena cuenta del devenir de la institución hasta 1970; se trata de los libros *Origen, Desarrollo y Realizaciones de la Escuela de Minas de Medellín*, obra del doctor Peter Santa María, personaje fundamental en la vida de la Facultad, y *Sueños de Desarrollo, La Escuela Nacional de Minas de Colombia y sus ingenieros, 1887-1970*, de la doctora en historia Pamela Murray, obra publicada en inglés en 1997 y en traducción al español en 2012. Estas obras fueron precedidas por el libro *Ética, Trabajo y Productividad en Antioquia. Una interpretación sociológica sobre la influencia de la Escuela Nacional de Minas en la vida, costumbres e industrialización regionales*, obra del sociólogo vallecaucano Alberto Mayor Mora y cuya primera edición data de 1984.

En la obra del historiador Luis Javier Villegas, se hace una retrospectiva de los sucesos que hasta ahora no se habían documentado, comenzando por el decenio de los setenta, particularmente agitado en las universidades públicas del país –también lo fue para la Facultad–; en medio de cierres y protestas, los cursos de ciencias básicas dejaron de dictarse en la sede tradicional de Robledo y pasaron a las nuevas edificaciones en los predios de la Facultad de Agronomía, y los docentes de esas asignaturas se incorporaron a las nuevas facultades de Ciencias y Ciencias Humanas, hijas de la Facultad de Minas, con lo cual la integración de la Sede de Medellín de la Universidad Nacional se consolidó; figura central de este proceso fue el ingeniero civil Darío Valencia.

El decenio de los ochenta tuvo especial importancia para la institucionalización de la investigación y de los posgrados

en la universidad colombiana; para la consolidación del quehacer académico en la Facultad fue determinante la creación de los programas de maestría en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y en Ciencia y Técnica del Carbón, en 1984, así como la celebración del Centenario en 1987 cuando, con la colaboración de egresados que ocupaban posiciones destacadas en los sectores público y privado, la Facultad recibió, a la par que reconocimientos y muestras de afecto, unos fondos que le permitieron mejorar la dotación de sus laboratorios y adquirir terrenos para su ampliación. De entonces data la constitución de la Corporación para el Desarrollo de la Facultad de Minas, Prodeminas, que tanto le ha aportado.

El decenio final del siglo veinte, marcado por la nueva Constitución Política, fue una época de ambiciosas reformas académicas, propuestas por el rector Antanas Mockus, las cuales empero no tuvieron los resultados esperados. Durante este periodo se siguió consolidando y cualificando la investigación, se ampliaron las actividades de extensión a la comunidad, fuente de recursos y a la vez enriquecedora del quehacer académico, y se crearon nuevos programas de pregrado y posgrado. Con todo, el logro más significativo fue la creación del programa de doctorado en el área de Recursos Hidráulicos, que otorgó el grado al primer doctor en ingeniería que lo obtuvo en el país, el ingeniero Germán Poveda.

Finalmente, el libro relata los años corridos del presente siglo, hasta el 2012, en los que la Facultad ha consolidado en gran medida su actividad docente, con un nuevo pregrado, varios programas de especialización y maestría, y de manera especial con nuevos doctorados, constituyéndose en la facultad de ingeniería con mayor número de programas en el país, de calidad muy reconocida, como lo expresaba recientemente el gobernador del Departamento, Sergio Fajardo: “en Antioquia la Facultad de Minas es sello de calidad”. Esa actividad docente está basada en una planta de profesores de alta competencia, con títulos de doctorado y maestría, en grupos de investigación de excelente nivel y en actividades de proyección a la comunidad de gran impacto. Al celebrar los 125 años la Facultad recibió el cariño y la admiración de autoridades, de empresarios, de sus egresados y de la sociedad en general, que a la vez la estimulan y comprometen. Nobleza obliga.

John Willian Branch B., MSc, PhD
Dean
Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia



EDITORIAL

The importance of Scientific Authors' Identity in the digital era

Today it is impossible to deny the importance of the Internet to disseminate advances in science and engineering and hence the pressure on researchers to establish an online presence in order to disseminate their work and discover new resources for their research activities. Here, online scientific presence is understood as online systems and services where the researcher's information is collected manually or automatically, and such information is available for the scientific community; in addition, some of these systems are able to recommend new available scientific resources to the researcher according to each particular profile.

Several reasons promote the use of these online services: first, authors need to establish an online scientific presence in order to quickly disseminating their research and be cited by other authors. Recent on-line services as ResearchGate allow users to claim the authorship of manuscripts and to follow other users with the aim of receiving alerts about new published resources such as datasets, bibliographic references or manuscripts.

Second, academic committees (including journal editorial boards) need to select appropriate peers for evaluating project proposals, manuscripts, master thesis and PhD dissertations based on the public curriculum of potential reviewers; in this sense, online scientific profiles are an important resource for locating appropriate peers.

Third, editors and peers need to review previous publications of the authors of the manuscripts in review, in order to establish the work's originality and to avoid publishing unoriginal contributions.

Thus, although the way in which the personal identity of the authors is established in an article seems to be a cosmetic issue, it really is necessary to consider how online services match manuscripts and authors in order to increase the accuracy of the association. Our editorial board is aware of the necessity of contributing to build the online presence of our authors and we are implementing several improvements in DYNA in order to achieve this objective.

The first aspect is related to the author's full name in the article. Here it is important to recognize cultural differences about how the authors sign manuscripts. For example, while in North American culture the tradition is to use one or two names and the father's surname, in the Spanish tradition the use of two names and two surnames is very common. Moreover, major differences exist; in Portuguese, it is possible to use more than two names and the first surname is inherited from the mother and the second from the father. The problem arises

when we consider that most of the systems developed follow the North American convention for the names; thus, when I use my complete name "Juan David Velásquez Henao", most systems recognize the string "Juan David Velásquez" as the name, and the string "Henao" as the surname, and as a result, the author's name would be reported as "J. D. V. Henao" in many online services, with the consequent errors in the identification of the author. As a consequence, our editorial board encourages authors signing with two surnames to use a hyphen in order for automatic systems to correctly recognize the author's name. Thus, if I desire to use my full name I must write "Juan David Velásquez-Henao".

The second aspect is related with the consistency of the authors' name in manuscripts. In this case, systems such as SCOPUS, treat the names "Juan Velásquez", "Juan D. Velásquez" and "Juan David Velásquez" as different authors, such that, the users of SCOPUS need to discover on their own that the three authors are the same person. As a conclusion, I recommend the use of the same signature across manuscripts. In the case of SCOPUS, authors must apply for registration of alternative names to claim authorship.

The fourth aspect concerns the e-mail reported in the manuscript. Some systems, such as Scholar Google, assign authorship based on the authors' e-mail in the article instead of the full name in the manuscript; as in previous cases, it is very important to use the same e-mail to prevent future authorship problems.

The final aspect is that names in manuscripts are not unique and it is common for several authors to have the same name in the world; in addition, names can change over time as a result of cultural customs. Our editorial board encourages authors to use the Open Researcher and Contributor ID (ORCID) that is a unique alphanumeric code assigned to the author when he is registered in the ORCID web site (www.orcid.org). ORCID provides a public webpage identified by the ORCID alphanumeric code where information about the authors education, employment and scientific works are freely available to the community. Members of ORCID community include important publishers such as: Elsevier, IEEE, Springer, Taylor & Francis Group, Thompson Reuters, Wiley, IOP Publishing, Nature Publishing Group, Oxford University Press, and Public Library of Science (PLOS).

Juan D. Velásquez, MSc, PhD
Full Professor
Universidad Nacional de Colombia
<http://orcid.org/0000-0003-3043-3037>



Nonlinear time series forecasting using MARS

Predicción de series de tiempo no lineales usando MARS

Juan David Velásquez-Henao ^a, Carlos Jaime Franco-Cardona ^b & Paula Andrea Camacho ^c

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. jvelasq@unal.edu.co

^b Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. cjfranco@unal.edu.co

^c Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. pcamach@unal.edu.co

Received: September 17th, 2012. Received in revised form: December 1th, 2013. Accepted: March 3th, 2014.

Abstract

One of the most important uses of artificial neural networks is to forecast non-linear time series, although model-building issues, such as input selection, model complexity and parameters estimation, remain without a satisfactory solution. More of research efforts are devoted to solve these issues. However, other models emerged from statistics would be more appropriated than neural networks for forecasting, in the sense that the process of model specification is based entirely on statistical criteria. Multivariate adaptive regression splines (MARS) is a statistical model commonly used for solving nonlinear regression problems, and it is possible to use it for forecasting time series. Nonetheless, there is a lack of studies comparing the results obtained using MARS and neural network models, with the aim of determinate which model is better. In this paper, we forecast four nonlinear time series using MARS and we compare the obtained results against the reported results in the technical literature when artificial neural networks and the ARIMA approach are used. The main finding in this research, it is that for all considered cases, the forecasts obtained with MARS are lower in accuracy in relation to the other approaches.

Keywords: Artificial neural networks; comparative studies; ARIMA models; nonparametric methods.

Resumen

Uno de los usos más importantes de las redes neuronales artificiales es el pronóstico de series de tiempo no lineales, aunque los problemas en la construcción del modelo, tales como la selección de las entradas, la complejidad del modelo y la estimación de los parámetros, permanecen sin una solución satisfactoria. La mayoría de los esfuerzos en investigación están orientados a resolver estos problemas. Sin embargo, los modelos emergidos de la estadística podrían ser más adecuados que las redes neuronales para el pronóstico, en el sentido de que el proceso de especificación es basado enteramente en criterios estadísticos. La regresión adaptativa multivariada por tramos (MARS, por su sigla en inglés) es un método estadístico comúnmente usado para resolver problemas no lineales de regresión, y es posible usarlo para el pronóstico de series de tiempo. No obstante, faltan estudios que comparan los resultados obtenidos usando MARS y redes neuronales artificiales, con el fin de determinar cuál modelo es mejor. En este artículo, se pronostican cuatro series de tiempo no lineales usando MARS y se comparan los resultados obtenidos contra los resultados reportados en la literatura técnica cuando se usan las redes neuronales artificiales y la aproximación ARIMA. El principal hallazgo en esta investigación es que, para todos los casos considerados, los pronósticos obtenidos con MARS son inferiores en precisión respecto a otras aproximaciones.

Palabras clave: Redes neuronales artificiales; estudios comparativos; modelos ARIMA; métodos no paramétricos.

1 Introducción

La predicción de series de tiempo no lineales es una de las principales aplicaciones de las redes neuronales artificiales [1], siendo este un problema de interés particular para muchos científicos y profesionales provenientes de diversas áreas del conocimiento [2]. Una revisión profunda sobre la predicción de series de tiempo usando redes neuronales es presentada en [3]; ejemplos de casos específicos son presentados en [4-8].

Uno de los tipos más comunes de red neuronal que han sido utilizados para la predicción de series de tiempo son los perceptores multicapa (MLP, por su sigla en inglés) [3]; ello es debido a que pueden aproximar cualquier función continua

definida en un dominio compacto con una precisión arbitraria [9-11]. No obstante, su proceso de especificación se basa en un conjunto de pasos críticos donde se emplean criterios empíricos y juicio experto [12-14]. Estos pasos están relacionados con el procesamiento de la información, la selección de las entradas a la red neuronal, de la cantidad correcta de neuronas a la capa oculta y la estimación de sus parámetros, entre otros. Las decisiones tomadas en cualquiera de los pasos del método de especificación, afectan el desempeño final del modelo en términos de su ajuste a los datos históricos y su capacidad de generalización; esto implica, que el proceso de especificación no es fácilmente reproducible, haciéndolo muy cuestionable [4]. Desde el trabajo seminal de Anders y Korn [15], se ha venido



trabajando en metodologías de especificación basadas criterios estadísticos, pero no se ha llegado a definir criterios que sean aceptados en forma amplia por la comunidad científica. Aunque otras arquitecturas de redes neuronales, como las máquinas de vectores de soporte (SVM, por su sigla en inglés) [16,17] o las redes neuronales de arquitectura adaptativa (DAN2, por su sigla en inglés) [5], han sido usadas con éxito para la predicción de series de tiempo [8,18], persisten muchos de los problemas enunciados en la especificación del modelo.

La persistencia de los problemas planteados da pie a investigar si otros métodos alternativos a las redes neuronales artificiales podrían ser usados de forma directa, pero, sin la existencia de dichos problemas en especificación del modelo. Una de dichas metodologías alternativas es MARS (multivariate adaptive regression splines) [19-21]; este es un modelo estadístico de regresión no lineal que se basa en la construcción de regiones que dividen el dominio de las variables de entrada, y en la asignación de un modelo de regresión lineal para cada una de las regiones obtenidas. El algoritmo de especificación de MARS está específicamente diseñado para seleccionar las variables de entrada y determinar la configuración óptima del modelo a partir de criterios estadísticos [19]; igualmente, es notoria la rapidez para la estimación de sus parámetros óptimos. MARS, al ser una metodología para construir modelos de regresión no lineal, podría realizar las mismas tareas que son usualmente abordadas con modelos de redes neuronales artificiales [22-25].

Debido a las ventajas teóricas y conceptuales presentadas por MARS, resulta natural su aplicación a la predicción de series de tiempo no lineales. Por ejemplo, Lewis y Stevens [26] muestran la relación entre MARS y los modelos TAR postulados por Tong [27], y usan MARS para analizar la serie de manchas solares de Wolf; en [6] se usa MARS para pronosticar serie de Mackey-Glass, y compara los resultados obtenidos con otros modelos; en [28] se pronostican tasas de cambio, mientras que en [29] se pronostican series hidrológicas; en [30] se analiza el comportamiento de los índices de producción industrial de Estados Unidos y Canadá.

Sin embargo, hay pocas evidencias que permitan determinar si MARS es realmente superior en precisión respecto a las redes neuronales para el pronóstico de series de tiempo. Por ejemplo, en [31] se concluye que MARS es más preciso que los perceptrones multicapa, la regresión lineal múltiple y las máquinas de vectores de soporte cuando se pronostica el índice de mercado Shanghai B-share. No obstante, también se ha reportado que MARS es inferior en capacidad a ciertos tipos de modelos de redes neuronales artificiales; en [32] se concluye que las máquinas de vectores de soporte son más precisas que MARS cuando se pronostica la demanda urbana de agua; en [33] se presentan evidencias indicando que las redes neuronales artificiales son más precisas que MARS al pronosticar la demanda de electricidad; finalmente, en [34] se concluye que las redes neuronales recurrentes superan a MARS en el pronóstico de series de tiempo hidrológicas.

El objetivo de esta investigación es comparar la precisión de los pronósticos obtenidos con MARS y los obtenidos con

diferentes arquitecturas de redes neuronales artificiales y con el modelo ARIMA, al pronosticar cinco series de tiempo no lineales. El trabajo práctico en esta investigación se centra en pronosticar dichas series usando MARS; para las redes neuronales y el modelo ARIMA se recurrió a resultados previamente reportados en otras investigaciones [4,5,7,8], de tal forma, que el lector debe remitirse a dichas fuentes para consultar detalles sobre los modelos alternativos considerados.

El resto de este artículo está organizado como sigue: En la próxima sección, se presenta el modelo MARS. Posteriormente, se describen los casos y de aplicación y se analizan los resultados obtenidos. Finalmente, se concluye.

2 Multivariate Adaptive Regression Splines

MARS es un modelo no paramétrico de regresión no lineal que permite explicar la dependencia de la variable respuesta respecto una o más variables explicativas [19]. MARS suele ser preferido sobre otros modelos no paramétricos de regresión debido a que: permite aproximar relaciones no lineales complejas a partir de los datos, sin postular una hipótesis sobre el tipo de no linealidad presente en los datos, tal como si ocurre en los modelos paramétricos de regresión; el algoritmo de construcción del modelo incorpora mecanismos que permite seleccionar las variables explicativas relevantes, descartando aquellas que no aportan información sobre la dinámica de la variable dependiente; el modelo resultante puede ser interpretado, al contrario de otros modelos de caja negra, como por ejemplo, las redes neuronales artificiales; y finalmente, la estimación de sus parámetros es computacionalmente eficiente y rápida, en oposición a como ocurren en los modelos de redes neuronales artificiales.

En la regresión basada en particionamiento recursivo, una función desconocida es aproximada dividiendo el espacio del dominio de las variables de entrada en M regiones disyuntas, tal que:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{m=1}^M a_m B_m(\mathbf{x})$$

donde $B_m(\mathbf{x})$ es una función base que toma la forma de la función indicadora:

$$B_m(\mathbf{x}) = I[\mathbf{x} \in R_m]$$

que toma el valor de uno si su argumento es verdadero y cero en caso contrario. El algoritmo se inicia con $M = 1$, lo que es equivalente a decir que:

$$f(\mathbf{x}) = a_1 B_1(\mathbf{x}) = a_1$$

Luego se consideran dos regiones ($M = 2$). El punto crucial en el algoritmo es que la frontera de división es especificada como $x_v = t$, donde x_v es la v -ésima componente del vector \mathbf{x} , y t es un valor constante. Si $H[\eta]$ es la función de paso unitario, que toma el valor de la unidad cuando $\eta \geq 0$, y

cero en caso contrario, entonces, la nueva aproximación obtenida para dos regiones es:

$$f(\mathbf{x}) = a_1 B_1(\mathbf{x}) H[+(x_v - t)] + a_2 B_1(\mathbf{x}) H[-(x_v - t)]$$

donde las regiones y los coeficientes a_1 y a_2 son obtenidos tal que se maximice el ajuste a los datos. Nótese que para partir la región B_1 es necesario introducir una pareja de funciones $H[]$.

Luego se toma $M = 3$. En este caso, se consideran todos los posibles modelos que se obtienen al partir una de las dos regiones obtenidas para $M = 2$, lo que permite llegar así a tres regiones. El algoritmo continúa adicionando regiones hasta que se cumpla algún criterio de parada. Así, en el modelo final y como resultado del algoritmo de particionamiento recursivo, las funciones base toman la forma de:

$$B_m(\mathbf{x}) = \prod_{k=1}^{K_m} H[s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km})]$$

donde: K_m es la cantidad de fronteras o particiones requeridas para definir la región m ; s_{km} toma los valores de ± 1 indicando el sentido de la función de paso; $x_{v(k,m)}$ indica la variable que introduce la frontera; y t_{km} es el valor de la frontera. El modelo obtenido mediante particionamiento recursivo sufre de dos limitantes: en primer lugar, la función obtenida no es continua en las fronteras entre regiones; y segundo, la inhabilidad del modelo para aproximar funciones lineales o aditivas.

MARS es obtenido a partir de la metodología anterior introduciendo las siguientes modificaciones. En primer lugar, Friedman [19] reemplaza la función de paso $H[\eta]$ por una curva spline de orden q truncada por un lado:

$$b_q(x - t) = [x - t]_+^q$$

donde t es la ubicación de la frontera, y el símbolo $+$ indica que se tome la parte positiva del argumento. De esta forma, las funciones base en el modelo final pueden escribirse como:

$$B_m^{(q)}(\mathbf{x}) = \prod_{k=1}^{K_m} [s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km})]_+^q$$

Usualmente $q = 1$, por lo que las funciones base son lineales por tramos. De esta forma, es común reescribir la ecuación anterior como:

$$B_m^{(1)}(\mathbf{x}) = \prod_{k=1}^{K_m} [s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km})]_+$$

O equivalentemente

$$B_m(\mathbf{x}) = \prod_{k=1}^{K_m} \max\{0, s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km})\}$$

La introducción de curvas spline causa que las regiones se traslapan en vez de ser disyuntas, generando la continuidad en las fronteras entre regiones. El siguiente cambio introducido en [19] es que cuando se realiza una partición que genera dos nuevas regiones hijas, la región padre original no es removida del modelo. Ello permite que tanto la región padre como sus dos regiones hijas puedan ser elegibles para ser divididas en pasos posteriores. Igualmente, se prohíbe que la misma variable x_v sea usada más de una vez dentro del producto de términos que definen una función base $B_m(\mathbf{x})$; ello para evitar que se generen polinomios de orden mayor a q .

El algoritmo de especificación descrito hasta este punto corresponde a una fase de pasada hacia adelante, en la cual se crean las regiones en el espacio de variables de entrada. En una segunda fase, se evalúa si pueden eliminarse funciones base sin que se comprometa la calidad del modelo obtenido.

Si $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots]$, entonces es demostrable que el modelo matemático generado por MARS es:

$$f(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{m=1}^M a_m \prod_{k=1}^{K_m} [s_{km} \cdot (x_{v(k,m)} - t_{km})]_+$$

Agrupando todas las funciones base que envuelven los mismos conjuntos de variables explicativas, se llega a que la función puede reescribirse como:

$$f(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{K_m=1} f_i(x_i) + \sum_{k_m=2} f_{i,j}(x_i, x_j) + \dots$$

donde a_0 corresponde a una constante, mas la suma de las funciones bases de una variable, mas la suma de todas las funciones base de dos variables, y así sucesivamente.

La selección final del modelo es realizada explorando modelos que difieren en la cantidad de regiones utilizadas, y seleccionando aquel que minimice el criterio de validación cruzada generalizada, que es una medida que incorpora el ajuste a los datos y una penalización por la complejidad del modelo. En MARS, este criterio de selección es la falta de ajuste (LOF, por su sigla en inglés):

$$LOF(f) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - f(\mathbf{x}_i)]^2}{\left[1 - \frac{C(M)}{N}\right]^2}$$

donde M es el número final de funciones base, N es la cantidad de datos, y_i es el valor de la función que se desea aproximar, $f()$ es el modelo con M funciones base, \mathbf{x}_i es el vector de valores de las variables independientes en el punto i , y $C(M)$ es un factor de penalización por el

aumento de la varianza debido al aumento de la complejidad del modelo:

$$C(M) = \text{trace}(\mathbf{B}(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T) + 1 + d \cdot M$$

\mathbf{B} es la matriz de datos de las funciones base. d es un parámetro que representa el costo de la optimización de cada función base; cuando incrementa podría causar que se generen menos puntos de corte (fronteras). Friedman [19] sugiere $2 \leq d \leq 4$; por defecto, $d = 2$.

3 Resultados obtenidos

En esta sección se compara la precisión de los pronósticos obtenidos usando MARS versus los pronósticos obtenidos en otras investigaciones usando perceptrones multicapa, modelos ARIMA, DAN2 y máquinas de vectores de soporte. Se invita al lector a consultar los detalles de los pronósticos realizados con los modelos alternativos en las referencias citadas en esta sección. Para realizar los cálculos presentados se usó la función mars del paquete mda, implementado en el lenguaje R para el cómputo estadístico.

Para todos los casos considerados, se utilizaron como estadísticos de ajuste el error cuadrático medio (MSE, por su sigla en inglés) y el error medio absoluto (MAD, por su sigla en inglés).

La información disponible para cada serie de tiempo fue separada en un conjunto de datos para el entrenamiento o calibración de los parámetros del modelo, y en un conjunto para pronóstico o validación. Las cantidades de datos usados para el ajuste del modelo y para la predicción, son las mismas usadas en estudios previos para cada serie analizada.

Ya que el algoritmo de especificación de MARS permite la selección de las entradas relevantes al modelo, se procedió a realizar la especificación para cada serie estudiada, considerando como posibles regresores los rezagos $1-P$, donde P es el máximo rezago utilizado en estudios previos. Igualmente, se varió el parámetro d (penalización por la cantidad de funciones base) desde 2 hasta 4.

3.1 Serie PAPER

Corresponde a las ventas mensuales de papel impreso y escrito en miles de francos franceses entre 1/1963 y 12/1972. En [35] se reporta que el modelo ARIMA con menor error cuadrático medio (MSE) para representar la dinámica de la serie es de orden $(0, 1, 1) \times (0, 1, 1)_{12}$ usando la totalidad de la información. No obstante, para la evaluación del pronóstico usando modelos no lineales, se usan las primeras 100 observaciones para el ajuste de los modelos, y las 20 restantes para la predicción por fuera de la muestra de calibración. La serie es pronosticada sin ninguna transformación. Esta serie es graficada en la Fig. 1.

En la literatura técnica se ha reportado que los mejores pronósticos (por modelo) se obtienen con un modelo ARIMA que usa los rezagos 1, 12, y 13 [5], y con los rezagos 1, 7 y 12 para las redes neuronales tipo MLP [5], DAN2 [5] y SVM [8]. Los estadísticos de ajuste para estos modelos son reportados en la Tabla 1.

Tabla 1.
Estadísticos de ajuste para la serie PAPER.

Modelo	Rezagos	Entrenamiento MSE (MAD)	Predicción MSE (MAD)
ARIMA [5]	1, 12, 13	1715,5 (34,0)	4791,7 (54,7)
MLP [5]	1, 7, 12	1951,5 (36,8)	5874,8 (62,6)
DAN2 [5]	1, 7, 12	* 1263,4 (26,3)	* 1760,8 (35,0)
SVM [8]	1, 7, 12	2354,8 (38,1)	5526,4 (61,0)
MARS	12	2033,0 (35,6)	5527,7 (60,2)

* MSE más bajo por columna.

Al igual que para los casos reportados en la literatura, MARS fue estimado sobre los primeros 100 datos, y luego se procedió a realizar el pronóstico del siguiente mes usando los datos reales, para las 20 observaciones restantes. Para la especificación de MARS se consideraron los rezagos desde 1 hasta el 13. El modelo final obtenido es únicamente función de y_{t-12} .

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos de ajuste obtenidos. Para las muestras de entrenamiento y calibración, MARS es inferior al modelo ARIMA en términos de la precisión obtenida. No obstante, la precisión de DAN2 es notoria y sigue siendo el modelo que mejor se adapta a la dinámica de la serie analizada. Puede decirse que MARS es superior a las SVM, ya que su error de ajuste a la muestra de calibración es mejor (el 86% del MSE reportado para la muestra de entrenamiento), y tiene un error prácticamente igual para la muestra de pronóstico.

3.2 Serie POLLUTION

Es la cantidad de despachos mensuales de un equipo de polución en miles de francos franceses, entre 1/1986 y 1/1996. La serie modelada corresponde al logaritmo natural de los datos originales. Las primeras 106 observaciones son usada para la estimación de los modelos, mientras que las 24 restantes son usadas para su validación. Esta serie es graficada en la Fig. 2.

En investigaciones previas se encontró que: el mejor modelo ARIMA para pronosticar la serie es de orden $(2,1,0)(1,0,0)_{12}$ [5], lo que equivale a usar los rezagos 1–3 y 12–15; el mejor MLP usa los rezagos 1–12 [5]; igualmente en [5] se reportaron los resultados para modelos DAN2 que usan los siguientes grupos de rezagos: 1–3, 12–15; 1–12; y finalmente, 1–15. En [8] se pronostica esta misma serie con dos SVM que usa los grupos de rezagos 1–3, 12–15, y 1–12. Los estadísticos de ajuste para estos modelos son reportados en la Tabla 2.

Tabla 2.
Estadísticos de ajuste para la serie POLLUTION.

Modelo	Rezagos	Entrenamiento MSE (MAD)	Predicción MSE (MAD)
ARIMA[5]	1–3,12–15	0,052 (0,181)	0,268 (0,395)
MLP[5]	1–12	0,054 (0,188)	0,146 (0,334)
SVM-1[8]	1–3,12–15	0,052 (0,176)	0,042 (0,175)
SVM-2[8]	1–12	0,049 (0,174)	0,080 (0,221)
DAN2-1[5]	1–3,12–15	0,020 (0,101)	0,025 (0,113)
DAN2-2[5]	1–12	0,019 (0,108)	* 0,020 (0,115)
DAN2-3[5]	1–15	* 0,013 (0,085)	0,023 (0,119)
MARS	1, 3, 12	0,054 (0,177)	0,066 (0,211)

* MSE más bajo por columna.

El algoritmo de selección de MARS fue aplicado sobre los rezagos 1–15; el modelo final obtenido pronostica el valor actual como función de los rezagos 1, 3 y 12. Los estadísticos de ajuste calculados para MARS se reportan en la Tabla 2. En términos del MSE para la muestra de entrenamiento, MARS es el séptimo modelo en calidad de ajuste en un ordenamiento del menor al mayor MSE; el MLP reportado en [5] presenta el mayor MSE entre todos los modelos. No obstante, es ligeramente superior en la precisión de la predicción, ocupando el quinto lugar. Los valores del MSE calculados para MARS, para las muestras de entrenamiento y pronóstico, son superiores en más de 3 veces respecto a los mejores valores del MSE. DAN2 sigue siendo el mejor modelo tanto en entrenamiento como en validación.

3.3 Serie LYNX

Es el número de linceos canadienses atrapados por año en el distrito del río Mckenzie del norte de Canadá entre los años 1821 y 1934. Se pronostica el logaritmo en base 10 de la serie original. Las primeras 100 observaciones son usada para el ajuste de los modelos y las 14 restantes para la predicción por fuera de la muestra de calibración. En la Figura 3 se presenta el gráfico de la serie.

Esta serie es usada en [7] para evaluar el desempeño de un modelo ARIMA, un MLP y un modelo híbrido que combina las dos metodologías anteriores; en [7] se reporta que el MLP tiene una estructura de 7 entradas correspondientes a los primeros 7 rezagos de la serie, 5 neuronas en la capa oculta, y una neurona de salida. Ghiassi, Saidane y Zimbra [5] probaron diferentes configuraciones del modelo DAN2 que difieren en los rezagos utilizados para su especificación. Estos mismos grupos de rezagos fueron usados por Velásquez, Olaya y

Franco [8] para evaluar la precisión de la predicción usando SVM. Los resultados obtenidos en estas investigaciones son reportados en la Tabla 3.

Al igual que en los otros casos analizados, se aplicó el algoritmo de especificación de MARS considerando que las variables explicativas corresponden a los valores rezagados de la serie de tiempo entre uno y diez años. Este último valor, es el máximo rezago usado en [5]. Para este caso, el algoritmo de especificación reportó los rezagos 1, 2, 3, 5, 9 como relevantes.

Para esta serie de tiempo, MARS se destaca por su baja precisión en el entrenamiento y la predicción. En términos del MSE, es el penúltimo modelo considerando la muestra de entrenamiento, mientras que presenta la precisión más baja entre todos los modelos para la muestra de predicción. Los MSE de MARS son más de siete veces los mejores MSE reportados en la Tabla 3.

Tabla 3.
Estadísticos de ajuste para la serie LYNX.

Modelo	Rezagos	Entrenamiento MSE (MAD)	Predicción MSE (MAD)
ARIMA [7]	N/A	N/A	0,021 (0,112)
MLP [7]	N/A	N/A	0,021 (0,112)
Hybrid [7]	1–7	N/A	0,017 (0,104)
DAN2-1 [5]	1–3, 8–10	0,001 (0,023)	0,008 (0,068)
DAN2-2 [5]	1–6	* 0,001 (0,013)	0,011 (0,081)
DAN2-3 [5]	1–4, 8–10	0,013 (0,082)	0,014 (0,094)
DAN2-4 [5]	1–8	0,013 (0,080)	0,011 (0,088)
DAN2-5 [5]	1–9	0,015 (0,095)	0,012 (0,084)
DAN2-6 [5]	1–10	0,006 (0,043)	* 0,006 (0,065)
SVM-1 [8]	1–9	0,026 (0,140)	0,036 (0,163)
SVM-2 [8]	1–10	0,031 (0,157)	0,035 (0,163)
MARS	1–3,5,9	0,027 (0,130)	0,044 (0,171)

* MSE más bajo por columna.

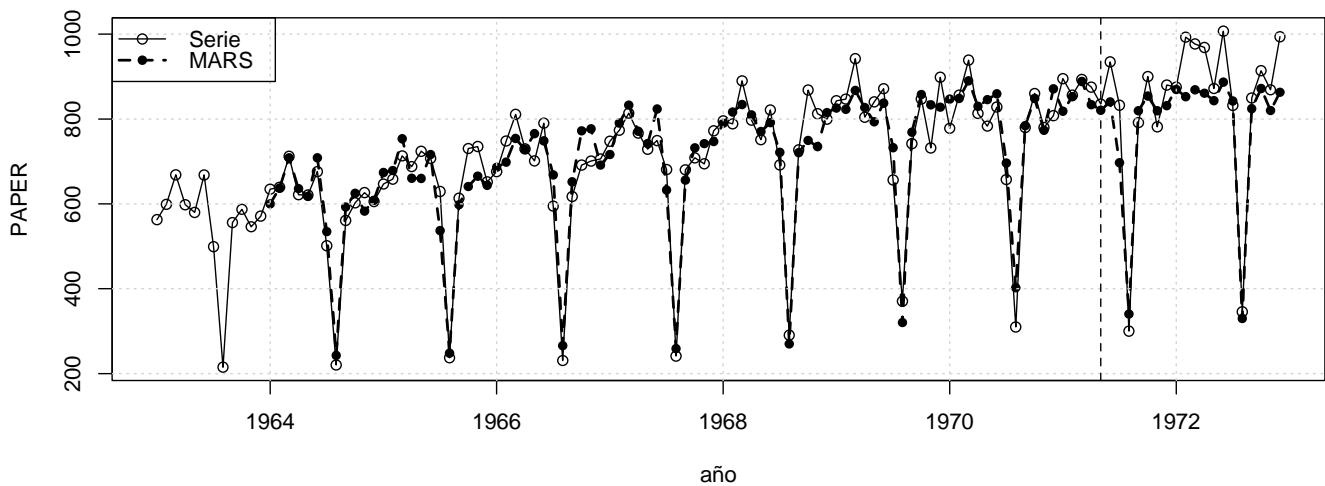


Figura 1. Serie PAPER. Datos reales y pronóstico obtenido usando MARS.

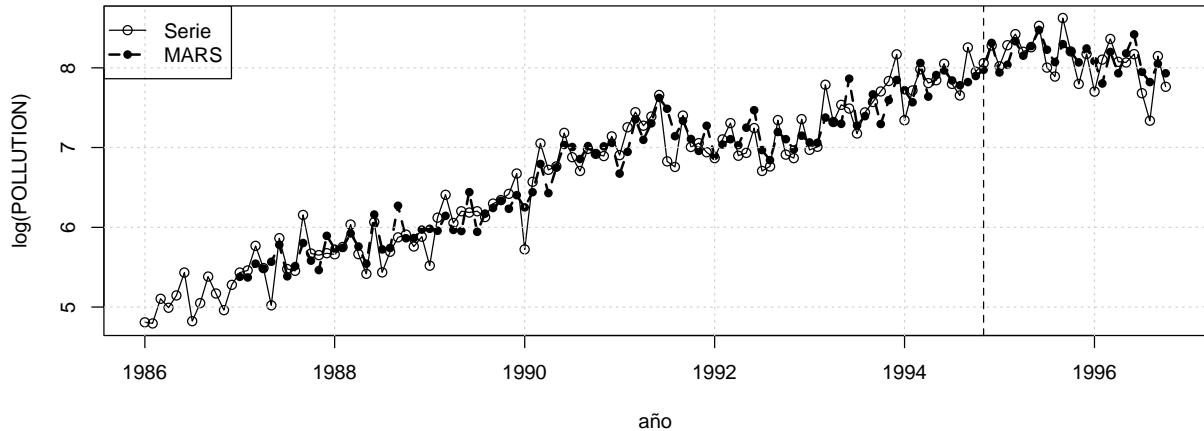


Figura 2. Serie POLLUTION. Datos reales y pronóstico obtenido usando MARS.

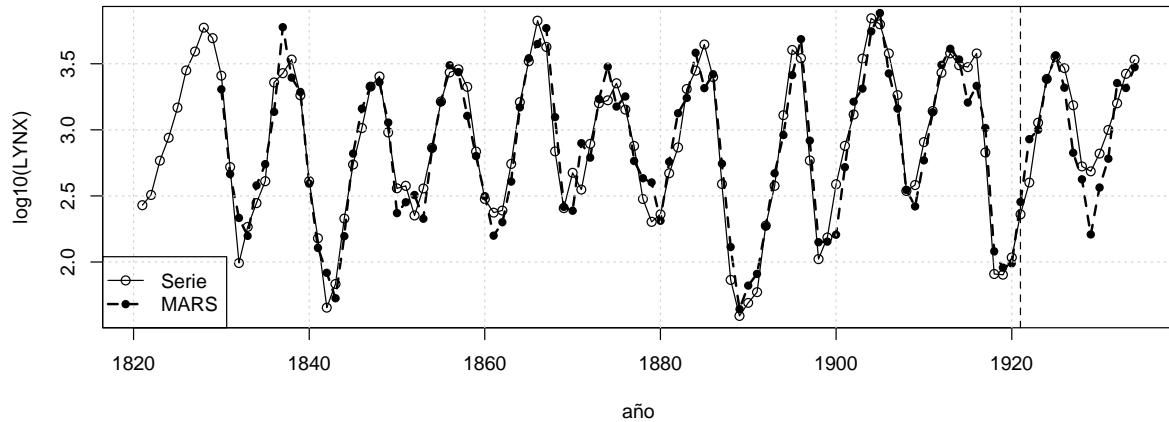


Figura 3. Serie LYNX. Datos reales y pronóstico obtenido usando MARS.

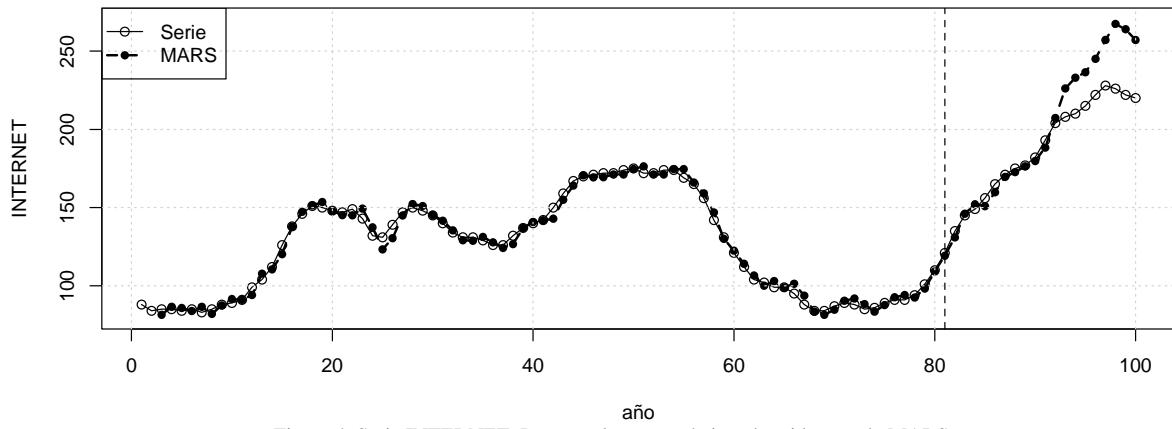


Figura 4. Serie INTERNET. Datos reales y pronóstico obtenido usando MARS.

3.4 Serie INTERNET

Es la cantidad de usuarios que acceden a un servidor de internet por minuto durante 100 minutos consecutivos. Los primeros 80 datos son usados para la estimación del modelo, y los 20 restantes para su predicción. Se modela la serie original sin ningún tipo de transformación. La serie es graficada en la Figura 4.

Esta serie es analizada en [35], y se sugiere que un modelo ARIMA de orden (3, 1, 0) sería el más adecuado

para representar su dinámica. Ghiassi, Saidane y Zimbra [5] reportan los resultados obtenidos al estimar: un MLP con rezagos 1, 2, 3 y 4, y DAN2 con los grupos de rezagos del 1-3 y de 1-4. Velásquez, Olaya y Franco [8] realizan la predicción de esta serie usando un SVM que tiene como entradas los rezagos 1-4. Los estadísticos de ajuste para dichos modelos aparecen en la Tabla 4.

Los rezagos uno al cuatro fueron utilizados para especificar el modelo MARS. El modelo final seleccionado usa únicamente los rezagos 1 y 2. Al analizar la Tabla 4,

resulta notoria la falta de precisión de MARS. Presente el MSE y el MAD más altos entre todos los modelos, para ambas muestras de datos (entrenamiento y predicción). En ambos casos, el MSE calculado para MARS es más de tres veces el menor MSE reportado en la Tabla 4.

4 DISCUSIÓN

En las secciones anteriores se ha discutido el principio matemático sobre el que está fundamentado MARS y sus posibles ventajas sobre otros modelos de caja negra como las redes neuronales artificiales, tales como su velocidad de estimación y su capacidad de seleccionar variables relevantes. No obstante, la experimentación realizada sobre cuatro series benchmark que ya han sido utilizadas en otras investigaciones para la comparación de modelos no lineales de pronóstico, revela que MARS tiene dificultades para capturar la dinámica de las series consideradas. En esta Sección se indaga sobre el por qué se da esta situación.

El particionamiento recursivo es un principio para la aproximación de funciones bastante diferente al utilizado por los MLP. Por ejemplo, el MLP de la Tabla 4 podría representarse matemáticamente como:

Tabla 4.
Estadísticos de ajusta para la serie INTERNET.

Modelo	Rezagos	Entrenamiento MSE (MAD)	Predicción MSE (MAD)
ARIMA [5]	1-4	9,76 (2,42)	8,11 (2,23)
MLP [5]	1-4	7,00 (2,10)	9,25 (2,25)
DAN2-1 [5]	1-3	* 1,81 (0,92)	4,15 (1,58)
DAN2-2 [5]	1-4	2,78 (1,18)	* 3,87 (1,66)
SVM [8]	1-4	9,30 (2,50)	16,58 (3,44)
MARS	1, 2	10,25 (2,64)	22,41 (3,97)

* MSE más bajo por columna.

$$y_t = g \left[\eta + \sum_{h=1}^H \beta_h \times g \left(\kappa_h + \sum_{p=1}^P (\omega_{p,h} \times y_{t-p}) \right) \right]$$

donde $P = 4$; $\Omega = \{\eta, \beta_h, \kappa_h, \omega_{p,h}\}$, con $h = 1, \dots, H$ y $p = 1, \dots, P$, son los parámetros del modelo; H es la cantidad de neuronas en la capa oculta; y $g()$ es la función de activación de las neuronas. En este caso, la entrada neta a la h -ésima neurona de la capa oculta:

$$\kappa_h + \sum_{p=1}^P (\omega_{p,h} \times y_{t-p})$$

es un modelo autorregresivo de orden P . Así, un MLP puede definirse como la combinación no lineal de tantos modelos autorregresivos como neuronas tenga la capa oculta. Nótese, que un modelo autorregresivo es la combinación lineal de todos los rezagos considerados en el modelo. La ecuación equivalente de MARS es claramente diferente; véase la ecuación de la Tabla 5 para la serie INTERNET.

Una explicación sobre el desempeño de MARS se basa en la forma a que se llega a dicha ecuación. Cuando no hay variables explicativas (rezagos en el caso de series de

tiempo), MARS se reduce a una constante puesto que no hay regiones definidas:

$$f(\mathbf{x}) = a_0$$

Para que una variable explicativa sea incorporada al modelo, ella debe ser seleccionada durante el particionamiento recursivo, de manera que debe entrar en la forma del término:

$$\max \{0; \pm (y_{t-p} - c)\}$$

el cual hace parte de una función base B_j . Así, el algoritmo de especificación no permite que se considere la variable explicativa, sin que su dominio sea dividido un término. Pareciera entonces, que MARS sufre de dificultades para aproximar modelos autorregresivos.

Por otra parte, una SVM representa la dinámica de una serie de tiempo como:

$$y_t = b + \sum_{d=1}^D w_d \times K(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_d)$$

Tabla 5.
Modelos obtenidos para las series analizadas usando MARS

Serie PAPER

$$\begin{aligned} B_1 &= \max \{0; y_{t-12} - 708,326\} \\ B_2 &= \max \{0; 708,326 - y_{t-12}\} \\ y_t &= 756,879 + 0,647 B_2 - 1,056 B_1 \end{aligned}$$

Serie POULLUTION

$$\begin{aligned} B_1 &= \max \{0; y_{t-3} - 5,694\} \\ B_2 &= \max \{0; 6,035 - y_{t-12}\} \\ B_3 &= \max \{0; y_{t-1} - 5,908\} \\ y_t &= 6,011 + 0,551 B_1 - 0,516 B_2 + 0,327 B_3 \end{aligned}$$

Serie LYNX

$$\begin{aligned} B_1 &= \max \{0; 3,116 - y_{t-1}\} \\ B_2 &= \max \{0; y_{t-2} - 2,835\} \\ B_3 &= \max \{0; y_{t-12} - 2,389\} \\ B_4 &= \max \{0; y_{t-3} - 3,264\} \\ B_5 &= \max \{0; y_{t-1} - 3,224\} \\ B_6 &= \max \{0; y_{t-3} - 2,389\} \\ B_7 &= \max \{0; y_{t-5} - 3,264\} \\ B_8 &= \max \{0; y_{t-5} - 3,340\} \\ y_t &= 3,317 - 0,923 B_1 - 0,907 B_2 + 0,215 B_3 + 0,812 B_4 + 1,879 B_5 \\ &\quad - 0,317 B_6 - 1,961 B_7 + 2,805 B_8 \end{aligned}$$

Serie INTERNET

$$\begin{aligned} B_1 &= \max \{0; y_{t-1} - 99,0\} \\ B_2 &= \max \{0; 99,0 - y_{t-1}\} \\ B_3 &= \max \{0; y_{t-2} - 132,0\} \\ B_4 &= \max \{0; 132,0 - y_{t-2}\} \\ y_t &= 74,657 + 1,759 B_1 - 1,785 B_2 - 0,826 B_3 + 0,775 B_4 \end{aligned}$$

donde: b es una constante, w_d son los factores de ponderación de la función de núcleo $K(\cdot, \cdot)$, definida como:

$$K(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_d) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x}_t - \mathbf{x}_d\|^2}{\sigma^2}\right)$$

En la ecuación anterior $\mathbf{x}_t = [y_{t-1}, \dots, y_{t-p}]$, mientras que \mathbf{x}_d representa un subconjunto de los regresores de la muestra de entrenamiento; véase [8]. En este caso, el modelo matemático que representa un SVM también difiere tanto de MARS como de los MLP. En este sentido, no puede considerarse como la transformación no lineal de un modelo autorregresivo, lo que explica, al menos en parte, su bajo desempeño en el pronóstico.

5 Conclusiones

Uno de los principales problemas en el pronóstico de series de tiempo usando redes neuronales artificiales, es que su proceso de especificación está basado primordialmente en criterios heurísticos y juicio experto. Esto hace el proceso subjetivo quitando, en alguna medida, credibilidad a los resultados obtenidos. En este contexto, el uso de modelos alternativos a las redes neuronales artificiales que se basen en criterios objetivos y bien estructurados gana mucha importancia.

MARS es un modelo no paramétrico y no lineal de regresión cuya especificación está basada en criterios estadísticos bien establecidos que permiten seleccionar los regresores relevantes y la complejidad óptima del modelo, y cuyos parámetros óptimos pueden ser calculados rápidamente.

En este trabajo se explora la capacidad de MARS en el pronóstico de cuatro series de tiempo no lineales, que ya han sido utilizadas en la literatura para la comparación de modelos estadísticos y redes neuronales artificiales.

El desempeño de MARS para su ajuste a la muestra de calibración, así como de su precisión en el pronóstico, fue pobre en comparación con los demás modelos considerados (modelos ARIMA, perceptrones multicapa, máquinas de vectores de soporte y DAN2). Posiblemente, la razón de este comportamiento está relacionada con el algoritmo de especificación del modelo. Es así como MARS selecciona sólo un subconjunto de los retardos utilizados en otros estudios, y, consecuentemente, pierde poder explicativo. Adicionalmente, la estructura matemática del modelo final obtenido usando el algoritmo empleado por MARS difiere de la obtenida utilizando los modelos ARIMA y varios tipos de redes neuronales artificiales; consecuentemente, este aspecto también impacta el desempeño del modelo.

Como trabajo futuro, se plantea la posibilidad de adicionar una estructura autorregresiva lineal en la que se consideren todos los rezagos de la serie, más la sumatoria de las funciones base. Otra posibilidad consiste en considerar una estructura más compleja para los factores con que se construyen las funciones base, tal que se use una combinación de regresores, en vez de usar solamente una variable explicativa.

Referencias

- [1] Kasabov. N. Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. Massachusetts Institute of Technology. 1998.
- [2] Tong, H., Non-linear time series a dynamical system approach. Clarendon Press Oxford. 1990.
- [3] Zhang, G., Patuwo, E.B. and Hu, M.Y., Forecasting with artificial neural networks: the state of the art. International Journal of Forecasting, 14 (1), pp. 35-62, 1998.
- [4] Faraway, J. and Chatfield, C., Time series forecasting with neural networks: A comparative study using the Airline data. Applied Statistics, 47 (2), pp. 231–250, 1998.
- [5] Ghiassi, M., Saidane, H. and Zimbra, D.K., A dynamic artificial neural network model for forecasting time series events. International Journal of Forecasting, 21 (2), pp. 341-362, 2005.
- [6] Velásquez, J.D., Pronóstico de la Serie de Mackey-Glass usando modelos de Regresión no Lineal. Dyna: 71 (142), pp. 85-95, 2004.
- [7] Zhang, G., Time Series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. Neurocomputing: 50, pp. 159–175, 2003.
- [8] Velásquez, J.D., Olaya, Y. y Franco, C.J., Predicción de series temporales usando máquinas de vectores de soporte. Ingeniare, 18 (1), pp. 64–75, 2010.
- [9] Cybenko, G., Approximation by superpositions of a sigmoidal function. Mathematics of Control: Signals and Systems, 2, pp. 202–314, 1989.
- [10] Hornik, K., Stinchcombe, M. and White, H., Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, 2, pp. 359–366, 1989.
- [11] Funahashi, K., On the approximate realization of continuous mappings by neural networks. Neural Networks: 2, pp. 183–192, 1989.
- [12] Masters, T., Practical Neural Network Recipes in C++. Academic Press, New York, 1993.
- [13] Masters, T., Neural, Novel and Hybrid Algorithms for Time Series Prediction. John Wiley and Sons, Inc. First Edn. 1995.
- [14] Kaastra, I. and Boyd, M., Designing a neural network for forecasting financial and economic series. Neurocomputing, 10, pp. 215–236, 1996.
- [15] Anders, U. and Korn, O., Model selection in neural networks. Neural Networks, 12, pp. 309–323, 1999.
- [16] Vapnik, V.N., The Nature of Statistical Learning Theory. Springer, N.Y. 1995.
- [17] Vapnik, V.N., Golowich, S.E. and Smola, A.J., Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. Advances in Neural Information Processing Systems, 9, pp. 281-287, 1996.
- [18] Velásquez, J.D., Franco, C.J. y Olaya, Y., Predicción de los precios promedios mensuales de contratos despachados en el mercado mayorista de electricidad en Colombia usando máquinas de vectores de soporte. Cuadernos de Administración, 23 (40), pp. 321–337, 2010.
- [19] Friedman, J.H., Multivariate adaptive regression splines (with discussion). Annals of Statistics, 19, pp. 1–141, 1991.
- [20] Friedman, J.H. Fast MARS. Dept. of Statistics, Stanford University Technical Report. 1993.
- [21] Friedman, J.H. and Roosen, C.B., An introduction to multivariate adaptive regression splines. Statistical Methods in Medical Research, 4(3), pp. 197-217, 1995.
- [22] Chou, S.M., Lee, T.S. and Shao, Y.E., Mining the breast cancer pattern using artificial neural networks and multivariate adaptive regression splines. Expert Systems with Applications, 27 (1), pp. 133–142, 2004.
- [23] De Veaux, R.D., Psichogios, D.C. and Ungar, L.H., A comparison of two nonparametric estimation schemes: MARS and neural networks. Computers & Chemical Engineering, 17 (8), pp. 819–837, 1993.

- [24] Tian-Shyug, L., Chih-Chou, C., Yu-Chao, C. and Chi-Jie, L., Mining the customer credit using classification and regression tree and multivariate adaptive regression splines. *Computational Statistics & Data Analysis*, 50 (4), pp. 1113–1130, 2006.
- [25] Deichmann, J., Eshghi, A., Haughton, D., Sayek, S. and Teebagy, N., Application of multiple adaptive regression splines (MARS) in direct response modeling. *Journal of Interactive Marketing*, 16 (4), pp. 15-27, 2002.
- [26] Lewis, P.A.W. and Stevens, J.G., Nonlinear Modeling of Time Series Using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS). *Journal of the American Statistical Association*, 86 (416), pp. 864–877, 1991.
- [27] Tong, H., Threshold models in non-linear time series analysis. Heidelberg: Sprenger-Verlag. 1983.
- [28] De Gooijer, J.G., Ray, B.K. and Kräger, H., Forecasting exchange rates using TSMARS. *Journal of International Money and Finance*, 17 (3), pp. 513–534, 1998.
- [29] Coulibaly, P. and Baldwin, C.K., Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. *Journal of Hydrology*, 307 (1-4), pp. 164-174, 2005.
- [30] Heather, M.A. and Ramsey, J.B. U.S. and Canadian industrial production indices as coupled oscillators. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 26 (1), pp. 33–67, 2002.
- [31] Lu, C.-J., Chang, C.-H., Chen, C.-Y., Chiu, C.-C., Lee, T.-S., Stock index prediction: A comparison of MARS, BPN and SVR in an emerging market. *IEEM 2009 - IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 5373010, pp. 2343-2347. 2009.
- [32] Herrera, M., Torgo, L., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Predictive models for forecasting hourly urban water demand. *Journal of Hydrology*, 387 (1-2), pp. 141-150, 2010.
- [33] Fidalgo, J.N., Matos, M.A., Forecasting Portugal global load with artificial neural networks. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 4669 LNCS (PART 2), pp. 728-737, 2007.
- [34] Coulibaly, P., Baldwin, C.K., Nonstationary hydrological time series forecasting using nonlinear dynamic methods. *Journal of Hydrology*, 307 (1-4), pp. 164-174 2005.
- [35] Makridakis, S.G., Wheelwright, S.C. and Hyndman, R.J., *Forecasting: Methods and applications*. 3rd edition. New York. John Wiley & Sons, 1998.

J. D. Velásquez-Henao, received the Bs. Eng in Civil Engineering in 1994, the MS degree in Systems Engineering in 1997, and the PhD degree in Energy Systems in 2009, all of them from the Universidad Nacional de Colombia. Medellin, Colombia. From 1994 to 1999, he worked for electricity utilities and consulting companies within the power sector and since 2000 for the Universidad Nacional de Colombia. Currently, he is a Full Professor in the Computing and Decision Sciences Department, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. His research interests include: simulation, modeling and forecasting in energy markets; nonlinear time-series analysis and forecasting using statistical and computational intelligence techniques; and optimization using metaheuristics.
<http://orcid.org/0000-0003-3043-3037>

Carlos J. Franco is a Full Professor in the Department of Computer and Decision Sciences at the National University of Colombia in the Medellin campus. Carlos is professor in subjects such as complex systems, system modeling and energy markets. His research area is on energy systems analysis, including policies evaluation and strategies formulation. His recent work includes low carbon economies, demand response, electric markets integration and bio-fuels, among others. He has a degree in Civil Engineering, a Master Degree in Water Resources Management, and a PhD in Engineering, all from the National University of Colombia.

Valorization of residues from refining of used vegetable oils

Valorización de los residuos generados en el procesado de aceites vegetales usados

Dolores Hidalgo-Barrio ^a, Marta Gómez-Rincon ^b, Alicia Aguado-Pesquera ^c, Jesús María Martín-Marroquín ^d
& Emilia Sastre-García ^e

^a PhD, Áreas de Medio Ambiente y Biocombustibles, CARTIF Centro Tecnológico, ITAP Universidad de Valladolid. España, dolhid@cartif.es

^b MSc, Área de Medio Ambiente, CARTIF Centro Tecnológico. España, margom@cartif.es

^c Ing, Área de Medio Ambiente, CARTIF Centro Tecnológico, ITAP Universidad de Valladolid. España, aliagu@cartif.es

^d MSc, Áreas de Procesos Químicos y Seguridad, CARTIF Centro Tecnológico, ITAP Universidad de Valladolid. España, jesmar@cartif.es

^e Ing, Área de Medio Ambiente, CARTIF Centro Tecnológico. España, emisas@cartif.es

Received: August 2th, of 2013. Received in revised form: December 20th, 2013. Accepted: January 5th, 2014.

Abstract

This study investigates the advantages of two-phase anaerobic digestion for treating a mixture (1/5 v/v) of used vegetable oils processing wastes and pig manure using two semi-continuous digesters operated at mesophilic temperature (37±1 °C). The experiments were conducted at hydraulic retention times (HRT) of 0.5, 1, 2 and 4 days in the first stage (acidifier) and at HRT of 11.5, 15, 18 and 20 days in the second stage (methanizer). The results revealed that the HRT had a high influence on the soluble chemical oxygen demand (CODs) and total dissolved solids (TDS) removal. The maximum total CODs removal efficiency of 86.4% and TDS removal efficiency of 81.9% was achieved at 20 days of global HRT. The maximum biogas production of 0.65 m³ per kilogramme of volatile dissolved solids (VDS) removed (65% CH₄) was also achieved at 20 days of HRT.

Keywords: Hydraulic retention time, oily wastes, two-phase anaerobic reactor, waste vegetable oil.

Resumen

Se han investigado las ventajas de un sistema de digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de una mezcla de los residuos oleosos (RO) generados en el procesado de aceites vegetales usados y purín porcino (PP), 1/5 v/v, utilizando dos digestores semi-continuos operados a 37±1 °C. Los experimentos fueron llevados a cabo a tiempos hidráulicos de residencia (THR) de 0.5, 1, 2 y 4 días en la primera etapa (reactor acidogénico) y de 11.5, 15, 18 y 20 días en la segunda etapa (reactor metanogénico). Los resultados revelaron que el THR tiene una gran influencia en la eliminación de demanda química de oxígeno soluble (DQOs) y sólidos disueltos totales (SDT). La máxima eficiencia de eliminación de DQOs, SDT y producción máxima de biogás fueron de 86.4% y 81.9% y 0.65 m³ biogás por kilogramo de sólido disuelto volátil (SDV) eliminado (65% CH₄) respectivamente, conseguidas todas a un THR total de 20 días.

Palabras clave: Aceites vegetales usados, digestión anaerobia en dos fases, residuos lipídicos, tiempo hidráulico de residencia.

1. Introducción

Los aceites vegetales usados (AVU) son una prometedora alternativa al uso de aceites comestibles como producto de entrada a los sistemas de producción de biodiesel. La Unión Europea (UE) produce entre 700,000 y 1 millón de toneladas al año de AVU y la mayoría de ellas son dispuestas en el medio ambiente de forma inapropiada. Los AVU pueden provocar obstrucciones en tuberías y hacer que las plantas de tratamiento de aguas residuales funcionen con más dificultades. La UE apoya fuertemente la recuperación de AVU para la producción de biofuel dado que ello cuadra con su estrategia de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, reduciendo las emisiones efecto invernadero y la contaminación de los motores y siendo, al mismo tiempo, un modo de reducir la presencia de un

residuo que puede contaminar suelos y aguas.

Cuando los AVU son recogidos, sufren un pre-tratamiento para eliminar la humedad y las partículas voluminosas y, posteriormente, un proceso de refinado para eliminar los ácidos grasos libres y otros compuestos indeseables antes de su envío a las instalaciones de fabricación de biodiesel. Hoy en día, las crecientes cantidades de residuos generadas en este sector como consecuencia de los procesos de pre-tratamiento y refinado suponen un problema medioambiental acuciante. La gestión inadecuada y la disposición incontrolada de los mismos han afectado a la calidad de los ríos y suelos y han generado problemas sanitarios en algunas comunidades.

La digestión anaerobia de los residuos procedentes del proceso de pre-tratamiento y los sub-productos del proceso de refinado tiene el potencial de conseguir una reducción



eficiente de la contaminación al mismo tiempo que la ventaja de conservar la energía y proveer beneficios medioambientales y socio-económicos. Por otro lado, es bien conocido el hecho de que la digestión anaerobia de residuos ricos en aceites y grasas no siempre es sencilla, dado que los microorganismos anaerobios son muy sensibles a la materia rica en lípidos a la vez que a los compuestos intermediarios del proceso de degradación de los residuos grasos [1, 2, 3].

Los lípidos causan problemas operacionales en los digestores anaerobios debido a obstrucción de tuberías y pueden también provocar problemas de transferencia de materia para los sustratos solubles, dado que quedan adheridos a la superficie de la biomasa bacteriana. La flotación de la biomasa, debido a la adhesión de las grasas, puede causar también lavado de la biomasa activa [4]. Sin embargo los lípidos son sustratos atractivos para la digestión y co-digestión anaerobia debido al mayor rendimiento obtenido cuando se comparan con proteínas y carbohidratos. En este contexto los residuos ricos en lípidos pueden considerarse como una fuente potencial de energía renovable [5]. Ahring [6] describió un incremento significativo en el rendimiento de producción de metano (100%) cuando aceite de pescado era añadido a un digestor de purines. La práctica de añadir lípidos a un digestor para aumentar su producción de metano es, pues, un enfoque prometedor que debe ser explorado.

Digestores anaerobios en dos fases junto con co-digestión es la opción propuesta por numerosos autores para el tratamiento de corrientes conteniendo altas concentraciones de lípidos, como son los residuos de cocina [7, 8], residuos de industrias lácteas [9], efluentes de factorías de helados [10], residuos del procesado de pescado [11], residuos de matadero [12] o residuos de almazaras [13, 14]. Estos estudios han ilustrado las ventajas potenciales de la digestión en dos fases frente a los sistemas en una fase a la hora de tratar sustancias complejas, por ejemplo, menores tiempos de retención, mayor eficiencia de la conversión a metano y mayor concentración de metano en el biogás producido [15]. Además, este diseño permite la reducción del volumen total de reactor [16]. Por otro lado, la co-digestión alivia el efecto inhibidor producido por altas concentraciones de aceites y grasas [8].

Los sistemas de digestión anaerobia en dos fases permiten la selección y enriquecimiento de diferentes tipos de bacteria en cada reactor; en la primera fase, los contaminantes complejos son degradados por las bacterias acidogénicas a ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales son subsecuentemente convertidos a metano y dióxido de carbono por las bacterias acetogénicas y metanogénicas en la segunda fase. Esta configuración también incrementa la estabilidad de los procesos mediante el control de la fase de acidificación con objeto de prevenir sobrecargas y la producción de compuestos tóxicos [16]. Por otro lado, la primera etapa puede actuar como un buffer metabólico evitando golpes de pH a la producción metanogénica; además, bajos valores de pH, altas velocidades de carga

orgánica y tiempos hidráulicos de residencia (THR) cortos son todos factores que favorecen el establecimiento de la fase metanogénica, y son el preámbulo del establecimiento de los metanógenos. Con residuos que contienen altas concentraciones de lípidos, la primera fase sirve principalmente para eliminar sólidos, consiguiendo una operación más estable en el reactor [17].

Los microorganismos acidogénicos y metanogénicos difieren, no solo en términos de sus requerimientos nutricionales y de pH, sino también con respecto a su fisiología, cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes y en su particular capacidad de soportar cambios medioambientales. Consecuentemente, las condiciones que son favorables para el crecimiento de las bacterias formadoras de ácidos (cortos THR, bajo pH) pueden ser inhibidoras de las bacterias formadoras de metano. Una ventaja añadida del digestor en dos fases es que sus condiciones operacionales pueden ser selectivamente determinadas en orden a maximizar el crecimiento, no solo de las bacterias precursoras de ácidos, sino también el de las precursoras de metano.

Por ello, teniendo en cuenta las ventajas potenciales de la digestión anaerobia en dos fases y continuando con la investigación en mejorar la co-digestión anaerobia de diferentes residuos, el objetivo del presente trabajo ha sido evaluar el desarrollo de un sistema anaerobio de co-digestión en dos fases para el tratamiento de residuos y subproductos procedentes del procesado de AVU con purín porcino en un reactor secuencial semi-continuo operado en el rango mesofílico de temperatura. Este documento discute una investigación a escala piloto con el énfasis puesto en la evaluación de los valores óptimos de producción de biogás y eliminación de materia orgánica de los residuos bajo diferentes THR.

2. Materiales y métodos

2.1. Análisis de los residuos

La concentración de sólidos totales y volátiles (ST, SV), sólidos disueltos totales y volátiles (SDT, SDV), demanda química de oxígeno total y soluble (DQO, DQOs), contenido en grasa, alcalinidad, fósforo y pH fueron determinados siguiendo las recomendaciones de Métodos Estándar [18]. La concentración de ácidos grasos (AG) fue determinada utilizando un cromatógrafo de gases (Agilent) equipado con detector de ionización de llama (FID). El contenido en C, N, H y S fue determinado mediante análisis elemental con un equipo LECO Truspec CHN(S) siguiendo la norma UNE-CEN/TS 15104 EX. El contenido en oxígeno no fue medido directamente sino estimado asumiendo que no había más elementos presentes en los residuos aparte de los analizados (C, H, N, S y P).

2.2. Test de potencial metanogénico (TPM)

Con objeto de estudiar la biodegradabilidad y potencial metanogénico de diferentes mezclas RO/PP se llevaron a

cabó una serie de ensayos en batch en reactores de 2,000 mL de volumen total y 600 mL de volumen efectivo. Todos los experimentos se llevaron a cabo en una cámara termostatada a 37 ± 1 °C, con agitación continua en una mesa agitadora. Como inóculo para los test se empleó fango anaerobio procedente de una estación depuradora de aguas residuales urbanas con una concentración de 12 ± 1 gSV L⁻¹. La concentración del inóculo en todos los test fue de 6.5 g L⁻¹ y el pH fue de 7.5. En este estudio se seleccionaron cuatro mezclas RO/PP con proporción de ambos sustratos 1/0, 1/1, 1/3 y 1/5 en volumen. Todos los ensayos fueron llevados a cabo por triplicado. La relación sustrato/inóculo (S/X) se mantuvo para todas las muestras en el rango de 0.40 a 0.60 gSVsustrato gSV⁻¹inóculo.

Un set de ensayos en blanco (sin sustrato, solo inóculo) fue también realizado por triplicado para determinar la producción metanogénica endógena. Para evitar la acidificación del ensayo se añadió NaHCO₃ como buffer (6 gNaHCO₃ L⁻¹). Los experimentos se finalizaban cuando la velocidad de producción de biogás en los ensayos con sustrato decrecía hasta los niveles del blanco.

La producción de biogás fue medida manualmente mediante un transmisor de presión (Druck, PTX 1400, rango 1 bar) conectado al espacio libre en la cabeza de cada reactor. Para evitar alcanzar sobrepresión, el biogás generado era liberado periódicamente. Las diferencias de presión eran convertidas a volumen de biogás utilizando la Ley de gases ideales y condiciones de presión y temperatura estándar (P = 1 bar y T = 0 °C). La composición del biogás fue medida de forma previa a cada liberación mediante un equipo Varian CP-4900 Micro-GC con detector térmico de conductividad. La producción neta de metano fue calculada restando la cantidad de metano producido en el ensayo en blanco del producido en cada ensayo con sustrato.

2.3. Instalación experimental

Con objeto de estudiar las características operacionales y el comportamiento de la digestión anaerobia en dos fases cuando se trata una mezcla de RO y PP se construyó la planta piloto cuyo esquema se muestra en la Figura 1. El sistema se compone de una unidad de trituración, un tanque de homogeneización (0.5 m³), un reactor de acidificación con agitación de velocidad variable (RA, 450 mm diámetro interno y 700 mm altura, fabricado en acero inoxidable con un volumen de trabajo de 0.1 m³), un reactor de metanogénesis también dotado de agitación con velocidad variable (RM, 800 mm diámetro interno y 1,200 mm altura, fabricado en acero inoxidable con un volumen de trabajo de 0.5 m³) y un tanque para el efluente digerido. Los reactores acidogénico y metanogénico fueron construidos con una relación de volúmenes 1:5 para mantener menores THR en el reactor metanogénico.

Los materiales de entrada eran pretratados en el triturador, bombeados al reactor de acidificación y de ahí bombeados al reactor metanogénico. Sendos termómetros y pH-metros fueron instalados en los reactores de acidogénesis y metanogénesis. Un sistema de presión fue

instalado en la línea del biogás para monitorear la presión en cabeza de ambos reactores. El biogás generado en ambos equipos fue medido mediante sendos gasómetros. El exterior de ambos reactores se recubrió de una capa de espuma de poliuretano de 5 mm de espesor para aislarlos térmicamente y la temperatura fue mantenida a 37 ± 1 °C mediante resistencias eléctricas encamisadas. Varios puertos fueron instalados en las paredes del sistema de fermentación para toma de muestras.

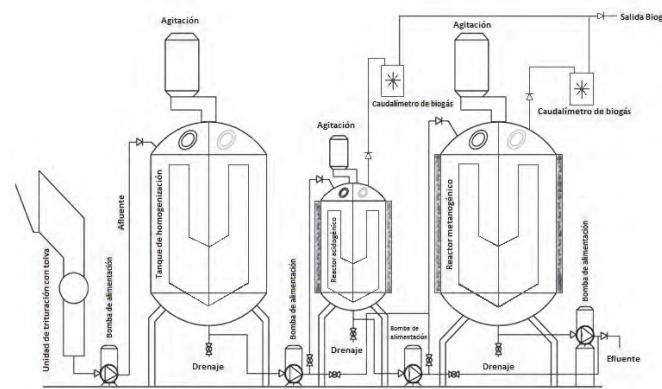


Figura 1. Instalación experimental

3. Resultados

3.1. Composición del residuo

Parámetros como pH, alcalinidad, ST, SV y DQO son los más frecuentemente analizados dado que suministran información clave para optimizar los sistemas de tratamiento. Además, el análisis de composición elemental provee información sobre el potencial metanogénico teórico (B_{0,th}) de un residuo dado utilizando la ecuación de Buswell (1). Esta ecuación asume la producción de metano a partir de la degradación completa de un residuo con una composición elemental dada, donde C_nH_aO_bN_c representa la fórmula química del compuesto orgánico biodegradable sujeto al proceso de degradación anaerobia, por lo que la producción de metano considerado es la máxima estequiométricamente posible. Para un compuesto C_nH_aO_bN_c el potencial metanogénico teórico (en condiciones estándar de presión y temperatura) es, según Buswell:

$$B_{0,th} = \frac{\left(\frac{n}{2} + \frac{a}{8} - \frac{b}{4} - \frac{3c}{8} \right) \cdot 22.4}{12n + a + 16b + 14c} \equiv \frac{L CH_4}{g VS} \quad (1)$$

Donde los parámetros n, a, b, c hacen referencia al índice estequiométrico del C, H, O y N respectivamente. Las Tablas 1, 2 y 3 recogen los resultados obtenidos de la caracterización de los residuos seleccionados y sus mezclas.

Tabla 1
Caracterización de los residuos

Residuo	Párametros físico-químicos				
	pH	ST g·L ⁻¹	SV g·L ⁻¹	SV/ST	Grasa %
RO	6.5	391.4	374.1	0.95	49.6
PP	7.7	44.9	30.7	0.68	-
Mezcla 1/1	7.0	225.5	212.4	0.94	24.8
Mezcla 1/3	7.1	141.5	116.6	0.82	12.4
Mezcla 1/5	7.2	115.6	99.0	0.86	8.3

Tabla 2
Ácidos grasos en RO

FA	%
Ác. Aráquido	0.45
Ác. Behénico	0.77
Ác. Cáprico	0.01
Ác. Caprílico	0.05
Ác. Cerótico	0.01
Ác. Esteárico	5.92
Ác. Eicosanoico	0.01
Ác. Lignocérico	0.25
Ác. Linoleico	31.76
Ác. Linoleaídico	0.09
Ác. Margárico	0.11
Ác. Mirístico	0.46
Ác. Oleico	45.65
Ác. Palmítico	13.84

Tabla 3
Composición elemental del residuo

Residuo	%C	%H	%N	%P	%S	%Cenizas
RO	64.13	9.6	1.2	0.2	0.1	4.2
PP	34.5	4.7	2.8	0.4	0.7	31.6
Mezcla 1/1	50.3	7.1	1.8	0.3	0.4	18.1
Mezcla 1/3	42.09	5.8	2.3	0.4	0.6	24.8
Mezcla 1/5	40.4	5.7	2.5	0.4	0.6	26.0

Residuo	%O ^b	B _{0,th} ^c (mLCH ₄ ·gSV ⁻¹)
RO	20.6	824
PP	25.3	516
Mezcla 1/1	22.0	670
Mezcla 1/3	24.1	603
Mezcla 1/5	24.4	577

^a % en base peso de materia seca.

^b %O estimado.

^c Potencial de metano teórico calculado asumiendo una composición C_aH_bO_cN_d (S y P despreciable)

Palmítico, linoleico y oleico son los ácidos grasos volátiles de cadena larga (AGVCL) más abundantes en las muestras analizadas de RO. Las concentraciones presentes de otros ácidos son mucho menores. Lalman y Bagley [19] demostraron que el ácido palmítico es el principal producto generado en la degradación anaerobia de los ácidos oleico y linoleico, por lo que su presencia es esperada tanto en los experimentos en batch como en el reactor piloto.

Trabajos previos de otros autores [13] en digestión anaerobia de residuos oleosos han demostrado que la inhibición en la producción de metano es principalmente causada por una alta presencia de lípidos, por lo que la codigestión de estos residuos con otros no grasos (como el purín porcino) es un factor clave para prevenir la inhibición de la

metanogénesis al disminuir así la concentración de lípidos presentes en el medio.

3.2. Potencial metanogénico específico

La Figura 2 muestra la producción específica de metano acumulado en las diferentes mezclas ensayadas. Todos los ensayos de biodegradabilidad fueron llevados a cabo por triplicado y la desviación máxima observada fue de ± 15 mLCH₄ gSV⁻¹ para cada set de ensayos.

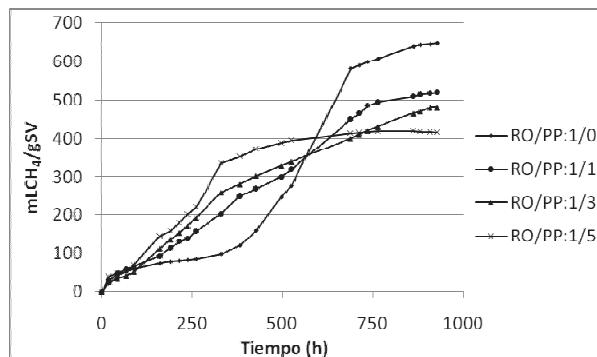


Figura 2. Curvas de producción específica de metano acumulado a diferentes ratios RO/PP

El patrón observado de producción de metano fue similar a los obtenidos por Circe et al. [4] en ensayos de degradación en batch de residuos ricos en lípidos. La fase latente inicial sin producción de metano que aparece en todos los test puede ser atribuida a la rápida generación de ácidos grasos, como proponen Salminen et al. [20]. La producción máxima de metano observada fue similar en todos los test donde el sustrato era una mezcla de RO y PP (en mLCH₄ L⁻¹ h⁻¹: 3.3, 3.4 y 5.9 para ratios RO/PP de 1/1, 1/3 and 1/5, respectivamente) pero una fuerte inhibición fue observada para el test donde el sustrato era únicamente RO. En este caso, el periodo de latencia inicial se extendió 400 horas, pero el proceso se recuperó finalmente. Este fenómeno coincide con lo propuesto con Pereira et al. [21] que demostraron que la inhibición por acumulación de AGVCL era un fenómeno reversible más probablemente relacionado con limitaciones físicas del transporte que con funciones metabólicas.

Como era de esperar, las mezclas con mayor porcentaje de RO mostraban mayores potenciales específicos de metano. Esta tendencia está en consonancia con los resultados para B_{0,th} calculados con la ecuación de Buswell (Tabla 3), sin embargo, los valores experimentales son sensiblemente más bajos que los teóricos (en mLCH₄ gSV⁻¹: 648, 520, 480 y 415 para ratios RO/PP de 1/0, 1/1, 1/3 y 1/5, respectivamente). Esto puede significar que la conversión máxima teórica no ha sido alcanzada durante la experimentación pero también, (más probable) que con la ecuación de Buswell ni el uso del sustrato ni otras posibles rutas de conversión de la materia orgánica son tenidas en consideración para la producción de biomasa bacteriana. Además, es conocido que en presencia de donantes inorgánicos específicos (como nitrato, sulfato o sulfito) la producción de metano puede decrecer.

Pensando en la operación de una planta piloto anaerobia en dos fases, el escenario óptimo ensayado corresponde al ratio RO/PP: 1/5 donde un menor periodo de latencia hace posible operar con menores THR.

Durante los primeros días del ensayo el contenido en metano del biogás fue bajo, pero aumentó hasta alcanzar porcentajes de 70.6, 69.2, 69.1 y 69.5 para ratios RO/PP de 1/0, 1/1, 1/3 y 1/5, respectivamente. Un hecho observado en todas las mezclas fue que cuanto más baja era la proporción RO/PP en el ensayo en batch, más rápidamente aumentaba el contenido de metano en el biogás. La ruptura de los sustratos complejos tiene lugar durante estas primeras etapas, con la consecuente generación de compuestos ácidos y consumo del buffer (NaHCO_3), cambiando el balance $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_2$ y liberando CO_2 de la fase líquida a la fase gas. Por ello, un sustrato más fácilmente degradable producirá más CO_2 y, en consecuencia, un biogás con menor contenido en metano al principio del ensayo.

3.3. Comportamiento del reactor en dos fases

El fango utilizado como inóculo en los reactores piloto fue el mismo que el empleado en los test de biodegradabilidad ($12 \pm 1 \text{ gSV L}^{-1}$). Antes de cargar los reactores el fango fue lavado para eliminar impurezas.

El reactor acidogénico fue alimentado con la mezcla de residuos oleosos y purín porcino (después de un triturado previo) en una proporción óptima de 1/5 (RO/PP) y el pH fue controlado mediante la adición de H_2SO_4 operando en el rango 5.5-6.5. La salida del acidogénico (Ef-RA) era bombeada al reactor metanogénico. En esta etapa no fue precisa la adición de reactivos químicos para el control del pH. Por su parte, la salida del metanogénico (Ef-RM) era finalmente bombeada a un depósito de recogida del digestato.

Después de estabilizar el sistema y alcanzar condiciones estacionarias se llevaron a cabo diferentes experimentos. Cuando los biodigestores alcanzaron condiciones estacionarias, parámetros de operación como DQO, pH y eliminación de sólidos permanecían relativamente constantes (variaciones < 15%). Con objeto de alcanzar las condiciones de operación óptimas para la eliminación de DQOs y SDT, se llevó a cabo un experimento consistente en el establecimiento de cuatro periodos de operación consecutivos con disminución sucesiva del THR en los reactores acidogénico y metanogénico y, como consecuencia, del THR total. El sistema operó con los THR mostrados en la Tabla 4. El pH, la temperatura y la producción de biogás en ambos reactores fue monitoreada online utilizando un PLC.

Tabla 4.
THR experimentales

	THR-RA (d)	THR-RM (d)	THR total (d)
Run 1	4	20	24
Run 2	2	18	20
Run 3	1	15	16
Run 4	0,5	11,5	12

3.3.1. Eliminación de DQOs

Los resultados medios obtenidos durante el proceso de trabajo con diferentes THR se muestran en la Figura 3a. La concentración de DQOs en la alimentación varía de $17,500 \text{ mg L}^{-1}$ a $19,600 \text{ mg L}^{-1}$, para la salida del reactor acidogénico varía de $10,520 \text{ mg L}^{-1}$ a $13,500 \text{ mg L}^{-1}$ y para el reactor metanogénico varía de $2,550 \text{ mg L}^{-1}$ a $3,500 \text{ mg L}^{-1}$.

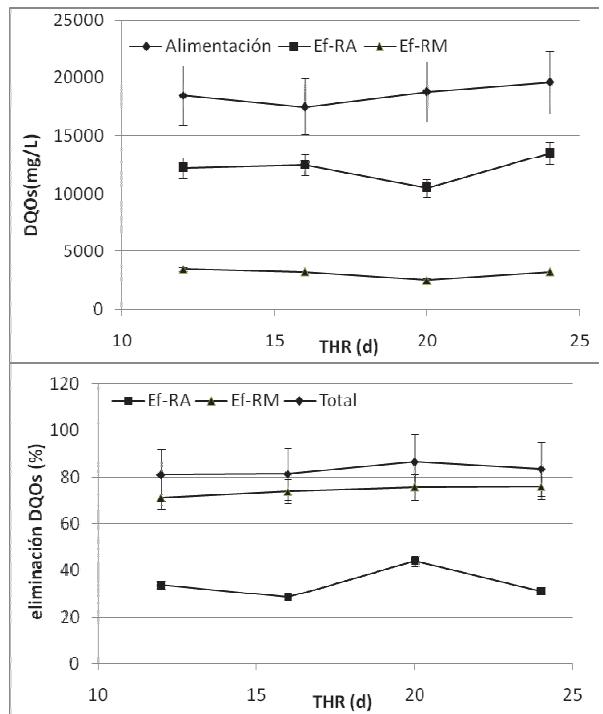
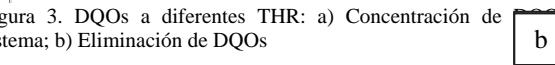


Figura 3. DQOs a diferentes THR: a) Concentración de DQOs en el sistema; b) Eliminación de DQOs



De la Figura 3b es evidente que la eficiencia de eliminación de DQOs se mueve en el rango de 31.1% a 44.0% en el reactor acidogénico y de 71.3% a 75.9% en el reactor metanogénico a los diferentes THR ensayados. La máxima eficiencia de eliminación de DQOs de 75.9% a 24 días de THR fue obtenida en el reactor metanogénico y 44.0% a 20 días de THR fue obtenida en el reactor metanogénico. La máxima eficiencia de eliminación de DQOs del sistema en su conjunto de 86.4% fue obtenida también con 20 días de THR. Los menores rendimientos obtenidos en la fase de acidogénesis son debidos al complejo estado en el que se encuentra la mezcla en esta fase, incluso después de su trituración, mientras que en la fase de metanogénesis el sustrato entra como compuestos simples de cadena corta después de haber sufrido las fases de hidrólisis y una pre-fermentación en el reactor acidogénico.

3.3.2. Eliminación de SDT

La concentración de SDT en la alimentación varía de $10,400 \text{ mg L}^{-1}$ a $11,800 \text{ mg L}^{-1}$, para la salida del reactor acidogénico varía de $9,150 \text{ mg L}^{-1}$ a $10,200 \text{ mg L}^{-1}$ y para el reactor metanogénico varía de $2,040 \text{ mg L}^{-1}$ a $2,800 \text{ mg L}^{-1}$. La Figura 4 muestra las eficiencias de eliminación de SDT

en los reactores acidogénico y metanogénico para diferentes valores de THR. Se observa que la eficiencia de eliminación de SDT en el reactor acidogénico es del orden de 8.2% a 18.9% para los diferentes THR, mientras que en el reactor metanogénico la eficiencia de eliminación de SDT varía de 69.9% a 77.7%. La máxima eficiencia de eliminación de SDT del sistema en su conjunto de 81.9% fue obtenida con 20 días de THR.

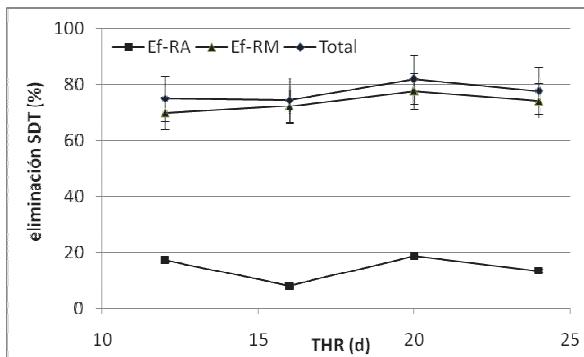


Figura 4. Eliminación de SDT a diferentes THR

3.3.3. pH, alcalinidad y concentración de AGVCL

Los cambios de pH sufridos por el efluente de los reactores en función del THR se muestran en la Figura 5. Es claro que el pH de la alimentación (tras acidificación con H_2SO_4) del efluente del reactor acidogénico y del efluente del reactor metanogénico se mueven en el rango de 5.42-5.86, 5.96-6.78 y 7.41-7.88, respectivamente. Los valores de alcalinidad para el reactor acidogénico varían de 320 mg L^{-1} a 360 mg L^{-1} , mientras que para el reactor metanogénico los valores de alcalinidad varían de 520 mg L^{-1} a 550 mg L^{-1} . En este estudio los valores de pH y alcalinidad se controlaron para asegurar la operación estable de los digestores.

En todos los ensayos realizados se observó acumulación de oleato y linoleato durante los primeros días de operación. Posteriormente se observó un decrecimiento en la concentración de estos ácidos, coincidiendo con una acumulación de palmitato, de acuerdo con lo observado por Cirne et al. [4]. Las concentraciones de otros AGVCL fueron siempre mucho menores.

Angelidaki et al. [22] informaron de inhibición por oleato para concentraciones de este compuesto superiores a 200 mg L^{-1} . Además, Salminen et al. [20] encontraron que altas concentraciones de palmitato resultaban inhibitorias durante la degradación de residuos sólidos de mataderos de aves. Sin embargo este no parece haber sido el caso en el presente estudio. No se ha observado inhibición de la actividad de las bacterias metanogénicas durante la experimentación, incluso trabajando a valores de pH en la entrada del reactor metanogénico inferiores a 6.

Beccari et al. [13] aplicaron un sistema de dos reactores con separación parcial de fases para el tratamiento de efluentes de almazaras e informaron que en la conversión entre ácido oleico y ácido palmítico, la saturación de oleico a esteárico era el paso limitante, mientras que el primer paso de la β -oxidación (esteárico a palmítico) ocurría rápidamente.

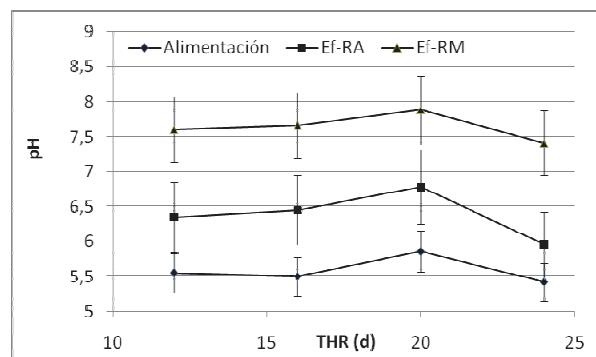


Figura 5. pH a diferentes THR

3.3.4. Biogás

La producción de biogás a diferentes tiempos hidráulicos de retención para el conjunto del sistema se muestra en la Figura 6. El contenido medio de metano en el biogás varió entre 63% y 65% durante la experimentación. La producción máxima de biogás de $0.65\text{ m}^3\text{ kgSDV}^{-1}$ eliminado (65% CH_4) fue alcanzada a 20 días de THR, mientras que se obtuvieron $0.645\text{ m}^3\text{ kgSDV}^{-1}$ eliminado para 24 días de THR, $0.594\text{ m}^3\text{ kgSDV}^{-1}$ eliminado para 12 días de THR y $0.545\text{ m}^3\text{ kgSDV}^{-1}$ eliminado para 16 días de THR. La producción de biogás está directamente relacionada con la estabilización de la DQOs, por ejemplo, sin producción de biogás ocurre una mínima eliminación de DQOs y SDV [23].

Se observa que, también aquí, los valores experimentales obtenidos son más bajos que los teóricos que se obtienen tras aplicar la ecuación de Buswell.

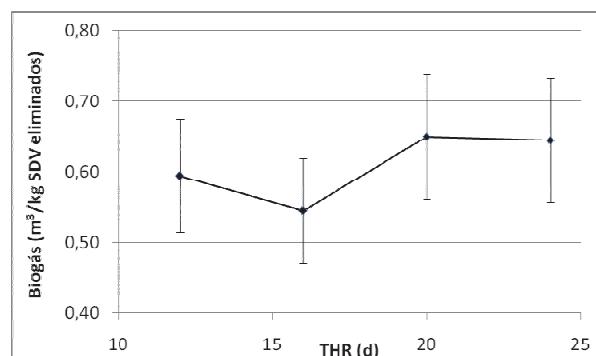


Figura 6. Producción de biogás a diferentes THR

4. Conclusiones

Un sistema de digestión anaerobia de dos fases fue empleado para tratar residuos grasos procedentes del procesado de AVU junto con purín porcino como co-sustrato (1/5 v/v) a diferentes THR (12, 16, 20 y 24 días). Los resultados experimentales indican que 20 días de THR es lo más adecuado para una correcta operación del sistema. La máxima eliminación de DQO conseguida en el reactor acidogénico y metanogénico fue 44.0% y 75.9%, respectivamente. La producción máxima de biogás fue $0.65\text{ m}^3\text{ kgSDV}^{-1}$ eliminado (65% CH_4) a 20 d de THR. El pH y la alcalinidad del efluente fueron estables también a 20 d de THR.

De los resultados obtenidos se deduce que el biodigestor en dos fases puede convertirse en una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de los residuos generados en el sector de gestión y tratamiento de los aceites vegetales usados.

Este estudio muestra que los residuos oleosos pueden ser tratados con éxito sin la adición de sustancias químicas (aparte del ácido sulfúrico para el control del pH) si son codigeridos con sustratos que contengan un alto nivel de nitrógeno amoniaco y alcalinidad que compensen la carencia de ambos en estos residuos.

A similares conclusiones llegaron previamente otros autores [22, 23, 24]. Además, la presente investigación ha demostrado que la digestión anaerobia en dos fases ofrece una alternativa atractiva a la digestión anaerobia convencional en una fase dadas sus múltiples ventajas coincidiendo con otros autores [9, 25, 26]. Primero, permite la selección y enriquecimiento de diferentes bacterias en cada fase. Segundo, incrementa la estabilidad del proceso controlando la fase de acidificación a través de la optimización de los THR para prevenir sobrecargas y la aparición y acumulación de compuestos tóxicos. También la concentración de biomasa y otras condiciones operacionales pueden ser optimizadas independientemente para cada etapa. Tercero, la primera fase protege a los metanógenos de elevadas producciones de ácidos grasos y de bajadas repentinas de pH. Por último, la digestión anaerobia en dos fases da mejores resultados en producción de metano y eliminación de DQO y sólidos que los sistemas convencionales en una fase [27, 28, 29, 30, 31]. Como conclusión la co-digestión en un sistema anaerobio en dos fases es un método prometedor para la recuperación de bioenergía de mezclas de RO y PP.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero realizado por el Programa LIFE+ a este trabajo a través del acuerdo LIFE 09 ENV/E/000451-proyecto VALUVOIL.

Referencias

- [1] Hidalgo, D., Sastre, E., Gómez, M. and Nieto, P., Evaluation of pre-treatment processes for increasing biodegradability of agro-food wastes, *Environ. Technol.*, 33(13), pp. 1497-1503, 2013.
- [2] Hong, V., Anaerobic digestion of oil-rich solid waste, *J. Biotechnol.*, 9(1), pp. 45-53, 2011.
- [3] Neves, L., Pereira, M., Mota, M., Alves, M., Detection and quantification of long chain fatty acids in liquid and solid samples and its relevance to understand anaerobic digestion of lipids, *Bioresour. Technol.*, 100(1), pp. 91-96, 2009.
- [4] Cirne, D., Paloumetm, X., Björnsson, L., Alves, M. and Mattiassona, B., Anaerobic digestion of lipid-rich waste - Effects of lipid concentration, *Renew. Energy*, 32, pp. 965-975, 2007.
- [5] Mobarak-Qamsari, E., Kasra-Kermanshahi, R., Nosrati, M. and Amani, T., Enzymatic Pre-Hydrolysis of high fat Content Dairy Wastewater as a Pretreatment for Anaerobic Digestion, *Int. J. Environ. Res.*, 6(2), pp. 475-480, 2011.
- [6] Ahring, B.K., Perspectives for anaerobic digestion, en Ahring B.K., (Ed.) *Biomethanation I. Advances in biochemical engineering/biotechnology*. Springer, Berlin, pp. 1-30, 2003.
- [7] Li, R., Chen, S. and LI, X., Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 160(2), pp. 643-654, 2010.
- [8] Yang, Y.Q., Shen, D.S., Li, N., Xu, D., Long, Y.Y., Lu, X.Y., Co-digestion of kitchen waste and fruit-vegetable waste by two-phase anaerobic digestion, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 20(4), pp. 2162-2167, 2013.
- [9] Demirer, G.N. and Chen, S., Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure, *Process Biochem.*, 40, pp. 3542-3549, 2005.
- [10] Borja, R. and Banks, C.J., Anaerobic digestion of ice-cream wastewater: A comparison of single and two phase reactor systems, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 54(3), pp. 466-471, 1995.
- [11] Guerrero, L., Omil, F., Mendez, R. and Lema, J.M., Anaerobic hydrolysis and acidogenesis of wastewaters from food industries with high content of organic solids and protein, *Water Res.*, 33(15), pp. 3281-3290, 1999.
- [12] Wang, Z. and Banks, C.J., Evaluation of a two-stage anaerobic digester for the treatment of mixed abattoir wastes, *Process Biochem.*, 38(9), pp. 1267-1273, 2003.
- [13] Beccari, M., Majone, M. and Torrisi, L., Two-reactor system with partial phase separation for anaerobic treatment of olive oil mill effluents, *Water Sci. Technol.*, 38(4-5), pp. 53-60, 1998.
- [14] Travieso, L., Dominguez, J.R., Rincón, B., Sánchez, E., Benítez, F., Borja, R., Raposo, F. and Colmenarejo, M.F., Batch culture growth of chlorella zofingiensis on effluent derived from two-stage anaerobic digestion of two-phase olive mill solid waste, *Electron J. Biotechnol.*, 11(2), pp. 1-8, 2008.
- [15] Yu, H.W., Samani, Z., Hanson, A. and Smith, G., Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion, *Waste Manag.*, 22, pp. 1-5, 2002.
- [16] Demirel, B. and Yenigün, O., Two-phase anaerobic digestion processes: a review, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 77(7), pp. 743-755, 2002.
- [17] Palenzuela, A., Anaerobic digestion of fish processing wastewater with special emphasis on hydrolysis of suspended solids. A.A. Balkema, The Netherlands, 1999.
- [18] American Public Health Association (APHA). Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th Edn. APHA, Washington DC, USA, 2005.
- [19] Lalman, J.A. and Bagley, D.M., Anaerobic degradation and methanogenic inhibitory effects of oleic stearic acids, *Water Res.*, 35(12), pp. 2975-2983, 2001.
- [20] Salminen, E., Rintala, J., Lokshina, L. and Vavilin V.A., Anaerobic batch degradation of solid poultry slaughterhouse waste, *Water Sci. Technol.*, 41, pp. 33-41, 2000.
- [21] Pereira, M.A., Pires, O.C., Mota, M. and Alves, M.M., Anaerobic biodegradation of oleic and palmitic acids: Evidence of mass transfer limitations caused by long chain fatty acid accumulation onto the anaerobic sludge, *Biotech. Bioeng.*, 92(1), pp. 15-23, 2005.
- [22] Angelidaki, I., Ahing, B.K., Deng, H. and Schmidt, J.E., Anaerobic digestion of olive mill effluents together with swine manure in USAB reactors, *Water Sci. Technol.*, 45(10), pp. 213-218, 2002.
- [23] Fezzani, B. and Cheikh, R.B., Anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste in a tubular digester at a mesophilic temperature, *Bioresour. Technol.*, 98, pp. 769-774, 2007.
- [24] Manyi-Loh, C.E., Mamphweli, S.N., Meyer, E.L., Okoh, A.I., Makaka, G. and Simon, M., Microbial anaerobic digestión (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control

- and the generation of renewable energy, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 10(9), pp. 4390-4417, 2013.
- [25] Senthilkumar, M., Gnanapragasam, G., Arutchelvan, V. and Nagarajan, S., Influence of hydraulic retention time in a two-phase upflow anaerobic sludge blanket reactor treating textile dyeing effluent using sago effluent as the co-substrate, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 18, pp. 649-654, 2001.
- [26] Bouallgui, H., Touhami, Y., Cheikh, R.B. and Hamdi, M., Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable, *Process Biochem.*, 40, pp. 989-995, 2005.
- [27] Göblös, S., Portörö, P., Bordás, D., Kálmán, M. and Kiss, I., Comparison of the effectivities of two-phase and single-phase anaerobic sequencing batch reactors during dairy wastewater treatment, *Renew. Energy*, 33(5), pp. 960-965, 2008.
- [28] Torrijos, M., Thalla, A.K., Sousbie, P., Bosque, F. and Delgene's, J.P. Anaerobic digestion of residues from production and refining of vegetable oils as an alternative to conventional solutions, *Water Sci. Technol.*, 58(9), pp. 1871-1878, 2008.
- [29] Wust, E., Single-phase and two-phase cheese wastewater treatment by anaerobic SBRs. PhD thesis, Civil, Construction and Environmental Engineering Department, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, 2003.
- [30] Rincón, A., García, F.A. y Tost, G.O., Análisis y control de un biorreactor anaerobio de lecho fijo de flujo ascendente, *DYNA Medellín*, 76(157), pp. 123, 2009.
- [31] Hidalgo, D., Martín-Marroquín, J., SASTRE, E. Single-phase and two-phase anaerobic co-digestion of residues from the treatment process of waste vegetable oil and pig manure, *Bioenergy Res.*, pp. 1-11, 2013.

Methodology for distribution centers location through multicriteria analysis and optimization

Metodología para localización de centros de distribución a través de análisis multicriterio y optimización

Diego Soto-de la Vega ^a, José Geraldo Vidal-Vieira ^b & Eli Angela Vitor-Toso ^c

^a MSc. en Ingeniería de Producción, Universidad Federal de São Carlos, Brasil, die-soto@hotmail.com

^b Dr. en Ingeniería de Producción, Profesor Universidad Federal de São Carlos, Brasil, jose-vidal@ufscar.br

^c Dr. en Ingeniería de Producción, Profesora Universidad Federal de São Carlos, Brasil, eli@ufscar.br

Received: August 27th, 2013. Received in revised form: October 28th, 2013. Accepted: November 22th, 2013

Abstract

This paper presents a combined methodology based on multicriteria decision analysis and optimization for the distribution centers location problem. The initial approach consists of a set of relevant quantitative and qualitative attributes used for the decision of locating distribution centers. From quantitative criteria a multi-objective mathematical programming model to minimize costs is proposed. This model provides alternative solutions that may be compared to the other ones initially known. These solutions are assessed for a multicriteria decision model which incorporates qualitative considerations of the problem that are infeasible to represent algebraically. Therefore, the application of the multi-criteria decision analysis model evaluates a set of feasible solutions to suggest for the best alternative considering several attributes.

keywords: Distribution centers location problem, Multicriteria Methodology, Optimization.

Resumen

Este trabajo presenta una metodología combinada de carácter multicriterio basada en análisis de decisión y optimización para el problema de localización de centros de distribución. La metodología consiste en definir un conjunto de atributos relevantes de carácter cuantitativo y cualitativo para la decisión de localizar centros de distribución. A partir de los criterios cuantitativos, un modelo de programación matemática multiobjetivo es propuesto para minimizar los costos asociados. Este modelo genera soluciones alternativas, que pueden ser comparadas con otras soluciones conocidas a priori. Las soluciones son evaluadas por un modelo de decisión multicriterio que incorpora consideraciones cualitativas al problema, que son inviables de representación algebraica. De esta forma, la aplicación del modelo de análisis de decisión multicriterio evalúa un conjunto de soluciones viables para escoger la mejor de las alternativas considerando diversos atributos.

Palabras Clave: Localización de centros de distribución, Metodología Multicriterio, Optimización.

1. Introducción

El problema de localización de instalaciones (Facility Location Problem - FLP) es un problema macro logístico que consiste en determinar el local adecuado para posicionar estratégicamente algunas facilidades, tales como: instalaciones industriales [1-3], centros de distribución [4], instalaciones de asistencia médica [5], instalaciones indeseables (Nimby) [6], entre otros. Para cualquier tipo de instalación a ser localizada, diferentes variables y objetivos deben ser considerados simultáneamente [7-10]. Particularmente, la localización de centros de distribución es un problema discreto que relaciona un conjunto de locales (alternativas) que deben ser evaluados contra un conjunto de criterios ponderados independientes uno del otro. La mejor alternativa para localización es aquella que obtiene mayor

valor considerando diversos criterios de acuerdo con las preferencias y prioridades de los tomadores de decisiones.

En general, la localización de Centros de Distribución (CD) es una decisión poco frecuente, pero que tiene gran impacto en el funcionamiento de toda la cadena de suministros y demanda especial atención de la alta gerencia. El carácter poco frecuente causa que muchos decisores no estén habituados a resolver este tipo de problema, que envuelve una gran complejidad y muchos factores que deben ser considerados simultáneamente en un horizonte de planeación a largo plazo [11].

Enfoques convencionales para localización incluyen heurísticas [4,12], programación entera mixta (MIP), programación dinámica, programación no lineal, programación cuadrática, proceso de análisis jerárquico (AHP) y técnicas de inteligencia artificial (AI), tales como



sistemas especialistas, redes neuronales artificiales (*RNA*), metaheurísticas o teoría de conjuntos *fuzzy* [13]. Esos enfoques implican un conjunto de pasos sistemáticos para resolver el problema, pero muchas veces no consideran las relaciones entre el costo y otros factores de interés. Además, algunos de esos enfoques no incorporan las preferencia y experiencia del analista (o decisor) que pueden influenciar significativamente la selección final del local.

En los trabajos actuales, la tendencia es considerar gran parte de la red de distribución logística incorporando los otros vértices del triángulo logístico (transporte e inventario), para proponer soluciones cada vez más compensatorias [14-17]. Además, nuevas preocupaciones como el nivel de servicio [11], confiabilidad y responsabilidad social [12,13] han sido incorporadas juntamente en modelos con consideraciones de naturaleza estocástica y dinámicas de la red [2,7].

Aunque diversos enfoques y métodos de solución hayan sido propuestos, existen pocos trabajos que incluyan la combinación de costos de la red logística y las preferencias del decisor que implican criterios cualitativos. Así, el objetivo de este trabajo es presentar una propuesta para tratar los problemas de localización de CD de forma amplia, que utilice la metodología multicriterio para incorporar cuestiones más extensas en la optimización y tratar factores difícilmente cuantificables.

2. Localización de CD

En general el problema de localización de CD aparece cuando nuevas instalaciones deben ser incluidas en una red logística ya existente. Para un dado problema, las nuevas instalaciones son frecuentemente idealizadas como puntos, y pueden ser localizadas en cualquier nodo de la red. Varias restricciones pueden ser establecidas sobre el problema para definir el conjunto de locales potenciales o factibles. Para problemas con una única función objetivo, normalmente se busca minimizar la suma de los costos de transporte proporcionales a las distancias entre las instalaciones, minimizar el máximo entre distancias, minimizar un número total de instalaciones o maximizar la cobertura [18].

Los CD hacen parte de redes logísticas donde existen diversas plantas que envían materiales y varios clientes que precisan ser atendidos. En este problema, se considera la existencia de diversos modos de transporte, además de considerar transporte con flota propia o subcontratada. Estas decisiones interfieren en los costos de toda la operación y deben ser consideradas en la planeación.

Cada local candidato tiene una limitación de capacidad cuyo nivel precisa ser definido por los decisores, o sea, es necesario definir si una instalación será abierta en un nodo candidato y determinar el nivel de capacidad con que será abierta. Esta decisión debe considerar los flujos de material en cada nodo, para que los clientes sean atendidos y sus respectivas capacidades sean respetadas. Este problema envuelve costos con diferente orden de grandeza, por ejemplo, costos fijos de apertura de nuevas instalaciones y costos operacionales de distribución. Además, el problema

involucra otros objetivos como la reducción de tiempos de entrega (*lead time*) en toda la operación de distribución.

La decisión de localización de CD envuelve otras cuestiones y objetivos que no son fácilmente cuantificables: la existencia de infraestructura y posibilidad de expansión en la red; la disponibilidad de mano de obra cualificada; incentivos fiscales y cargas tributarias que diferencian los nodos candidatos. El impacto ambiental de las operaciones en la red a lo largo del tiempo es también relevante. Considerando apenas una perspectiva de costo, una solución con menor número de CD de gran capacidad puede ofrecer un menor costo total, pero sin considerar que esta solución puede implicar mayor volumen y distancia de transporte, y consecuentemente mayor emisión de contaminantes.

3. Revisión de literatura

Para la solución de problemas de localización de instalaciones, se observa una tendencia al uso de enfoques pluralista de combinación de varios métodos integrados. Según un estudio realizado por Munro y Mingers [19] con respecto al uso de metodologías combinadas, las técnicas más utilizadas para tratar el problema son: *Soft System Methodology (SSM)*; evaluación de escenarios; diagrama de influencia; *Delphi*; análisis de decisión; y mapeo cognitivo. El método *AHP* [20] es el más conocido, utilizado para dar pesos a los atributos del problema, así como los métodos: *Fuzzy* [2,13], *SMART (Simple Multiattribute Rating Technique)* [21], *ELECTRE (Elimination and Choice Translating Reality)* [21] y *PROMETHEE*.

Al considerar criterios para evaluar localización de instalaciones, el más común es el costo. Pero, una gran variedad de criterios puede ser encontrada en la literatura. Farahani et al. [22] revisaron algunos de estos criterios, de los cuales los de mayor interés fueron: riesgos ambientales, accesibilidad, uso de recursos, costo, acceso a servicios públicos, factores políticos, económicos y reglamentos, competencia, población, capacidad, distancia y oportunidad, entre otros. Por otro lado, objetivos ambientales y sociales con base en costo de energía, congestionamiento, uso de la tierra, ruido, calidad de vida, polución y la crisis de los combustibles fósiles están tornándose cada vez más comunes [22]. En consecuencia, una dificultad importante para resolver esos problemas es encontrar una forma de medir esos criterios e incorporarlos en el modelo de decisión. Esto ha llamado la atención de administradores y académicos.

De las diversas metodologías existentes para solución del problema, la propuesta por Montibeller y Franco [23] es particularmente interesante. Esta metodología está basada en modelos de valor según las preferencias del decisor (Figura 1).

La Figura 1 muestra la metodología en etapas. Es posible en la etapa 4, considerar modelos matemáticos para tratar atributos cuantitativos y generar un conjunto de alternativas a ser evaluadas en relación a todos otros criterios.

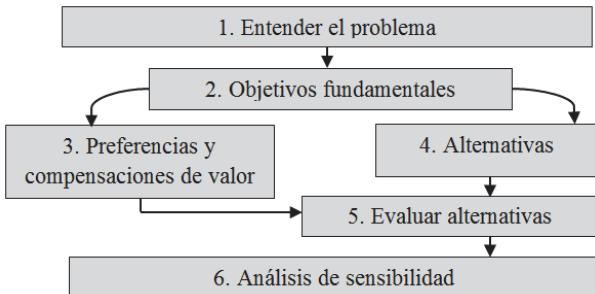


Figura 1. Estructura metodológica. Fuente: tomado de [23]

4. Enfoque propuesto

El enfoque propuesto en este trabajo consiste en la incorporación de un modelo matemático en la metodología multicriterio presentada por [23] para tratar el problema de localización de CD. El modelo matemático es formulado con varios objetivos y genera alternativas para la evaluación. Así, la metodología multicriterio para el problema tratado sigue la estructura presentada en la Figura 1 y cada una de las etapas es descrita detalladamente a continuación.

4.1. Descripción del problema

La etapa 1 consiste en definir el problema de localización de centros de distribución de acuerdo con los decisores. Los criterios para evaluación del problema son establecidos, las restricciones e suposiciones son establecidas. Esta etapa es realizada por medio de entrevistas con los decisores.

4.2. Determinación de los objetivos fundamentales

Los objetivos fundamentales (etapa 2) son definidos de acuerdo con la preferencia de los decisores. Estos objetivos representan los atributos o criterios del decisor que cuando agrupados de forma estructurada representan el árbol de decisión del problema.

Cada objetivo es una afirmación de lo que se desea alcanzar en el contexto de la decisión. Para hacer explícito el objetivo, es necesario describir sus tres componentes: contexto de la decisión, el objeto y la dirección de preferencia [24]. Así, los decisores aportan un conjunto preliminar de atributos de acuerdo con el valor (preferencia) y el objetivo de la decisión. Luego, la decisión debe ser basada en el “Pensamiento de Valor” y no en el “Pensamiento de las Alternativas” [25].

La recomendación a ser efectuada se basa en la función de valor global, representada en la ecuación (1) de [25]. La alternativa que presente mayor valor en esta función debe ser la recomendada.

$$V(a) = \sum_{i=1}^m k_i v_i(x_i(a_i)) \quad (1)$$

Donde, a representa la alternativa en evaluación, $V(a)$ es el valor global de la función de utilidad del decisor de la alternativa a ; i representa los atributos de medición de los

criterios del problema; $x_i(a_i)$ es el desempeño de la alternativa a en relación al atributo i ; $v_i(\cdot)$ es la función de valor parcial de la alternativa a en relación al atributo i ; k_i es el peso del atributo i , que se refiere a la medición del grado de importancia de cada objetivo [23].

La ejecución de esta etapa envuelve entrevistas con los decisores o bien puede ser construida de forma generalizada por medio de cuestionarios a un grupo de decisores [26]. El resultado sugiere un árbol de valor con los respectivos atributos.

4.3. Preferencia y compensaciones de valor

Para el conjunto de atributos definidos es necesario hacer una valoración (etapa 3), o sea, definir la unidad de medida y límites para cada atributo. Cada atributo debe obedecer cinco propiedades [27]: no ser ambiguo; ser exhaustivo; ser operacional; tener aplicación directa y ser de fácil comprensión. Ellos también deben ser organizados de forma jerárquica.

Los atributos pueden ser clasificados en cualitativos o cuantitativos. Los atributos cualitativos son aquellos que poseen cierto grado de subjetividad, como: imagen de la empresa, entre otros. Estos atributos pueden ser cuantificados a través de un esfuerzo por encontrar indicadores relacionados o utilizando la percepción de los decisores. Así, pueden ser definidos en una escala de zero (0) a cien (100) dando mayor calificación a las alternativas más deseadas. Los atributos cuantitativos suponen la utilización de indicadores objetivos y que pueden ser objeto de una medición directa. Estos atributos pueden ser de comportamiento lineal y no lineal. Para la determinación de la curva de valor de los atributos puede ser utilizado el método de la bisección [21].

4.3.1. Jerarquización de los criterios

Implica atribuir ponderaciones (pesos) para indicar las preferencias de los decisores en relación al conjunto de atributos (etapa 3.1). Los pesos pueden ser atribuidos entre niveles superiores y luego para los niveles inferiores, hasta completar cada atributo. El método AHP es una herramienta atractiva para ponderación cuando existen conflictos entre varios objetivos, pues la comparación pareada de los criterios permite obtener una valoración generalizada cuando el análisis se concentra solamente en dos factores.

4.4. Formulación del modelo matemático

Aquellos criterios fácilmente cuantificables pueden hacer parte de un modelo matemático (etapa 4). Algunas restricciones pueden ser utilizadas para incluir el nivel de expansión deseado, garantía de capacidad, entre otros. No todos los criterios podrán ser incluidos en el modelo matemático, pues existen algunos difícilmente cuantificables como: condiciones sindicales, fuerza competitiva, entre otros, que serán parte de la metodología multicriterio. La idea en esta fase es ofrecer un conjunto de soluciones factibles que permitan mejorar las funciones objetivo definidas. Los diferentes objetivos dependerán del problema tratado y de las preferencias del decisor.

4.4.1. Determinación de alternativas

Una empresa generalmente tiene en mente locales potenciales para instalación de sus CD. Estos locales candidatos son representados como nodos en la red de distribución. Luego el modelo matemático multiobjetivo a partir de la red especificada, define un conjunto de soluciones factibles. Es importante agregar información relevante de las alternativas que no hayan sido considerados en análisis previos. Esta fase puede ser realizada de paralelamente a las dos primeras fases.

4.5. Evaluación de alternativas

Las soluciones generadas por el modelo matemático representan datos de entrada (alternativas) para el modelo multicriterio (etapa 4.5). Así, por medio de funciones de valor y de los pesos definidos por los decisores para cada atributo es posible evaluar un valor global para cada solución.

4.6. Análisis de sensibilidad (etapa 6)

Tiene como objetivo verificar la robustez de la solución.

El software V.I.S.A. Interactive Sensitivity Analysis. será utilizado para seleccionar la mejor alternativa de acuerdo con las preferencias de los decisores. Esta herramienta permite modificar los pesos de los criterios y observar cómo esas variaciones afectan el resultado.

5. Validación

La validación de esta propuesta referente a la combinación de metodología multicriterio con modelación matemática para el problema de localización de CD, está fundamentada en la realización de las etapas descritas en la sesión 4 con valoraciones reales en un contexto teórico. La descripción y clasificación del problema (etapa 1), definición de objetivos fundamentales (etapa 2) y sus medidas de desempeño, así como las preferencias y la evaluación de las compensaciones de valor fueron realizadas por medio de entrevistas con gerentes de centros de distribución que participaron activamente de la implantación de nuevas instalaciones. La sesión 2 presenta el resultado de las etapas 1 (descripción del problema) y 2 (definición de los objetivos fundamentales). Además, la Tabla 1 presenta el árbol de decisión para el problema, con los respectivos indicadores, unidades de medida y valoración de los atributos.

Tabla 1.

Criterios para localización de CD

ATRIBUTOS	INDICADOR	Unid.	Valor
1. COSTO			66,67%
1.1. Inversión	Valor presente liquido (VPL)	\$	75%
1.2. Costo operacional			25%
1.2.1. Costo de operación	Costo variable	\$/mes	75%
1.2.2. Costo de la mano de obra	Costo variable	\$ x mil	25%
2. BENEFÍCIO			33,33%
2.1. Características del trabajo			4,3%
2.1.1. Disponibilidad de mano de obra calificada	Cualitativo	Escala	100%
2.2. Infraestructura			34,9%
2.2.1. Existencia de modos de transporte	Cualitativo	Escala	12%
2.2.2. Posibilidad de expansión	Área total	m ²	52,8%
2.2.3. Sistemas de telecomunicación	Cualitativo	Escala	33,2%
2.3. Ambiente macro			12,4%
2.3.1. Tasas e impuestos	Costo	\$	33,33%
2.3.2. Impacto ambiental	Emisión de CO ₂	t/mes	33,33%
2.3.3. Incentivos fiscales	VPL	\$	33,33%
2.4. Mercado			24,2
2.4.1. Proximidad con el cliente	Sumatoria de distancias	Km	66,7%
2.4.2. Proximidad con el proveedor	Sumatoria de distancias	Km	33,3%
2.5. Lead time de la red	Tiempo de entrega	días	24,2%

En la modelación de preferencias (etapa 3), fueron diseñadas curvas de valor para cada uno de los criterios a partir de la percepción de los evaluadores. Estas curvas miden la fuerza relativa de las preferencias de los decisores con respecto a cada atributo para las alternativas de localización establecidas.

Las comparaciones entre los diferentes criterios del mismo nivel jerárquico (etapa 3.1) fueron realizadas utilizando el método *AHP*. El software *EXPERT CHOICE* fue utilizado para los cálculos y transformar las comparaciones en pesos normalizados (última columna de la Tabla 1), así como para verificar la consistencia de las comparaciones. El trabajo de [20] ejemplifica el uso de *AHP* y del aplicativo *EXPERT*

CHOICE como soporte para un problema de selección de vehículos en un astillero colombiano.

Observe en la Tabla 1 que el árbol involucra los siguientes criterios cuantitativos: costos de inversión; costos de operación y *lead time* de la red de suministros. Estos criterios permiten la proposición de un modelo matemático multicriterio descrito por programación multiobjetivo para generar alternativas de solución factibles (etapa 4). El modelo es presentado a continuación:

Índices y parámetros

j Índice de las plantas.

k Índice de potenciales CD.

l Índice de los clientes (Minoristas).

m Índice de los modales de transporte.

v	Índice de la flota propia.
r	Índice de los posibles niveles de capacidad de los CD.
C_{jkm}	Costo unitario de transporte desde la planta j para el CD k en el modal m .
C'_{klv}	Costo unitario de distribución desde el CD k para el cliente l en el tipo de vehículo v .
CS_{kl}	Costo unitario de distribución desde el CD potencial k para el cliente l con transporte subcontratado.
t_{jkm}	Tiempo de transporte desde la planta j hasta el CD potencial k en el modal m .
t'_{klv}	Tiempo de distribución desde el CD potencial k hasta el cliente l en el vehículo propio v .
tS_{kl}	Tiempo de distribución desde el CD potencial k hasta el cliente l de forma subcontratada.
f_k^r	Capital necesario para abrir el CD potencial k con nivel de capacidad r .
a_k	Costo de operación unitario en el CD potencial k .
b_k^r	Capacidad del CD potencial k cuando es abierto con nivel de capacidad r .
D_l	Demanda mensual estimada para el cliente l .
e_j	Capacidad de producción de la fábrica j .
Cap_v	Capacidad de transporte del vehículo propio v .
RM_{mjk}	1 si el modal m está disponible para el transporte desde la planta j para el CD potencial k , 0 caso contrario.
RV_{vl}	1 si el vehículo tipo v tiene acceso al cliente l , 0 caso contrario.
θ	Mínimo porcentaje de utilización aceptado para los CD abiertos.
\mathcal{M}	Número muy grande.
Variables	
X_{jkm}	Cantidad de producto transportado desde la planta j para del CD potencial k en el modal m .
Y_{klv}	Cantidad de producto distribuido desde el CD k para el cliente l en el tipo de vehículo v .
Z_{kl}	Cantidad de producto distribuido de forma subcontratada desde el CD k hasta el cliente l .
χ_{jkm}	1 si el modal m es utilizado en el transporte de productos desde la planta j para el CD potencial k , 0 caso contrario.
ψ_{klv}	1 si el vehículo propio v es utilizado en la distribución desde el CD k para el cliente l , 0 caso contrario.
ω_{kl}	1 si el transporte subcontratado es utilizado en la distribución desde el CD para el cliente l , 0 caso contrario.
U_k^r	1 si el CD k es abierto con nivel de capacidad r , 0 caso contrario.
IV_{klv}	1 si el vehículo v es usado para distribuir desde el CD potencial k para el cliente l , 0 caso contrario.
NV_v	Número de vehículos v utilizados.

5.1 Ecuaciones

La función objetivo (2) minimiza los costos de transporte relacionados al suministro de los CD, costos para distribución a partir de los CD, considerando flota propia y subcontratada, y costos operacionales de cada CD. La función objetivo (3) minimiza los *lead times* de la cadena de suministros (tiempos desde las fábricas hasta los CD y después hasta los clientes). La función objetivo (4) minimiza la inversión por abrir los CD de diversas capacidades.

$$\begin{aligned} \min F1 = & \sum_j \sum_k \sum_m C_{jkm} X_{jkm} \\ & + \sum_k \sum_l \sum_v C'_{klv} Y_{klv} \\ & + \sum_k \sum_l CS_{kl} Z_{kl} + \sum_j \sum_k \sum_m a_k X_{jkm} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \min F2 = & \sum_j \sum_k \sum_m t_{jkm} \chi_{jkm} + \sum_k \sum_l \sum_v t_{klv} \psi_{klv} \\ & + \sum_k \sum_l tS_{kl} * \omega_{kl} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\min F3 = \sum_k \sum_r f_k^r * U_k^r \quad (4)$$

Sujeto a:

$$\sum_k \sum_v Y_{klv} + \sum_k Z_{kl} \geq D_l \quad \forall l \quad (5)$$

$$\sum_j \sum_m X_{jkm} * RM_{jkm} \geq \sum_l \sum_v Y_{klv} + \sum_l Z_{kl} \quad \forall k \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_m X_{jkm} \sum_r b_k^r * U_k^r \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_v Y_{klv} + \sum_l Z_{kl} \geq \theta * U_k^r \quad \forall k, r \quad (8)$$

$$\sum_r U_k^r \leq 1 \quad \forall k \quad (9)$$

$$\sum_m \sum_k X_{jkm} \leq e_j \quad \forall j \quad (10)$$

$$Y_{klv} \leq Cap_v * RV_{vl} * IV_{klv} \quad \forall k, l, v \quad (11)$$

$$NV_v = \sum_k \sum_l IV_{klv} \quad \forall v \quad (12)$$

$$X_{jkm} \leq \chi_{jkm} * \mathcal{M} \quad \forall j, k, m \quad (13)$$

$$Y_{klv} \leq \psi_{klv} * \mathcal{M} \quad \forall k, l, v \quad (14)$$

$$Z_{kl} \leq \omega_{kl} * \mathcal{M} \quad \forall k, l \quad (15)$$

$$\chi_{jkm} \leq X_{jkm} \quad \forall j, k, m \quad (16)$$

$$\psi_{klv} \leq Y_{klv} \quad \forall k, l, v \quad (17)$$

$$\omega_{kl} \leq Z_{kl} \quad \forall k, l \quad (18)$$

$$X_{jkm}, Y_{klv}, Z_{kl} \in \mathbb{R}^+, \chi_{jkm}, \psi_{klv}, \omega_{kl}, U_k^r \in \{0,1\} \quad (19)$$

e $NV_v \in \mathbb{Z}^+$

La restricción (5) garantiza la satisfacción de la demanda, la restricción (6) garantiza el flujo entre entradas y salidas en los CD, obedeciendo las restricciones de acceso por modal. Las ecuaciones (7) y (8) garantizan las capacidades máximas y mínimas de los CD, mientras la restricción (9) garantiza que los CD sean abiertos con una única capacidad. La ecuación (10) restringe las capacidades de las plantas y la ecuación (11) a las capacidades de los vehículos propios utilizados, mientras la restricción (12) calcula el número total usado. El conjunto de restricciones (13-18) garantiza la atribución de 1 a las variables binarias cuando existen cantidades transportadas. Finalmente la restricción (19) define el dominio de las variables.

Dos propuestas para incorporar las diferentes funciones objetivo en un mismo modelo, son:

$$\min D = w_1 \left(\frac{F1}{F1^*} \right) + w_2 \left(\frac{F2}{F2^*} \right) + w_3 \left(\frac{F3}{F3^*} \right) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \min MD \\ = \max \left\{ w_1 \left(\frac{F1}{F1^*} \right), w_2 \left(\frac{F2}{F2^*} \right), w_3 \left(\frac{F3}{F3^*} \right) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

Donde w_1, w_2 y w_3 son los pesos relativos de cada función objetivo que pueden ser definidos como valores entre 1 (máxima prioridad) y 0 (sin prioridad) a criterio del analista. Aquí $F1^*, F2^*$ y $F3^*$ son los valores óptimos de cada función, también llamados de *valores metas*. La ecuación (22) minimiza la suma ponderada de los desvíos porcentuales de los objetivos del problema, mientras la ecuación (23) minimiza el máximo de los desvíos porcentuales.

De esta forma, fueron propuestos los siguientes modelos enteros mixtos: *A*, correspondiente al modelo (2)(5-19); *B*, que corresponde a (3)(5-19); y, *C* al (4-19), y los modelos de programación multiobjetivo: *D*, que incluye las ecuaciones (22)(5-19); y, *E* (23)(5-19). Estos modelos fueron codificados en el lenguaje de modelación *GAMS* y resueltos en un computador con procesador Intel Core i5-2430M con 2.4GHz de RAM con el solver *CPLEX* versión 12.3. Para eso, inicialmente se resolvieron los tres primeros modelos, para obtener los valores metas $F1^*, F2^*$ e $F3^*$.

Después del desarrollo del modelo matemático, es posible determinar las alternativas (etapa 6). Cada uno de los cinco modelos propuestos genera una alternativa de solución de acuerdo con la función objetivo. Además, pueden ser incorporadas soluciones alternativas definidas

por los decisores que tengan buen impacto en relación a los criterios cualitativos. Vale resaltar que estas soluciones alternativas deben ser factibles para las restricciones (5-19).

Para las soluciones creadas por el modelo matemático, fueron asignados valores aleatorios para los atributos cualitativos basados en los límites y proporcionalidades de los datos provistos por los gerentes. Las soluciones del problema multiobjetivo son presentadas en las Tablas 2 y 3. Los nombres de los atributos están descritos en la Tabla 1.

Note en la tabla 2 que la solución óptima del modelo A (que minimiza costo de operación) es abrir el CD 3 en el nivel de capacidad medio (2) y en CD 5 en el nivel de capacidad bajo (1). Para el modelo C (que minimiza la inversión) la solución óptima es abrir un único centro de distribución, CD 1, con la máxima capacidad (3). Nótese también que los modelos multiobjetivos D y E ofrecen más de una solución (D_1, D_2, E_1, E_2, E_3). Estas soluciones son llamadas en programación multiobjetivo como “soluciones no dominadas” y pueden ser obtenidas variando los pesos de las metas ($w_1 - w_2 - w_3$) a criterio del analista. Para el caso, dos y tres variaciones fueron realizadas para los modelos D y E respectivamente. Para el modelo D, por ejemplo, los pesos usados fueron (1-0-1) y (0-1-1). Para mayores detalles de este método el lector puede consultar a [28].

Tabla 2.
Alternativas: valores definidos con el modelo matemático

Modelo	CD Abierto (Nivel Capacidad)	Inversión - \$	Costo Operación - \$/mes	Lead Time - días
<i>A</i>	3(2) 5(1)	166.620.000	41.980.000	29,57
<i>B</i>	2(2) 3(1) 4(1)	240.420.000	50.916.000	16,98
<i>C</i>	1(3)	93.145.000	66.690.000	29,04
<i>D</i> ₁	7(3)	95.018.571	45.091.959	25,66
<i>D</i> ₂	2(3)	95.715.851	59.021.395	20,98
<i>E</i> ₁	3(2) 8(1)	173.599.425	42.909.823	29,42
<i>E</i> ₂	3(1) 4(1) 7(2)	229.449.504	44.953.188	18,53
<i>E</i> ₃	1(2) 3(1)	150.646.514	59.455.773	19,09

Posteriormente, la evaluación de las alternativas (etapa 5) compara las diferentes propuestas de localización resultantes en relación a cada criterio y meta propuesta. En esta etapa, las soluciones fueron incorporadas a la estructura decisoria construida en V.I.S.A. Los resultados indicaron como alternativa recomendada, la generada por el modelo *D*₁ (abrir CD7). La clasificación general en orden de preferencia es presentada a seguir: $D_1 > D_2 > E_3 > B > A > E_1 > E_2 > C$.

Tabla 3.
Alternativas: otros valores además de los costos

Modelo	1.2.2	2.1.1	2.2.1	2.2.2	2.2.3	2.3.1	2.3.2	2.4.3	2.4.1	2.4.2
<i>A</i>	1.019	Poca	Pobre	265000	Bueno	225.000	1.1	1.094	4100	4850
<i>B</i>	1.700	Moderada	Regular	450000	Bueno	214.000	2.3	1.300	4483	4983
<i>C</i>	3.143	Poca	Regular	1000000	Pobre	160.000	4.8	2.062	4500	4850
<i>D</i> ₁	2.141	Suficiente	Excelente	310000	Regular	240.000	3.8	1.423	6000	4500
<i>D</i> ₂	2.276	Moderada	Regular	700000	Bueno	200.000	5.0	1.475	4500	6000
<i>E</i> ₁	2.949	Moderada	Pobre	525000	Regular	205.000	1.3	2.382	4850	4500
<i>E</i> ₂	3.582	Moderada	Regular	320000	Regular	227333	2.0	1.282	4983	4483
<i>E</i> ₃	3.427	Escasa	Pobre	650000	Pobre	190.000	2.7	1.350	4850	4100

Después de evaluar las alternativas, el análisis de sensibilidad (etapa 6) permite al decisor verificar que tan robusta es su decisión provisional en relación a posibles alteraciones en las preferencias de los criterios definidos. De esta forma, fueron realizadas variaciones importantes en los pesos relativos de los criterios más importantes: *beneficio* e *inversión*.

La Figura 2 presenta las soluciones sugeridas cuando variaciones en la relación costo-beneficio son realizadas. Se observa que cuando la prioridad del beneficio alcanza 44%, la alternativa sugerida es la generada por el modelo *B*. Cuando el peso aumenta más allá del 70%, la alternativa sugerida es la creada por el modelo *E₂*. El intervalo porcentual en el cual la solución provisional, generada por el modelo *D₁*, se mantiene como la más preferida es el que presenta el beneficio evaluado entre 20-44%.

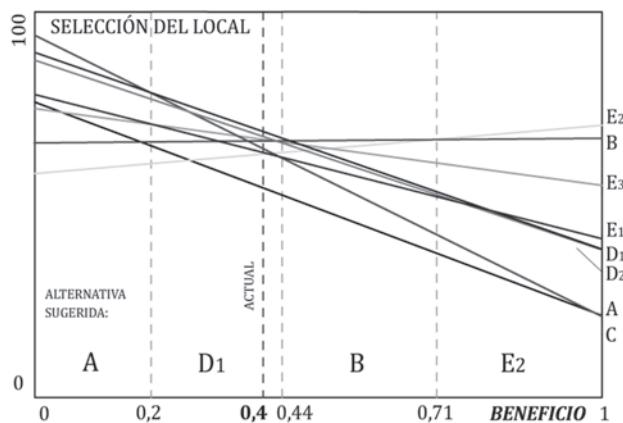


Figura 2. Variación en la prioridad del Beneficio

La Figura 3, por otra parte, presenta los resultados de las variaciones en el peso del criterio *Inversión*. Note pesos superiores a 80% sugiere la alternativa generada por el modelo *E₃* como la más adecuada. Contrariamente, si el peso del criterio disminuye hasta 67%, la solución generada por el modelo *B* sería la elección más recomendable.

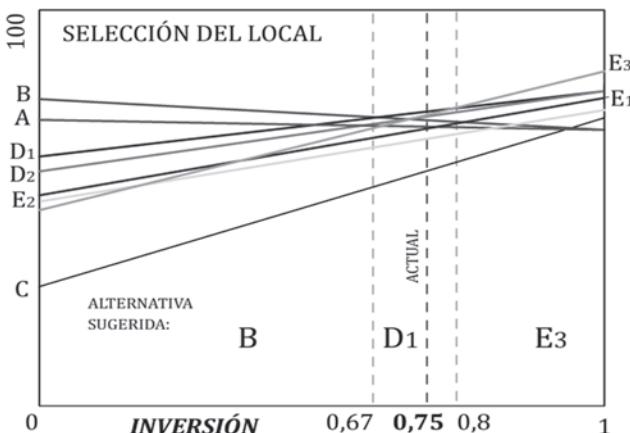


Figura 3. Variación en la prioridad de Inversión

Después de la realización de análisis de sensibilidad, la solución generada por el modelo *D₁* se muestra como la más

recomendable. Note que esta elección no representa la mejor alternativa en relación a la minimización de costos de inversión, costo operacional o *lead time*, pero ciertamente parece ser la que ofrece las disposiciones y compensaciones más adecuadas para el decisor y aquella con mejor compromiso en relación a los funciones objetivo y los posibles escenarios estudiados.

6. Conclusión

Este trabajo propone una metodología combinada para el problema de localización de instalaciones considerando los diversos criterios estratégicos cualitativos y cuantitativos relacionados a la decisión. Un conjunto de factores relevantes a la toma de decisiones para la localización de centros de distribución tanto propuestos en la literatura como por decisores en situaciones reales fueron usados para resolver un problema teórico. Un modelo matemático multiobjetivo fue propuesto para considerar el conjunto de costos y restricciones de una red de distribución. Las alternativas fueron evaluadas considerando la combinación de dos enfoques. El modelo matemático filtra las soluciones no factibles y optimiza los criterios de evaluación propuestos en diferentes funciones objetivo. La metodología propuesta permite la consideración de las preferencias reales de los decisores a través del análisis multicriterio y agrega cierto grado de objetividad y optimización al considerar el modelo matemático implícito.

La solución sugerida por la metodología puede representar un resultado más compensatorio, pues es capaz de emular las preocupaciones reales del tomador de decisiones, las cuales muchos otros modelos no examinan, además de considerar los beneficios y los costos palpables de la red al utilizar un conjunto de soluciones eficientes del modelo matemático.

Referencias

- [1] Amiri, A., Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure, European Journal of Operational Research, vol. 171(2), pp. 567–576, 2006.
- [2] Kanani Nezhad, A.A., Roghanian, E. and Azadi, Z., A fuzzy goal programming approach to solve multi-objective supply chain network design problems International Journal of Engineering Computations, vol. 4(3), pp. 315–324, 2013.
- [3] Duarte, A. E., Sarache, W. A. and Cardona, C. A., Cost analysis of the location of colombian biofuels plants, Dyna, vol. 79(176), pp. 71–80, 2012.
- [4] Barahona, F. and Jensen, D., Plant location with minimum inventory, Mathematical Programming, vol. 83, pp. 101–111, 1998.
- [5] Farahani, R. Z., Asgari, N., Heidari, N., Hosseiniinia, M. and Goh, M., Covering problems in facility location: A review, Computers & Industrial Engineering, vol. 62 (1), pp. 368–407, Feb. 2012.
- [6] Crespo, F. A. and Paredes, R. D., Un mecanismo para localización eficiente y equitativa de nimby, Dyna, vol. 76(160), pp. 293–303, 2009.
- [7] Awasthi, A., Chauhan, S. S. and Goyal, S. K., A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty, Mathematical and Computer Modelling, vol. 53(1–2), pp. 98–109, Jan. 2011.

- [8] Bu, L., Van Duin, J. H. R., Wiegmans, B., Luo, Z. and Yin, C., Selection of City Distribution Locations in Urbanized Areas, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 39, pp. 556–567, Jan. 2012.
- [9] Datta, S., Multi-criteria multi-facility location in Niwai block, Rajasthan, *IIMB Management Review*, vol. 24(1), pp. 16–27, Mar. 2012.
- [10] Partovi, F., An analytic model for locating facilities strategically, *Omega*, vol. 34(1), pp. 41–55, 2006.
- [11] Ballou, R. H., Logística empresarial: Gerenciamento da cadeia de suprimentos, Bookman, Porto alegre, 2006.
- [12] Sun, H., Gao, Z. and Wu, J., A bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 32(4), pp. 610–616, Apr. 2008.
- [13] Kahraman, C., Ruan, D. and Doğan, I., Fuzzy group decision-making for facility location selection, *Information Sciences*, vol. 157, pp. 135–153, Dec. 2003.
- [14] Klose, A. and Drexl, A., Facility location models for distribution system design, *European Journal of Operational Research*, vol. 162(1), pp. 4–29, 2005.
- [15] Ambrosino, D. and Grazia Scutellà, M., Distribution network design: New problems and related models, *European Journal of Operational Research*, vol. 165(3), pp. 610–624, Sep. 2005.
- [16] JabalAmeli, M. S. and Mortezaei, M., A hybrid model for multi-objective capacitated facility location network design problem, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 2(3), pp. 509–522, 2011.
- [17] Arabani, A. and Farahani, R., Facility location dynamics: An overview of classifications and applications, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62(1), pp. 408–420, Feb. 2012.
- [18] Tansel, B. C., Francis, R. L. and Lowe, T. J., Location on networks: A survey. Part I: The p-center and p-median problems, *Management Science*, vol. 29(4), pp. 482–497, 1983.
- [19] Munro, I. and Mingers, J., The use of multimethodology in practice results of a survey of practitioners, *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 53(4), pp. 369–378, 2012.
- [20] Patricia, S. and Martínez, M., Expertchoice © Decision Support System Implementation For Vehicle Selection In A Colombian Shipyard, *Dyna*, vol. 79(173), pp. 53–60, 2012.
- [21] Goodwin, P. and Wright, G., Decision Analysis for Management Judgment, 3rd ed. England, 2005.
- [22] Farahani, R., SteadieSeifi, Z. M. and Asgari, N., Multiple criteria facility location problems: A survey, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34(7), pp. 1689–1709, 2010.
- [23] Montibeller, L. A. and Franco, G., Decision and risk analysis for the evaluation of strategic options. In: O'BRIEN, F.A.; DYSON, R.G. (eds). *Supporting Strategy: Frameworks, Methods and Models*. Chichester: Wiley, 2007, pp. 251–284.
- [24] Barker, T. J. and Zabinsky, Z. B., A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process, *Omega*, vol. 39(5), pp. 558–573, Oct. 2011.
- [25] Keeney, R. L., Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives., *European Journal of Operational Research*, vol. 92, pp. 537–549, 1996.
- [26] Loken, E., Botterud, A. and Holen, A. T., Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems., *European Journal of Operational Research*, vol. 197, pp. 1075–1083, 2009.
- [27] Keeney, R. L. and Gregory, R. S., Selecting attributes to measure the achievement of objective, *Operations Research*, vol. 53, pp. 1–11, 2005.
- [28] Munhoz, J. R. and Morabito, R., Modelo baseado em programação linear e programação de metas para análise de um sistema de produção e distribuição de suco concentrado congelado de laranja, *Gestão & Produção*, vol. 8(2), pp. 139–159, 2001.

Analysis of vehicular traffic flow using a macroscopic model

Análisis del flujo de tráfico vehicular a través de un modelo macroscópico

Fernando Pérez ^a, Alejandro Bautista ^b, Martín Salazar ^c & Antonio Macías ^d

^a Ph.D., Escuela de Ciencias, Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca, México, l_perez_s@yahoo.com.mx

^b Ph.D., Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Puebla, México, Alejandro.bautista@hotmail.com

^c Ph.D., Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Puebla, México, msalaz_77@hotmail.com

^d M.Sc., Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Puebla, México, amacias46@yahoo.com.mx

Received: July 3th, 2013. Received in revised form: November 12th, 2013. Accepted: December 11th, 2013

Abstract

Today the most cities in the world face different problems caused by vehicular traffic due to the increasing number of vehicles on road, such as traffic congestion, environmental pollution, excessive noise, increased accidents on the road, etc. Therefore it is important to represent the phenomenon by applying models so as to find better traffic flow patterns in a given city. In this work we introduce a simple macroscopic model to describe traffic flow in traffic congestion and we obtain the equation that relates the characteristic behavior between traffic flow and traffic density, known in the literature as fundamental relationship. Finally, we find an analytical solution for optimal flow passing vehicles on a congested road section.

Keywords: Vehicular traffic; traffic density; macroscopic model.

Resumen

Hoy en día la mayoría de las ciudades en el mundo se enfrentan a diversos problemas ocasionados por el tráfico vehicular debido al creciente número de vehículos en circulación, tales como congestionamiento, contaminación del medio ambiente, exceso de ruido, incremento del número de accidentes viales, etc. De ahí la importancia de representar el fenómeno de tráfico vehicular mediante modelos en busca de mejores patrones de flujo vehicular en una determinada ciudad. En este trabajo introducimos un modelo macroscópico simple para describir el flujo vehicular en un congestionamiento tráfico y obtenemos la ecuación que relaciona el comportamiento característico entre flujo vehicular y densidad de tráfico, conocida en la literatura como relación fundamental. Finalmente, hallamos una solución analítica para la fluidez óptima del paso de vehículos en un tramo de carretera congestionado.

Palabras Clave: Tráfico vehicular; densidad de tráfico; modelo macroscópico.

1. Introducción

El congestionamiento tráfico representa en la actualidad un gran reto a resolver debido al número de usuarios cada vez mayor que necesitan transportarse hacia las grandes ciudades para realizar sus actividades económicas, sociales, culturales y de cualquier índole. Más aún, el transporte no es exclusivo de los usuarios, ya que los productos que se consumen o se comercializan también necesitan ser transportados, lo que agudiza más el problema acerca del incremento del número de vehículos que transitan a través de las ciudades y que provocan problemas serios de tráfico vehicular, además de contaminación, exceso de ruido, incremento del número de accidentes viales, etc. La repercusión que tiene el incremento de vehículos automotores con el aumento del número de accidentes viales se discute en el trabajo [1] en donde se analiza ampliamente las causas de la accidentalidad, destacándose

las que son consecuencia de un mal diseño de las vías urbanas y las que se deben a una falta de criterios sobre seguridad vial para una mejor adaptación de sistemas de control vehicular.

En lo que respecta a congestionamiento, es tentativo pensar que un incremento en la infraestructura vial conlleva necesariamente a una mejora en la fluidez vehicular, pero no siempre es así; esto se discute en la famosa paradoja de Braess [2–5]. De hecho la dificultad que surge al agregar una nueva vía es un concepto que ya ha sido ampliado y aplicado recientemente a sistemas de transporte mesoscópicos [6,7]. El mal diseño de infraestructuras viales y el uso de controladores de tráfico obsoletos e ineficientes, son las principales causas que han ocasionado que varias ciudades en el mundo presenten problemas serios de transporte (ver por ejemplo [8]), por lo que últimamente se han presentado nuevas estrategias e intensificado estudios

sobre tráfico vehicular en sistemas viales, buscando agilizar la movilidad vehicular [9–11].

En la literatura se han reportado distintos enfoques para abordar el problema sobre congestionamiento en el tráfico vehicular, destacándose los llamados modelos macroscópicos y microscópicos. En los modelos macroscópicos (ver por ejemplo [12,13]) no se toman en cuenta las características específicas de los vehículos y generalmente, por su comportamiento estadístico, las variables principales que intervienen, tales como tamaño de vehículos y distancia de separación entre vehículos, se promedian. Se consideran también modelos macroscópicos aquellos en donde se ha concebido el tráfico vehicular como un flujo compresible de un fluido, por lo que se ha tratado de describir este fenómeno usando teoría hidrodinámica.

Por otro lado, en los modelos microscópicos (ver por ejemplo [14]), en donde se incluyen los modelos de autómatas celulares, se toman en cuenta las diferentes variables que especifican las características propias de cada vehículo y además se especifican las reglas de movimiento individual de cada vehículo. A pesar de que con estos modelos se obtiene una información más completa sobre la dinámica de transito, se requiere de una gran cantidad de datos específicos sobre infraestructura vial, demanda de transporte y seguimiento de trayectorias de los vehículos que no es fácilmente accesible, pero que esta última puede ser recopilada empleando tecnología de punta [15,16].

El modelo matemático presentado aquí es macroscópico y se deduce a partir de la segunda ley de movimiento de Newton; las suposiciones establecidas para su desarrollo hacen posible determinar una solución analítica para la fluidez óptima a un problema ideal de congestionamiento tráfico en una vía, suponiendo movimiento vehicular homogéneo (flujo vehicular estacionario).

Su verdadero valor radica en la simplicidad de su deducción, pues no involucra métodos numéricos y su predicción de la forma que debe poseer un diagrama de flujo fundamental, al menos de manera cualitativa, es correcta.

En la actualidad se encuentran reportados diversos modelos macroscópicos que estudian dinámica vehicular y dependiendo del número de variables independientes, necesarios para su descripción, se han clasificado en modelos de aproximación de primer orden [17,18], segundo orden [13,19–24] y de orden mayor [12,25]. Dicho número depende del nivel de detalle que se desee describir el sistema y de la complejidad del tipo de vía que se esté tratando. Por ejemplo, en los modelos de segundo orden, comúnmente consideran a la densidad de tráfico y la rapidez promedio de los vehículos, como las dos variables independientes.

La mayoría de estos modelos han sido aplicados a situaciones más complejas de tráfico que la de un tramo recto de carretera de un solo carril, por lo que el uso de los cálculos numéricos para resolver las ecuaciones resultantes de la modelación, es indispensable, ya que difícilmente se pueden resolver de manera analítica.

En ese sentido podemos decir que nuestro modelo necesitaría reformularse si queremos incluir un mayor

número de factores inherentes a una situación de tráfico; sin embargo, para nuestro fin, consideramos que puede servir de base para desarrollar modelos más sofisticados y con ello, resolver problemas de frontera sobre dinámica vehicular, que es uno de nuestros próximos objetivos.

El presente artículo presenta la siguiente estructura: además de la presente introducción, en la sección 2 se plantean las ecuaciones de movimiento de los vehículos en un tramo congestionado, analizando las fuerzas aplicadas que intervienen en cada vehículo. En la sección 3 se resuelven dichas ecuaciones para resolver las rapideces de los vehículos en función de la densidad de tráfico (x). En la sección 4 se introduce el concepto de flujo vehicular y se determina su comportamiento en función de x . En la sección 5 se obtiene la solución de la fluidez óptima para una flota de vehículos en el caso considerado.

2. Ecuaciones de movimiento de vehículos en un tramo congestionado

La fuerza resultante sobre el j -ésimo vehículo que se desplaza a través de un tramo recto de carretera (movimiento unidimensional) es

$$\text{Fuerza de tracción del motor} - \text{Fuerza de resistencia al avance}. \quad (2.1)$$

La fuerza de resistencia al avance es la resultante de las fuerzas de fricción presentes: pavimento con neumáticos y rozamiento del vehículo con el aire (se pueden despreciar las fuerzas de rozamiento del vehículo con el aire ya que son pequeñas en comparación con las fuerzas de fricción entre pavimento y neumáticos), y está relacionada de manera proporcional con la intensidad con el que el conductor pisa el freno.

Suponiendo que al ingresar el vehículo en el tramo congestionado se deja de acelerar, como normalmente sucede, entonces la fuerza de tracción del motor en (2.1) es cero y de la segunda ley de Newton se tiene

$$m_j \frac{d^2 z_j(t)}{dt^2} = - \text{Fuerza de resistencia al avance} \quad (2.2)$$

donde $z_j(t)$ es la coordenada de posición del vehículo j en el instante t a lo largo del tramo carretero. Hemos ubicado el origen de nuestro eje de coordenadas z al inicio de dicho tramo y la dirección del flujo de vehículos es hacia el eje z positivo.

La fuerza de resistencia al avance debe ser directamente proporcional a la fuerza con que se aplican los frenos y esta última fuerza es, a la vez:

i) Inversamente proporcional a la distancia relativa entre los vehículos adyacentes j y $(j-1)$ (hemos ubicado las posiciones de los vehículos de tal forma que $z_j < z_{j-1}$). Dicho de otra forma: a mayor espaciamiento entre vehículos, menos freno; a menor espaciamiento, más freno.

ii) Directamente proporcional a la rapidez relativa entre ambos vehículos (note que $\dot{z}_j(t) > \dot{z}_{j-1}(t)$). A mayor rapidez relativa, más freno y viceversa. Por lo tanto, tomando en

consideración las dos hipótesis i) y ii) para la fuerza con que se aplican los frenos y su relación de ésta con la fuerza de resistencia al avance, (2.2) se transforma en

$$m_j \frac{d^2 z_j(t)}{dt^2} = -k \frac{\dot{z}_j(t) - \dot{z}_{j-1}(t)}{|z_j(t) - z_{j-1}(t)|}. \quad (2.3)$$

k es una constante de proporcionalidad mayor que cero. La cantidad denotada en valor absoluto resalta el hecho de que el denominador se refiere a una distancia y el signo menos indica que la dirección de la fuerza resultante es en dirección opuesta a la dirección del flujo.

Suponiendo que hay N vehículos en el tramo considerado en el instante t , (2.3) con $j = 1, 2, \dots, N$, nos representan sus ecuaciones de movimiento.

3. Rapidez de un vehículo en un tramo congestionado

Analicemos antes que nada las condiciones que debe satisfacer la rapidez de un vehículo al entrar al tramo de carretera congestionado. De manera similar a la situación en que un vehículo se acerca a un cruce de paso de tren o al entrar en un túnel, el conductor debe de reducir su rapidez por precaución. En nuestro caso, la rapidez de un vehículo debe ser función de la densidad de tráfico. De hecho a mayor congestionamiento la rapidez de los carros es menor y viceversa; así que, si denotamos por $s_j(x)$ la rapidez del vehículo j y x el congestionamiento, entonces $s_j(x)$ es una función decreciente de x y por lo tanto satisface

$$s_j'(x) \leq 0. \quad (3.1)$$

(La prima indica derivada con respecto a x). En un extremo de bajo congestionamiento x_c los vehículos podrán moverse al límite de la rapidez permitida s_{max} , es decir,

$$s_j(x_c) = s_{max}, \quad (3.2)$$

y también para congestionamientos menores a x_c :

$$s_j(x) = s_{max} \quad \text{si } 0 < x \leq x_c, \quad (3.3)$$

ya que en este intervalo de bajo congestionamiento los vehículos son libres de moverse a la velocidad límite sin peligro de chocar.

Por otro lado, en un extremo de alto congestionamiento x_{max} la rapidez de los vehículos es cero, que corresponde al estado en que los vehículos están atrapados en el tráfico, inmovilizados; por lo que podemos escribir

$$s_j(x_{max}) = 0. \quad (3.4)$$

Ahora modelaremos la forma funcional para $s_j(x)$ en el intervalo $x_c \leq x \leq x_{max}$.

La primera integración de (2.3) nos determina la rapidez. Suponiendo un solo tipo de vehículos de masa m , se obtiene

$$\dot{z}_j(t) = \beta \ln|z_j(t) - z_{j-1}(t)| + \alpha_j, \quad (3.5)$$

que se puede verificar fácilmente derivando temporalmente (3.5) y ver que se obtiene (2.3). Aquí hemos denotado $\beta = k/m$.

Suponiendo que los N vehículos, moviéndose en el tramo, están espaciados en una distancia promedio d y que la longitud de los carros es en promedio L , entonces la congestión o densidad de tráfico, definido como el número de vehículos por unidad de longitud, está dado por

$$x = \frac{N}{N(d + L)} = \frac{1}{d + L}. \quad (3.6)$$

Usando esta última expresión y el hecho de que $|z_j(t) - z_{j-1}(t)| = d + L$, la ecuación (3.5) adquiere la forma

$$s(x) = \beta \ln\left(\frac{1}{x}\right) + \alpha, \quad (3.7)$$

en donde hemos supuesto movimiento vehicular homogéneo o flujo vehicular estacionario (i.e., el número de vehículos que pasan a través de una sección transversal del tramo por unidad de tiempo, es igual a una constante). En estas condiciones, los vehículos se mueven con la misma rapidez $s(x)$ para un cierto valor de la densidad de tráfico x .

Las condiciones (3.2) y (3.4) determinan los valores de las constantes β y α , resultando

$$\beta = \frac{s_{max}}{\ln(x_{max}/x_c)} \quad (3.8)$$

$$\alpha = -\beta \ln\left(\frac{1}{x_{max}}\right), \quad (3.9)$$

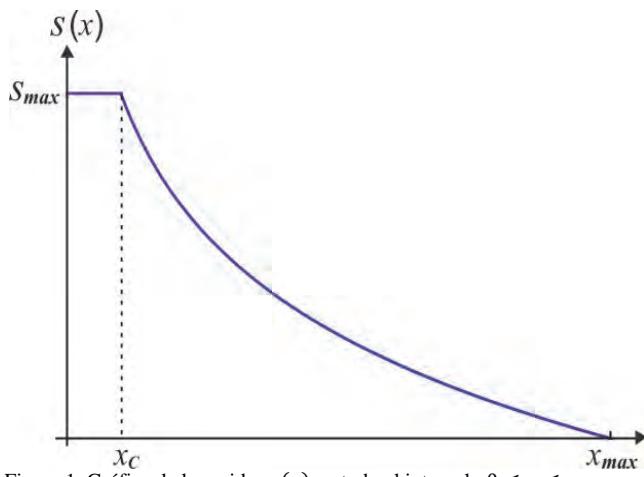
y por lo tanto, al sustituir (3.8) y (3.9) en (3.7), se obtiene

$$s(x) = s_{max} \frac{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_c}\right)}, \quad \text{si } x_c < x \leq x_{max} \quad (3.10)$$

Finalmente, tomando en consideración (3.3), obtenemos la solución para $s(x)$ en todo el intervalo de x :

$$s(x) = \begin{cases} s_{max} & \text{si } 0 \leq x \leq x_c \\ \frac{s_{max}}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right)} & \text{si } x_c < x \leq x_{max}. \end{cases} \quad (3.11)$$

Tomando en cuenta que la segunda derivada de $s(x)$ respecto de x es positiva en el intervalo $x_c < x \leq x_{max}$, y por ende la concavidad de $s(x)$ es hacia arriba en este intervalo, la gráfica de (3.11) adquiere la forma representada en la Figura 1.

Figura 1. Gráfica de la rapidez $s(x)$ en todo el intervalo $0 \leq x \leq x_{max}$.

4. Relación fundamental del flujo vehicular y su diagrama

Estamos en condiciones de expresar el flujo vehicular ϕ en función de la densidad de tráfico x y de la rapidez de tráfico $s(x)$. Partiendo de la definición de flujo vehicular, como el número de vehículos que cruzan una sección transversal del tramo carretero por unidad de tiempo, se obtiene

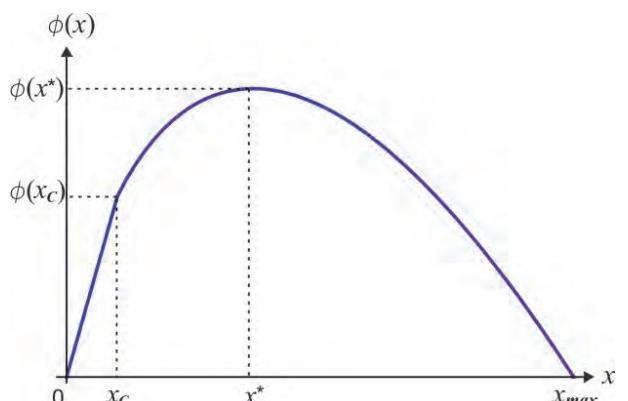
$$\phi(x, s) \equiv \frac{N}{\tau} = \frac{N}{\ell} x \frac{\ell}{\tau} = x \cdot s \quad (4.1)$$

Donde ℓ es la longitud del tramo y τ es el tiempo que tarda un vehículo en recorrerlo. Finalmente, usando (3.11), obtenemos la relación fundamental del flujo vehicular:

$$\phi(x) = \begin{cases} x s_{max} & \text{si } 0 \leq x \leq x_c \\ \delta x \ln\left(\frac{x_{max}}{x}\right) & \text{si } x_c < x \leq x_{max}, \end{cases} \quad (4.2)$$

donde

$$\delta \equiv \frac{s_{max}}{\ln\left(\frac{x_{max}}{x_c}\right)}.$$

Figura 2. Gráfica de $\phi(x)$ en función de x (diagrama fundamental del flujo vehicular).

La gráfica de ϕ (Fig. 2), es un caso de lo que se conoce en la literatura como diagrama fundamental del flujo vehicular (generalmente resulta ser función de varias variables). En nuestro caso se ha logrado reducir el flujo vehicular únicamente como una función de la densidad de tráfico x : $\phi = \phi(x)$, en este sentido, el modelo presentado aquí es de primer orden.

La fluidez óptima al paso de vehículos en el tramo de carretera considerado, ocurre en los valores de x en los cuales se maximiza $\phi(x)$. Tomando en cuenta que la gráfica de ϕ es cóncava hacia abajo, ésta tiene su máximo global en el punto $x^* = \frac{x_{max}}{e}$, que se puede verificar fácilmente mediante el cálculo diferencial. Tiene además un máximo local en $x = x_c$ sobre el intervalo $0 \leq x \leq x_c$, tal y como se indica en la Figura 2. Se dice que el tráfico es ligero si $x < x^*$ y pesado si $x > x^*$.

La tabla 1 muestra el conjunto de parámetros que intervienen en este modelo y se mencionan sus significados físicos. El valor de cada parámetro puede variarse ligeramente respecto a los valores característicos que se miden en una vía, con el fin de hallar el mejor ajuste, entre una curva de relación fundamental empírica con la curva obtenida aquí de manera teórica, y ver el alcance de su poder predictivo.

En un trabajo posterior planeamos mostrarles como puede aplicarse este modelo a una situación simple de congestionamiento tráfico que se observa en una vía urbana común de nuestra localidad, a pesar de que fue formulada para un caso de flujo estacionario.

Tabla 1. Parámetros y sus significados físicos que intervienen en el modelo.

s_{max}	Valor de la rapidez máxima en la que puede circular un vehículo cuando la vía está libre de congestionamiento
x_{max}	Densidad de máximo congestionamiento
x_c	Densidad crítica de congestionamiento en el que para valores menores que esta densidad, los vehículos podrán circular al valor de la rapidez máxima permitida.

5. Análisis de los resultados

De acuerdo con los resultados de la sección anterior, en el intervalo de densidad de tráfico $x_c \leq x \leq x_{max}$, la fluidez óptima ocurre en el punto bien definido $x^* = \frac{x_{max}}{e}$ (ver Fig. 2). Si la densidad de tráfico x es cercana a x_{max} , entonces, según nuestra gráfica, lejos de que se alcance una buena fluidez, los vehículos están prácticamente imposibilitados a moverse, que concuerda con lo que observamos en un tráfico muy pesado.

Si la densidad de flujo x está en algún valor tal que $x_c \leq x \leq x^*$ entonces $\phi(x_c) < \phi(x) < \phi(x^*)$. Este último resultado nos dice que es posible incrementar el número de vehículos que circulan por el tramo carretero (suponiendo que el acceso a él está siendo controlado por un semáforo o algún otro medio de control de paso vehicular), sin correr el riesgo de que se entorpezca el tránsito vehicular. De hecho lo óptimo es incrementar hasta el punto de densidad crítica x^* donde el flujo tiene su máximo global $\phi(x^*)$. Incrementar x más allá de ese valor se induce a un tráfico

pesado, i.e. de transito muy lento, según se observa en el diagrama de flujo vehicular (Fig. 2), con una rapidez correspondiente según la Figura 1.

6. Conclusiones

Aunque el modelo desarrollado aquí se enfocó a una situación muy específica de tramo congestionado, con él ha sido posible obtener una solución analítica para la fluidez óptima del paso de vehículos sin recurrir a los métodos numéricos y se ha obtenido, de manera sencilla, la relación fundamental del flujo vehicular, cuya gráfica reproduce el comportamiento característico de diagramas fundamentales de flujo vehicular que se obtienen al tratar casos más realistas, empleando modelos más sofisticados. El modelo podría replantearse para considerar otras situaciones específicas de tráfico, tales como vialidades de dos o más carriles, la presencia de varios tipos de vehículos, e incluso considerar otro tipo de situaciones físicas que generan congestionamiento, tales como reducciones de la capacidad vial de las carreteras, como sucede en los tramos llamados “cuellos de botella”, o aquellos congestionamientos ocasionados en tramos que se intersectan con otras vialidades. En el futuro nuestra investigación estará enfocada hacia dichas situaciones. En este trabajo, también buscamos despertar el interés de los lectores para estudiar un tema de investigación interdisciplinario actual y este desarrollo podría servir, como punto de partida, para incursionar en esta disciplina, ya que se sientan las bases y el lenguaje apropiado sobre dinámica vehicular.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el Cuerpo Académico UABJO-CA-50 y Cuerpo Académico BUAP-CA-236.

Referencias

- [1] García, R., Delgado, D., Díaz, E. and García, R., Caracterización de la accidentalidad vehicular y análisis de las causas en la provincia de Villa Clara, Cuba. Revista DYNA, 175, pp. 191–200, 2012.
- [2] Braess, D., Nagurney, A. and Wakolbinger, T., On a paradox of traffic planning. The journal Transportation Science, 39, pp. 446–450, 2005.
- [3] Irvine, A., How braess's paradox solves newcomb's problem, international studies in philosophy of science, 7, 2, pp. 145–164, 1993.
- [4] Steinberg, R. and Zangwill, W., The prevalence of braess's paradox. Transportation Science, 17, 3, pp. 301–318, 1983.
- [5] Rapoport, A., Kugler, T., Dugar, S. and Gisches, E., Choice of routes in congested traffic networks: Experimental tests of the Braess Paradox. Games and Economic Behavior 65, pp. 538-571, 2009.
- [6] Pala, M., Sellier, H., Hackens, B., Martins, F., Bayot, V. and Huant, S. A., new transport phenomenon in nanostructures: a mesoscopic analog of the Braess paradox encountered in road networks. Nanoscale Research Letters. 7, 1, pp. 472-476, 2012.
- [7] Pala, M., Baltazar, S., Liu, P., Sellier, H., Hackens, B., Martins, F., Bayot, V., Wallart, X., Desplanque, L. and Huant, S., Transport inefficiency in branched-out mesoscopic networks: an analog of the Braess paradox. Phys Rev Lett. 108,7, pp. 076802(1)-076802(5), 2013.
- [8] González, C., Posada, J. and Sánchez, I., The need for congestion pricing in medellin: an economic perspective. Revista DYNA, 171, pp. 123–131, 2012.
- [9] Espinosa, F., Gordillo, C., Jiménez, R. and Avilés, O., Machine vision algorithms applied to dynamic traffic light control. Revista DYNA, 178, pp. 132–140, 2013.
- [10] Jiménez, M. y Sarmiento, I., Sistema adaptativo de control y optimización del tráfico de un corredor vial semaforizado. Revista DYNA, 169, pp. 71–78, 2011.
- [11] Angel, P. y Marín, L., Un método computacional para la obtención de rutas óptimas en sistemas viales. Revista DYNA, 167, pp. 112–121, 2011.
- [12] Shvetsov, V. and Helbing, D., Macroscopic Dynamics of multilane traffic, Phys. Rev. E 59, pp. 6328-6339, 1999.
- [13] Velasco, R. M. and Saavedra, P., Macroscopic models in traffic flow, Qualitative Theory on Dynamical Systems, 7, 1, pp. 237-252, 2008.
- [14] Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M. M., Towards a realistic microscopic description of highway traffic. J. Phys A: Math. Gen 33, pp. L477-L485, 2000.
- [15] Moreno, F. and Arango, F., A conceptual trajectory multidimensional model: an application to public transportation. Revista DYNA, 166, pp. 142-149, 2011.
- [16] Brakatsoulas, S., Pfoser, D. and Tryfona, N., Modeling, storing, and mining moving object databases 8th International Database Engineering and Applications, pp. 68-77, 2004
- [17] Velasco, R. M. and Saavedra, P., A first order Model in Traffic Flow, Physica D. Nonlinear Phenomena. 228, 2, pp. 153-158, 2007.
- [18] Nelson, P., Synchronized traffic flow from a modified Lighthill-Whitham model. Phys. Rev. E. 61, pp. R6052-R6055, 2000.
- [19] Wagner, C., Hoffmann, C., Sollacher, R., Wagenhuber, J. and Schäurmann, B., Second-order continuum traffic model. Phys. Rev. E. 54, pp. 5073-5085, 1996.
- [20] Kerner, B. and Konhäuser, P., Cluster effect in initially homogeneous traffic flow. Phys. Rev. E. 48, pp. R2335-R2338, 1993.
- [21] Zhang, H., A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. Transportation Research Part B, 36, pp. 275-290, 2002.
- [22] Velasco, R. and Marques, W., Navier-Stokes-like equations for traffic flow. Phys. Rev. E 72, p. 46102, 2005.
- [23] Méndez, A. and Velasco, R., An alternative model in traffic flow equations. Transp. Res. Part B, 42 (9), pp. 782-797, 2008.
- [24] Marques, W. and Velasco, R. An improved second-order continuum traffic model. J. Stat. Mech. p. 2012, 2010.
- [25] Helbing, D., Improved fluid-dynamic model for vehicular traffic, Phys. Rev. E. 51, pp. 3164-3169, 1995.

Impact of electrical energy efficiency programs, case study: Food processing companies in Cuenca, Ecuador

Impacto de programas de eficiencia energética eléctrica, estudio de caso: Empresas alimentarias en Cuenca, Ecuador

Galo Carrillo-Rojas ^a, Juan Andrade-Rodas ^b, Antonio Barragán-Escandón ^c & Ana Astudillo-Alemán ^d

^a M Sc., Dirección de Investigación - Universidad de Cuenca, Ecuador, galo.carrillo@ucuenca.edu.ec

^b M Sc., Facultad de Ingeniería - Universidad de Cuenca, Ecuador, juan.andrade@ucuenca.edu.ec

^c M Sc., Dirección de Investigación - Universidad de Cuenca, Ecuador, tono_barragan@yahoo.es

^d M Sc., Centro de Estudios Ambientales - Universidad de Cuenca, Ecuador, anilua33@hotmail.com

Received: November 12th, 2013. Received in revised form: January 22th, 2014,. Accepted: February 5th, de 2014

Abstract

This exploratory study illustrates the effects of the application of electrical energy efficiency programs in 7 food processing companies in Cuenca, Ecuador. The research encompassed phases of diagnosis, intervention and evaluation. A comparative analysis between the companies was conducted: energy consumption versus product volume, energy-quality analysis, relation between compliance/specific energy consumption, and the impact on CO₂ emissions. Results revealed that the acceptance to the recommendations of savings is biased by the level of investments and the willing/proneness of the administration. The study showed that interventions had a partial effect on the reduction of the specific energy consumption in 4 companies. In addition, it has obtained a positive effect on the power factor correction in one company and an improvement on the load balance in 5. The research showed the existence of a significant reduction of emissions post-intervention, highlighting the effectiveness of the programs.

Keywords: Energy Efficiency, food processing companies, CO₂ emissions.

Resumen

El estudio exploratorio muestra los resultados de aplicación de programas de eficiencia energética eléctrica en 7 empresas alimentarias en Cuenca, Ecuador. La investigación contempló fases de diagnóstico, intervención y evaluación. Se condujo un análisis comparativo entre las empresas: consumo de energía versus producción, análisis de calidad de energía, relación cumplimiento/consumo específico de energía, e impacto sobre emisiones CO₂. Los resultados revelaron que la aceptación hacia las recomendaciones de ahorro, se basa en el nivel de inversión y la voluntad/disponibilidad administrativa. El estudio mostró que las intervenciones tuvieron un efecto parcial sobre la reducción del consumo específico de energía en 4 empresas. Adicionalmente se obtuvo un efecto positivo en la corrección de factor de potencia en una empresa y en la mejora del balance de corriente en 5. La investigación mostró la existencia de una reducción significativa de emisiones post-intervención, resaltando la efectividad de los programas.

Palabras Clave: Eficiencia energética, industria de alimentos, emisiones CO₂.

1. Introducción

Velandia-Durán [1] expone que un sistema de generación termoeléctrico con gas emite entre 0,4 - 0,5 kg de CO₂, mientras que un sistema con carbón emite 1 kg para generar un kWh, y concluye que la energía eléctrica ha sido uno de los avances tecnológicos que ha permitido al hombre un progreso económico, industrial y demográfico durante el último siglo; sin embargo existe preocupación por las implicaciones medioambientales asociadas a la generación de energía, de ahí es necesario razonar que, cuando se consume energía eléctrica innecesariamente, en algún lugar ha aumentado la contaminación atmosférica por emisiones de combustión. La

eficiencia energética eléctrica se plantea como una metodología para el análisis y tratamiento de los problemas del creciente consumo. Por otro lado Linares [2] afirma que el ahorro energético se apunta desde numerosas instituciones, como la alternativa con mayor potencial y rentabilidad para reducir las emisiones de CO₂, y así lo sugiere el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su cuarto informe, cuando estima que se podría ahorrar entre un 7 y 14% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) globales para 2030, con medidas de costo cero, donde la mayoría son prácticas de ahorro. La Agencia Internacional de la Energía (IEA) por su parte, considera que el ahorro y la eficiencia, deben ser capaces de aportar un 43% de la reducción de emisiones prevista en su

escenario BLUE (disminución de GEI en un 50% hasta el año 2050). No obstante, desde el punto de vista macroeconómico y productivo, la intensidad energética a nivel mundial ha tenido un decrecimiento continuo (según último informe del World Energy Council 2004), donde se evidencia que el consumo de energía (térmica y eléctrica) sostuvo un crecimiento más lento que la economía, (cuantificado por reducción del consumo de energía por unidad de producto interno bruto PIB) con una tasa de 1,5% anual, entre 1990 y 2002. Durante el mismo período, la intensidad energética de Europa decreció con una tasa de 0,9% anual, mientras en Latinoamérica y el Caribe decreció con una tasa de 0.5% anual, siendo China el principal responsable con un 6% anual (pasando de una baja productividad energética en 1980 a alcanzar el promedio mundial en 2002). Los estudios obtenidos en Europa han llevado a proponer desde el 2006 una meta del 20% de reducción del consumo hasta el año 2020, basada en la decisión política, que se refleja en la institucionalidad. Esto ha motivado que en países latinoamericanos, los organismos y políticas gubernamentales propongan acciones que incentiven la eficiencia energética en todos los niveles, incluidos la producción industrial. En la actualidad Latinoamérica y el Caribe mantienen como región, una intensidad energética por debajo del promedio mundial; sin embargo han mostrado una pequeña mejora en las dos últimas décadas, con agendas gubernamentales que se enfocan al cambio en la matriz de generación de energía, principalmente hacia el tipo hidroeléctrico [3]. Algunos países de América Latina, no han trascendido con iniciativas de eficiencia, o bien se encuentran en un desarrollo que no muestra aún resultados significativos; particularmente en Ecuador, la intensidad energética en el sector industrial, mantiene una evolución creciente, que se debe entre otros aspectos, al uso de tecnologías energéticas poco eficientes; por ello desde el año 2012, el Gobierno Ecuatoriano busca mejorar esta situación con iniciativas como la construcción de proyectos hidroeléctricos, y con la creación del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) que fomenta la investigación científica en este ámbito en el país [4, 5]. De entre las actividades productivas esenciales, resaltan las que aporta el rubro alimentario por su notable heterogeneidad; esta actividad, tanto a nivel de pequeña como gran empresa, ha enfrentado aspectos que en el mundo globalizado representan un desafío de supervivencia en el mercado, entre ellos se puede anotar: precios internacionales competitivos, importaciones de consumibles extranjeros, acoplamiento a normativas interiores y exteriores de calidad, seguridad y medio ambiente, y normativas y estándares para consumo de energía. Todo este conjunto de aspectos a corto plazo, pueden frenar el crecimiento económico, pues los costos al ajustarse a cada actividad, pueden ser mayores a los esperados; por ende, muchos de los esfuerzos se canalizan solo al cumplimiento normativo ambiental. Con este panorama se percibe que en un alto número de empresas, el uso de la energía se ve como una caja negra, y su uso eficiente rara vez se considera como parte de los ciclos de mejora. En países latinoamericanos y del mundo, se ha logrado éxito en la implementación de programas de eficiencia energética, en diversos rubros de producción, a

través de la innovación de los procesos por tecnologías de gestión aplicadas y con aplicación de normativas tales como ISO 50001, así como la generación de escenarios de consumo por medio de indicadores de eficiencia [6, 7].

El sector industrial-empresarial ecuatoriano, utiliza la electricidad para producir fuerza motriz y calor, esto es 14% del total del consumo por tipo de energía. La tasa de crecimiento estimada hasta el 2020 se prevé de 5,1% (según escenario tendencial). El consumo eléctrico industrial, en la mayoría de empresas distribuidoras incluyendo a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS) representa el 26%; y el 93% de ese consumo se encuentra focalizado en el cantón Cuenca, prov. del Azuay (Población 505.000 hab; 3.476 hab/km²). El Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) reportó en 2007 el valor agregado de la industria manufacturera (sin incluir la refinación de petróleo) como un 13,99% del PIB, siendo la industria de alimentos y bebidas la de mayor aporte (7,83% del PIB); además esta tiene especial importancia pues contribuye con el 55,9% de su valor agregado (\$3.090 millones de dólares americanos). Hacia 2007, la industria de alimentos experimentó una tasa de crecimiento promedio de 7,33%, superior a la tasa de variación promedio general (4,79%) y al crecimiento promedio de la industria manufacturera (5,21%). Estimado entre 2009 y 2011, el 47,31% de los establecimientos del sector de alimentos y bebidas fueron empresas grandes que concentraron el 93,9% de la producción y superan ampliamente a las pequeñas y medianas empresas (PyMEs) [8, 9]; estas últimas han llamado el interés para el estudio, por funcionar generalmente con métodos poco eficientes de producción y acceso limitado a tecnologías de vanguardia. Como punto de partida para la investigación, se estableció una línea base para determinar las condiciones usuales de trabajo y consumo. Considerando normativas locales vigentes de distribución [10] junto a otras internacionales como EN 50160 [11], se ha abordado al interior de 7 PyMEs, un análisis de calidad de energía (mediciones en baja tensión); se ha investigado el cumplimiento de límites de parámetros como tensión, flicker, distorsión armónica, factor de potencia, frecuencia, desbalance de corriente, corriente y tensión por el neutro, y variación de tensión de corta duración. El incumplimiento de límites de regulación, se ha revelado por diversas causas, y por ende su tratamiento ha tenido varios matices, relacionados con la generación de recomendaciones aplicadas en el periodo de intervención. Se han evaluado finalmente cumplimientos, inversiones y consumos específicos, así como tasas de emisión de CO₂ post-intervención.

2 Materiales y métodos

Se empleó un diseño exploratorio y descriptivo en el estudio. La información base se construyó con un análisis previo de los datos 2011 de la Cámara de la Pequeña Industria del Azuay (CAPIA), donde se registraron 27 empresas de rubro alimenticio (17,3% del cantón), así como de otras fuentes (Cámara de Industrias y Registro Municipal), que sumaron 32 PyMEs en total. Luego de una estrategia personal de acercamiento a cada una, se seleccionaron 8 empresas, que se comprometieron por convenio firmado, para acogerse a los PEEE. Estas empresas se acogieron voluntariamente al estudio,

mientras que el resto no mostraron real interés, ni cooperación para participar, debido a políticas internas. Una de las empresas dedicada a Panificación (PN3) abandonó el programa después de 6 meses de iniciado, por lo fue descartada del análisis. Finalmente el estudio se enfocó a un segmento de 7 empresas, distribuido de la siguiente manera: 3 pastificios (fabricación de fideo y pasta pre-cocida), 2 panificadoras (fabricación de pan y

pastelería a nivel industrial) y 2 fábricas de embutidos cárnicos. Por convenio de confidencialidad, se han reservado los nombres de las empresas investigadas, y se ha asignado la siguiente codificación: Pastificios: PS1, PS2 y PS3, Panificadoras: PN1 y PN2, y Fabricas de Embutidos Cárnicos: CR1 y CR2. Las características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Características de las empresas de alimentos investigadas

Código PyMEs	Actividad Productiva	Horario Trabajo (Horas/Días)	No. de Trabajadores (Administrativos /Trabajadores)	Carga Base Estimada (Kwh/mes)	Distrib. Carga Base (%Maquinas /%Iluminación)
PS1	Pastificio	8 / 5	8 / 34	81668	94/6
PS2	Pastificio	8 / 5	21 / 34	155799	99/1
PS3	Pastificio	8 / 5	8 / 10	14764	99/1
PN1	Panificadoras	8 / 5	7 / 18	18640	89/11
PN2	Panificadoras	8 / 5	3 / 9	1440	91/9
CR1	Embutidos	24 / 6	20 / 68	160235	99/1
CR2	Embutidos	8 / 5	19 / 16	14131	96/4

2.1 Estructura de los PEEE

Cada PEEE se aplicó en tres fases secuenciales:

F1) Diagnóstico de la situación productiva, consumo eléctrico, instalaciones/carga base y parámetros de calidad eléctrica de la empresa; F2) Intervención/aplicación de medidas correctivas y recomendaciones pro-ahorro de energía basadas en los hallazgos del diagnóstico (con una duración de entre 3 a 6 meses); y F3) Evaluación de resultados post-intervención con análisis y comparativa estadística (con una duración de entre 6 a 9 meses). Tanto en F1 como en F3, se realizaron las siguientes actividades:

1) Recopilación y actualización de información general por medio de lista de chequeo y entrevista.

2) Recopilación de histórico de planificación y facturación mensual (Datos EERCS) [12].

3) Recopilación de información de producción y carga base estimada de maquinaria, equipos, iluminación etc.

4) Monitoreo de parámetros de calidad energética que se realizó con un equipo analizador trifásico de calidad de energía FLUKE 435 – IEC 61000-4-30 Class A Compliant (Precisión 0,1%), con sondas de tensión (TLS430) y corriente (i430flex-TF), emplazado en los tableros de distribución de cada PyME y conectado de acuerdo a especificaciones del fabricante y a las del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) estándares: 1100-2005, 1159-1995, 739-1995, en cableado trifásico (L1-L2-L3), neutro y tierra. Los monitoreos se realizaron por un periodo de 7 días, con intervalo de muestreo de 10 minutos según estándar EN 50160 y medición de las siguientes variables: Nivel de voltaje (% ΔV_k), Flicker (PST), Flicker (PLT), Distorsión armónica (THD), Factor de Potencia (FP), Cos-phi (Cos ϕ), Frecuencia (f) y Desbalance de corriente (%). Para el análisis de la información se utilizó software Fluke PowerLog ver.2.9.2, Fluke View ver.3.34.1, IBM PASW Statistics ver.18, Microsoft Excel 2010 y Grapher ver.9.4.819.

Tabla 2.

Descripción de variables sujetas a modificación, criterios de conformidad y formas de evaluación

Variable Sujeta a Modificación	Criterios de Conformidad	Forma de Evaluación	PS1	PS2	PS3	PN1	PN2	CR1	CR2
Niveles de tensión	Grado de desbalance	R y P ¹	X		X				
Niveles de corriente	Grado de desbalance	R y P ¹	X	X	X	X	X		X
Flickers	Presencia o Ausencia	R y P ¹			X ²				
Armónicos	Presencia o Ausencia	R y P ¹							
Factor de potencia	Presencia o Ausencia	R y P ¹	X	X	X	X	X	X	X
Frecuencia	Presencia o Ausencia	R y P ¹							
Demanda Máxima	Sobrecarga	P ¹		X			X		
Tensión/corriente en fase neutra	Grado de perdida	P ¹	X	X	X	X	X	X	X
Energía Total	Grado de perdida	P ¹	X	X	X	X	X	X	X
Huecos y picos	Presencia o Ausencia	P ¹			X				
Estado Instalaciones	Reemplazo de maquinaria	P ¹	X	X	X	X	X	X	X

R= Regulatoria, P= Ponderada. ¹ La evaluación ponderada se realizó considerando la dimensión del hallazgo/falla frente a: carga base total instalada, perdidas de energía por calentamiento de conductores y equipos, y efecto en la reducción de vida útil del equipo/sistema.

² La presencia de flickers en PS3 es de tipo PLT, es decir no está regularizada (ver Tabla 1) pero ha sido considerada para modificación.

Tabla 3.
Recomendaciones de los PEEE en la fase de intervención/aplicación

Recomendaciones basadas en hallazgos de los PEEE	PS1	PS2	PS3	PN1	PN2	CR1	CR2
Encendido progresivo de equipos grandes consumidores; es decir, evitando la simultaneidad en el arranque general	X	X	X	X	X	X	X
Instalación/revisión de los bancos de condensadores y desconexión en horas no productivas. Redistribución de cargas	X	X	X	X	X	X	X
Reemplazo de cableado inadecuado (calibres, empalmes, aislamientos)		X	X		X	X	
Reemplazo de luminarias incandescentes por ahorradoras y fluorescentes de balastro electrónico	X	X	X	X	X	X	X
Sustitución parcial de motores trifásicos convencionales por motores eficientes						X	X
Mejora de conexiones a tierra	X	X	X			X	

En F1 el diagnóstico permitió generar un listado de variables eléctricas de interés para la intervención (ver Tabla 2), las que se analizaron sistemáticamente para propender una mayor aceptación y factibilidad de aplicación durante F2. En la Tabla 2 los “Criterios de Conformidad” se consideraron de acuerdo a metodología validada de auditoría de energía eléctrica [13] y la “Forma de Evaluación” se abordó de acuerdo a aspectos regulatorios [10, 11] y ponderados [14, 15].

La línea base para la fase de intervención (F2) se fundamentó en los hallazgos de la fase de diagnóstico (F1), y su pertinencia fue relativa a la observación de: Costumbres inadecuadas de encendido de maquinaria, Desbalances de cargas trifásicas, Poco o nulo mantenimiento de bancos de condensadores, Zonas con cableado y empalmado deficientes, Luminaria poco eficiente, Conexiones a tierra inadecuadas y Motores trifásicos ineficientes; considerado esto se generó un

listado de recomendaciones potenciales (ver Tabla 3), mismas que las empresas aplicaron en un periodo de tiempo variable (3 a 6 meses) según la disponibilidad de recursos y grado de compromiso. Concluido lo anterior, se analizó un escenario de “modificaciones esperadas” (basadas en los hallazgos de las tablas 2 y 3), versus “modificaciones observadas”, considerando el grado de cumplimiento, inversiones en mejoras y consumos específicos.

Los resultados pre y post-intervención se analizaron como el impacto en la generación de GEI al ambiente (Ton CO₂) de acuerdo al Factor de Emisión (FE) del Sistema Nacional Interconectado Año 2012 [16]. Los resultados del estudio para cada PyME dimensionaron el impacto de los PEEE de modo individual, y su efecto final fue dependiente de decisiones administrativas, ejecutivas, participativas y económicas internas.

Tabla 4.
Diagnóstico inicial de calidad de energía en las PyMEs

Parámetro	Indicador	Límites	PS1	PS2	PS3	PN1	PN2	CR1	CR2
Nivel de voltaje	$\frac{\Delta V_k(\%)}{V_k - V_n} \cdot 100$	$\pm 10\% V_N$	NC*	C	NC*	C	C	C	C
Flicker	PST	PST > 1 en t > 5%	C	C	C	C	C	C	C
Flicker	PLT	N/A*	N/A						
Distorsión Armónica	$\frac{THD}{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} V_i^2}} \cdot 100$	$8\% \cdot V_N$	C	C	C	C	C	C	C
Factor de Potencia	FP	FP < 0.92 en t > 5%	C	C	C	C	NC	C	C
Cos (phi)	Cos(φ)	Cos(φ) < 0.92 en t > 5%	C	C	C	C	NC	C	C
Frecuencia	f	59.8Hz < f < 60.2Hz	C	C	C	C	C	C	C
Desbalance de corriente	[%]	< 20%	C	C	C	C	NC	C	C

C = Cumple; NC = No Cumple.

* No se consideró para la intervención de los PEEE por estar fuera del alcance de mejoras sobre las PyMEs.

3 Resultados

3.1 Resultados Pre-intervención

En la Tabla 4 se muestran los resultados del diagnóstico (F1); los que fueron concluyentes en el sentido de que la EERCS satisface los índices de calidad regulados, excepto los de nivel de voltaje para PS1 y PS3. Sin embargo aquellos parámetros que son intrínsecos de cada industria en el sentido de la forma de consumo e instalaciones, presentaron un comportamiento que ha sido abordado en el estudio. Los parámetros de Factor de potencia, $\text{Cos } \phi$ y Desbalance de corriente fueron de mejora potencial en cada PyME al aplicar los PEEE, mientras que los demás sirvieron prioritariamente para verificar la calidad del servicio, y no se consideraron para las fases de intervención y evaluación.

3.2 Resultados Post-intervención

3.2.1 Cumplimiento e Inversiones

El análisis de cumplimiento e inversiones de las PyMEs posterior a F2, consideró las variables sujetas a modificación (mostradas en la Tabla 2) en forma de resultados esperados y observados, así como las inversiones que se realizaron para alcanzar estas modificaciones (ver Figura 1). Se puede apreciar que ninguna de las empresas alcanzó un cumplimiento total de modificaciones esperadas, en forma de ratio Esperado/Observado esto fue: PS1=5,5/6, PS2=4,5/6, PS3=3,5/8, PN1=2/5, PN2=5,5/6, CR1=1/4 y CR2=3,5/5. En relación a las inversiones esperadas versus las observadas post-intervención, se destaca que las empresas del rubro “Pastificio” tuvieron un grado de aceptación mayor, comparable solo con una empresa cárnica (CR2).

3.2.2 Consumos Específicos versus Cumplimiento

Se analizó estadísticamente el consumo específico de energía (kWh/kg) pre y post-intervención (Figura 2), para posteriormente compararlo con un porcentaje general de cumplimiento alcanzado (análisis 3.2.1.). El gráfico boxplot muestra reducciones del consumo específico medio en PS1 (0,17%), PS3 (15,11%), PN2 (4,76%) y CR1 (14,41%), así como reducciones en los máximos y cuartiles superiores; mientras que se observó un aumento en PS2, PN1 y CR2. La Figura 3 muestra el grado de cumplimiento de recomendaciones frente al potencial de ahorro observado. Se determinó que para PS1 y PN2 a pesar de haber cumplido el plan en casi un 92%, su reducción del consumo (kWh/kg) fue poco significativo, y se observó que en empresas como PS3 y CR1 que sin haber cumplido significativamente todas las recomendaciones, mostraron reducciones mayores al 14% en consumo específico. Para el caso de las restantes PyMEs se observó un incremento variado en el consumo.

Las variables de calidad de energía que fueron analizadas posterior a la fase de intervención, fueron el

Factor de Potencia (FP) y el Desbalance de Corriente, por depender intrínsecamente de las modificaciones esperadas.

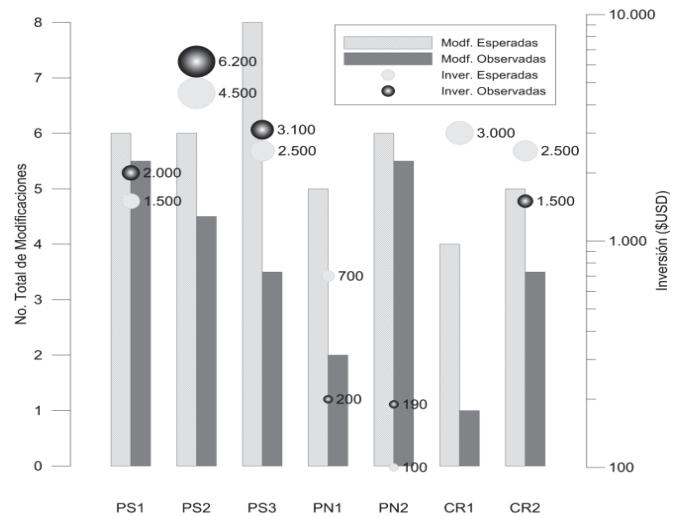


Figura 1. Relación entre modificaciones esperadas versus observadas post-intervención, y cuantificación de inversiones

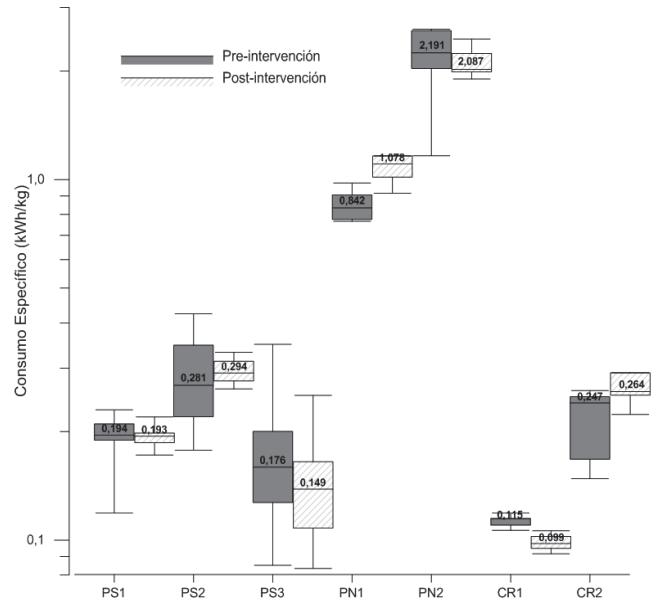


Figura 2. Consumos específicos de las PyMEs pre y post-intervención

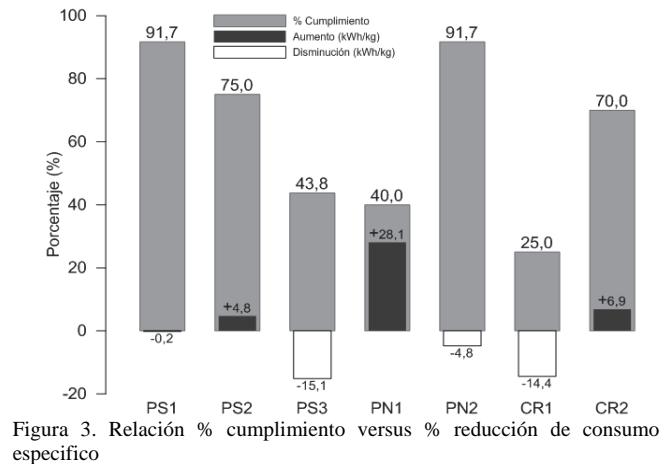


Figura 3. Relación % cumplimiento versus % reducción de consumo específico

3.2.3 Factor de Potencia

Se escogió el FP en lugar del $\cos \phi$, ya que considera los efectos de distorsión armónica, es decir, al usar el FP implícitamente se incluye el efecto de los armónicos generados. Como caso representativo se muestra la situación de la empresa PN2, (92% de cumplimiento de recomendaciones, las cuales incluyeron la revisión/mejora de su banco de condensadores); la Figura 4 muestra los resultados del análisis de FP provenientes del monitoreo de calidad de energía. En el periodo post-intervención se observó un incremento significativo del FP en las fases L2 y L3 (medios, cuartiles y máximos), mientras que para L1 el valor medio decreció, aunque mostrando un incremento del máximo y cuartil superior. Esta mejora repercutió en la eliminación de penalizaciones por bajo FP en la facturación de PN2. El resto de PyMEs no manifestaron cambios en el FP post-intervención.

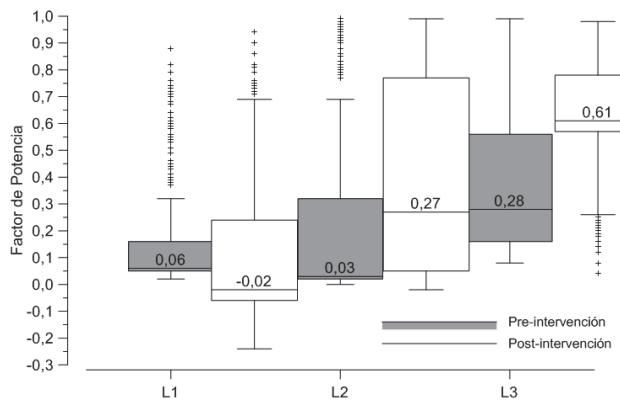


Figura 4. Empresaria PN2 - Comportamiento del monitoreo de FP en las tres fases, antes y después de intervención

3.2.4 Desbalance de Corriente

La Tabla 5 muestra el comportamiento de desbalance de corriente para cada empresa, antes y después de la intervención. Se consideró un análisis de correlación lineal entre fases, y se observó una notable mejora en el coeficiente de correlación para PN2 y mejoras leves para

PS2, PS3, PN1 y CR1 después de la intervención. Sin embargo, para el caso de CR2 se observó un deterioro de la correlación en L1-L2 y L1-L3, que fue debido a modificaciones no contempladas por los PEEE en esta empresa, y que no pudieron ser corregidas oportunamente, repercutiendo en los resultados de esta empresa. Finalmente en PS1 se observó una leve disminución. La aplicación de medidas específicas, tales como la instalación/revisión de bancos de condensadores, desconexión en horas no productivas, y la redistribución de cargas dio como resultado el mejoramiento del balance de corrientes en 5 de las 7 PyMEs.

Tabla 5.
Factores de correlación de Corrientes (entre fases) pres y post intervención

	Valor R pre-intervención			Valor R post-intervención		
	L1-L2	L1-L3	L2-L3	L1-L2	L1-L3	L2-L3
PS1	0,999	1,000	0,999	0,995	0,990	0,986
PS2	0,986	0,984	0,993	0,991	0,992	0,993
PS3	0,994	0,979	0,987	0,997	0,995	0,994
PN1	0,962	0,968	0,959	0,976	0,976	0,969
PN2	0,774	0,245	0,117	0,919	0,845	0,897
CR1	0,987	0,993	0,998	0,991	0,996	0,998
CR2	0,932	0,902	0,880	0,523	0,441	0,970

* Los valores resaltados muestran una mejora de correlación

3.2.5 Impacto de los PEEE sobre el escenario de emisiones

La cuantificación de emisiones CO₂ a la atmósfera por consumo de energía (origen termo e hidroeléctrico), depende del Factor de Emisión (FE) del Ecuador, (0,460 tCO₂/MWh para 2012). Se ha obtenido las tasas de emisión de CO₂ por kg de producto de cada PyME, antes y después de la intervención, considerando los mismos meses de producción del año previo, de modo que exista concordancia en la variabilidad productiva anual (ver Tabla 6). Al observar los valores de reducción de emisiones (kgCO₂/kg) y sus porcentajes, y compararlos con el grado de cumplimiento, se revela el mismo comportamiento que en el estudio del apartado “3.2.2. Consumos Específicos versus Cumplimiento”.

Tabla 6.

Tasa de emisiones y potencial de reducción

	Tasa emisión Pre-interv. (kgCO ₂ /kg)	Tasa emisión Post-interv. (kgCO ₂ /kg)	Diferencia (kgCO ₂ /kg)	Porcentaje Reducción	Resultado	% Cumplimiento Recomendacion es
PS1	0,0890	0,0888	-0,0002	-0,17%	Reduce	91,7
PS2	0,1290	0,1351	0,0061	+4,75%	Aumenta	75,0
PS3	0,0809	0,0687	-0,0122	-15,11%	Reduce	43,8
PN1	0,3870	0,4958	0,1088	+28,10%	Aumenta	40,0
PN2	1,0071	0,9592	-0,0479	-4,76%	Reduce	91,7
CR1	0,0530	0,0454	-0,0076	-14,41%	Reduce	25,0
CR2	0,1134	0,1213	0,0079	+6,90%	Aumenta	70,0

Finalmente al analizar lo anterior en función del volumen total de producción de cada PyME post-intervención, se cuantificó la cantidad de emisiones de CO₂ (ton) generadas por consumo eléctrico (ver Tabla 7). Los resultados muestran que

la reducción en PS1, PS3, PN2 y CR1 asciende a 36,9 toneladas de CO₂, mientras que las emitidas en las demás ascienden a un total de 15,4 tCO₂, lo cual supone un efecto positivo de los PEEE en el escenario de emisiones de GEI.

Tabla 7.
Emisiones Post-intervención

	Producción post-interv. (ton)	Emisión CO ₂ post-interv. (ton)
PS1	2318,9	-0,3
PS2	1101,0	+6,7
PS3	603,2	-7,4
PN1	48,6	+5,3
PN2	5,0	-0,2
CR1	3799,5	-29,0
CR2	436,8	+3,4

4. Discusion

Del estudio se desprende que la aceptación de las PyMEs para acogerse a recomendaciones de los PEEE, está sesgada a costos económicos involucrados y a la voluntad/disponibilidad de los mandos empresariales; en este sentido se halló que el rubro de “Pastorales” tuvo una mejor relación cumplimiento/inversiones que los otros dos rubros. Se presume que los PEEE tuvieron un efecto de reducción del consumo específico de energía en 4 de 7 empresas, sin embargo al comparar esto con el grado de cumplimiento de recomendaciones, se observó que aquellas empresas con mayor cumplimiento, no necesariamente mostraron una reducción significativa de consumo específico (p.ej.: PS1 y PN2), mientras que algunas PyMEs cuyo cumplimiento fue inferior, mostraron una reducción parcial del consumo, lo que a criterio de los autores se considera como evidencia de que el cumplimiento completo de un plan de mejoras, no necesariamente es garantía de reducción tangible del consumo específico, ya que esto dependería de factores relacionados con la naturaleza de las medidas que se hayan tomado, es decir, de aquellas recomendaciones que afectan directamente a la reducción de consumo (tales como reemplazo de equipos/installaciones ineficientes, corrección de FP, encendido progresivo de grandes consumidores, y especialmente los métodos / costumbres de producción). La intervención tuvo un efecto positivo en la corrección de factor de potencia en PN2, así como en la mejora del balance de corriente en 5 de 7 PyMEs; autores como Aranda Usón et al., indican que en el sector alimentario se puede lograr ahorros de energía de hasta un 14% mediante optimización de la factura y compensando la energía reactiva con bancos de condensadores [7]. Otros estudios demuestran que en la industria de cárnicos la mejora es significativa cuando se han aplicado mejoras tecnológicas en sistemas de aire comprimido, refrigeración e iluminación [17]. Adicionalmente se pudo identificar que casi todas las PyMEs tienen un sobre-dimensionamiento en infraestructura, la cual está diseñada para acoger la producción en períodos de sobre-demanda estacional (ej.: época de navidad) y esto puede repercutir en problemas tales como desbalance de corriente. Al realizar los análisis pre y post-intervención se observó un comportamiento estacional en la producción, lo cual no necesariamente se refleja en las mediciones de calidad de energía; por ello se determinó que es necesario que las PyMEs apliquen una cultura de diseño de emprendimiento, para que desde el

inicio de sus actividades mantengan un crecimiento sostenido de carga instalada; esto tiene impacto directo en la eficiencia energética, ya que el trabajo de máquinas y equipos se encontraría más cerca de su punto óptimo. También se ha podido discernir que la energía proporcionada por la empresa distribuidora satisface lo indicado en las normas, y que la mayoría de problemas se remiten al interior de cada PyME. Estos problemas, en la generalidad de los casos, tienen soluciones técnicamente probadas que demandan inversiones relativamente bajas, como se observó en las acciones de la intervención (Tabla 3 y Figura 1); sin embargo, la falta de visión de la administración interna hace que este tipo de esfuerzos e inversiones sean pospuestos hasta que se justifique una intervención urgente. La evaluación reveló un grado de desbalance fasorial de corriente en casi todas las empresas, lo cual es llamativo, si se considera que el levantamiento de carga base determinó que en promedio el 95% de la carga instalada es trifásica (tabla 1), esto hace suponer que el problema puede deberse a una práctica generalizada de reparar los motores averiados (rebobinado) antes que remplazarlos por nuevos, algunos estudios demuestran la ventaja económica de usar una política de “reemplazar” antes que una de “reparar” [18]. Desde el punto de vista de impacto sobre la generación de emisiones de CO₂, se observó que los potenciales de reducción de emisión hallados, no necesariamente tienen una relación estrecha con el grado de cumplimiento del plan de mejoras. No obstante, al calcular las emisiones post-intervención en función del volumen de producción, se evidenció una reducción significativa en algunas PyMEs, lo cual respalda la efectividad de este tipo de intervenciones que llevan un beneficio ambiental intrínseco. En un estudio de caso realizado en panificadoras de Australia, se muestra que luego de aplicar buenas prácticas de eficiencia, se obtuvieron reducciones del consumo de energía en alrededor de 7% con una reducción de 48% en las emisiones GEI, realizando modificaciones en hornos, aire acondicionado e iluminación; estos resultados comparados con los del presente estudio, son superiores [19].

5. Conclusiones

El estudio ha abordado una muestra pequeña de empresas, por lo que en un futuro, sus resultados podrían ser debatidos y comprobados en investigaciones de mayor alcance. Se ha demostrado que la gestión energética ayuda a las organizaciones a reducir costos e impactos ambientales, sin importar su tamaño. En este sentido, la hipótesis es que en algunas empresas, aun cuando está garantizada la rentabilidad económica, esta puede ser mejorada si se ejecutan simples acciones tendientes a mejorar la calidad de energía. Sin embargo, y a pesar de que es extremadamente raro que no se logre una reducción de costos al aplicar algún tipo de programa de mejora energética, se comprueba, que la dirección de la organización difícilmente admite esta realidad [20, 21], lo cual se revela también aquí. Es por lo tanto pertinente emprender políticas de eficiencia en este sector de la economía, para lograr cambios sustanciales en

índices de consumo y optimizaciones impostergables. Se requiere de parte de las instituciones gubernamentales el fomento de políticas de eficiencia ambiental y rankings de eficiencia industrial, como se realiza en otros países para diferentes procesos productivos, por ejemplo en industrias manufactureras de Colombia [22, 23]. Es necesario profundizar en estudios enfocados al desarrollo de cultura de monitoreo y control, así como buenas prácticas energéticas para mejorar el consumo de energía en PyMEs [24, 25]. Finalmente, el estudio resalta la importancia de generar investigación de los impactos reales de programas de eficiencia energética y otras herramientas de gestión ambiental, con el fin de validar su pertinencia, aplicabilidad y eficacia en actividades productivas similares en Latinoamérica.

6. Agradecimiento

El presente manuscrito se desarrolló en el contexto del Proyecto “Aplicación de Programas de Eficiencia Energética Eléctrica en Empresas de Alimentos de la ciudad de Cuenca 2011 – 2012”, financiado por la Dirección de Investigación (DIUC) de la Universidad de Cuenca. Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad y sus instancias: DIUC, Centro de Estudios Ambientales (CEA) y Facultad de Ingeniería, así como a las empresas participantes, estudiantes de pasantía y tesistas, por el apoyo y respaldo en esta investigación. Nuestra gratitud al profesor Dr. Jan Feyen, asesor científico Prometeo/SENESCYT por la revisión y corrección del manuscrito.

Referencias

- [1] Velandia Durán, E.A., Roa Martínez, L.X., and Garzón Basto, S.L., "La cultura: un aspecto determinante en el control de los procesos contaminantes," *J. Épsilon - Universidad de La Salle*, pp. 205-214, 2009.
- [2] Linares, P., "Eficiencia energética y medio ambiente," *J. de Economía ICE*, pp. 75-92, 2009.
- [3] WEC, 2013 World Energy Issues Monitor. 2013. Disponible en: <http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/02/2013-World-Energy-Issues-Monitor-Report-Feb2013.pdf>. [Citado 14 de agosto de 2013].
- [4] SENPLADES, "Plan Nacional para el Buen Vivir 2009-2013, Políticas 2.6 y 4.3," ed: Secretaría Nacional de Planificación, Gobierno del Ecuador, 2009.
- [5] Albornoz, E. and MEER, "Instrumentos e Incentivos para la Promoción de Eficiencia Energética," 1er Encuentro Internacional Empresas Públicas Eficientes, Quito, 2012.
- [6] Castrillon, R., González, A., and Quispe, E., "Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión integral de la energía," *J. Dyna*, vol. 80, pp. 115-123, 2013.
- [7] Aranda Usón, A., Scarpellini, S., and Feijoó, M., "Análisis de la eficiencia energética en la industria española y su potencial de ahorro," *J. Economía Industrial*, pp. 11-24, 2003.
- [8] Carrillo, D. and INEC, "La Industria de alimentos y bebidas en el Ecuador," Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2009.
- [9] Calle, J. and Chica, F., "Situación Energética del Cantón Cuenca y líneas de acción preferentes para fortalecer la investigación y el desarrollo a nivel local," *J. INGENIUS*, vol. 6, pp. 85-95, 2011.
- [10] CONELEC, Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución. Regulación CONELEC 004/01. 2001. Disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/normativa/CalidadDeServicio.doc>. [Citado 30 de enero 2012].
- [11] CENELEC, "EN 50160: European standard for voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems," ed: CENELEC TCX., 2006.
- [12] EERCS. Información de Planificación Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR. 2013. Disponible en: <http://www.centrosur.com.ec/información/consultas-line/consultar-planillas/> [Citado Desde enero 2012 hasta abril 2013].
- [13] Thumann, A. and Younger, W.J., *Handbook of Energy Audits*, Seventh Edition ed.: The Fairmont Press, Inc., 2007.
- [14] Sumper, A. and Baggini, A., *Electrical Energy Efficiency: Technologies and Applications*: Wiley & Sons, Ltd., Pub., 2012.
- [15] Wang, L., *Energy Efficiency and Management in Food Processing Facilities*: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008.
- [16] MEER, MAE, CONELEC, and CENACE, "Informe: Factor de Emisión del Sistema Nacional Interconectado al Año 2012," ed: Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, Ecuador, 2012, p. 18.
- [17] AlQdah, K.S., "Prospects of energy savings in the national meat processing factory," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 32, pp. 670-681, 2013.
- [18] Consortium for Energy Efficiency, The 1*2*3 Approach to Motor Management. 2007. Disponible en: http://www.motorsmatter.org/tools/123_UsersManual.pdf. [Citado 15 de septiembre de 2013].
- [19] Department of Industry Tourism and Resources, Case Study: Achieving Results in the Bread Baking Sector. 2003. Disponible en: http://www.ret.gov.au/energy/Documents/best-practice-guides/energy_case_studies_bakersdelight.pdf. [Citado 01 de octubre de 2013].
- [20] Aderemi, A., Ilori, M., Aderemi, H., and Akinbami, J., "Assessment of electrical energy use efficiency in Nigeria food industry," *African J. of Food Science*, vol. 3, pp. 206-216, 2009.
- [21] Aderemi, A.O., Aderemi, H.O., and Akinbami, J.F.K., *Electrical Energy Use Efficiency: Case of food companies in a developing economy*: Lap Lambert Acad. Publ. AG & Co. KG, 2010.
- [22] Pardo Martínez, C.I., "Factors influencing energy efficiency in the German and Colombian manufacturing industries," in *Energy Efficiency*, Centro de Investigaciones VIDE, Ed., ed: SCIYO, 2010.
- [23] Posada, E., "Rational energy use and waste minimization goals based on the use of production data," *J. Dyna*, vol. 75, pp. 19-27, 2008.
- [24] AChEE and Chilealimentos A.G., *Manual de Eficiencia Energética en la Industria de los Alimentos Elaborados*. 2012. Disponible en: http://www.chilealimentos.com/medios/LaAsociacion/NoticiasChilealimentos2012/MANUAL_DE_Eficiencia_Energetica_Chilealimentos.pdf. [Citado 01 de octubre de 2013].
- [25] Fritzson, A. and Berntsson, T., "Energy efficiency in the slaughter and meat processing industry—opportunities for improvements in future energy markets," *J. of Food Engineering*, vol. 77, pp. 792-802, 2006.

Development of an application for quick comparison of pigments from their colorimetric coordinates

Desarrollo de una aplicación para la comparación rápida de pigmentos a partir de sus coordenadas colorimétricas

Jessica Ingrid Piñeiro-Di-Blasi ^a, Javier Martínez-Torres ^b, Jose Santiago Pozo-Antonio ^c, Carla Iglesias-Comesaña ^d, Luciano Cuesta ^e, Javier Taboada-Castro ^f, Pablo Gajino-Núñez ^g & Eva Tresaco-Vidaller ^h

^a MSc. Universidad de Vigo, Vigo, España. jpdiblasi@uvigo.es

^b PhD. Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Zaragoza, España. jmtorres@unizar.es

^c PhD. Universidad de Vigo, Vigo, España. ipozo@uvigo.es

^d MSc. Universidad de Vigo, Vigo, España. carlaiglesias@uvigo.es

^e PhD. PROMINDSA (Productos Minerales para la Industria, S.A.), Zaragoza, España. lucianocuesta@promindsa.com

^f PhD. Universidad de Vigo, Vigo, España. jtaboada@uvigo.es

^g BSc. Asociación Científico Tecnológica RED. Vigo, España. pablo.gajino@actred.es

^h PhD. Centro Universitario de la Defensa, Academia General Militar, Zaragoza, España. etresaco@unizar.es

Received: July 3th, 2013. Received in revised form: November 12th, 2013. Accepted: December 11th, 2013

Abstract

Pigments production for use in different kinds of industries (paints, cement, fertilizer, glass, etc.) is a booming sector that invoice million worldwide. So, all those applications that increase efficiency and effectiveness in daily work within the industry agree to be undertaken. Within this line, in this research, the development of an application is presented for comparing a fast and simple way of pigments based on its colour information. This application was developed for the company PROMINDSA SA and allows the user to perform a visual comparison considering the three spatial dimensions, and perform further analysis in two dimensions and one dimension for each of the components of the CIELAB colour space.

Keywords: CIELAB, Colour comparison, Pigment.

Resumen

La producción de pigmentos para su aplicación en diversos tipos de industrias (pinturas, cemento, fertilizantes, vidrios, etc.) se trata de un sector en auge que factura millones de euros en todo el mundo. Así, todas aquellas aplicaciones que aumenten la eficiencia y eficacia en el trabajo cotidiano dentro de esta industria convienen que sean desarrolladas. Dentro de esta línea, en el siguiente trabajo se presenta una técnica para la comparación de un modo rápido y sencillo de pigmentos en base a su información de color. Esta aplicación fue desarrollada para la empresa PROMINDSA SA y permite al usuario realizar una comparación visual teniendo en cuenta las tres dimensiones espaciales, así como realizar un análisis más exhaustivo en dos dimensiones y una dimensión para cada una de las componentes del color del espacio CIELAB.

Palabras Clave: CIELAB, Comparación de color, Pigmento.

1. Introducción

A pesar de que el empleo de la evaluación del color como herramienta de control de calidad se viene realizando desde 1931, cuando la Commision Internationale de l'Eclairage (CIE) hace su primera recomendación sobre los sistemas de especificación del color (espacio CIE XYZ), no es hasta 1960, con el desarrollo de la digitalización, cuando se comienza a investigar más profundamente en este aspecto [1-4]. En dicho espacio, cualquier color en las mismas condiciones (fuente de luz y circunstancias de observación) puede ser medido y descrito por un conjunto de valores

triestímulos (XYZ) que indican los porcentajes de rojo, verde y azul, respectivamente, que lo constituyen. La medición y representación de estos valores busca la obtención de un único valor cuantificado y, en muchas ocasiones, lo que se pretende es la comparación entre un color patrón y diversas muestras aceptando ciertas tolerancias.

Tras su publicación, surgieron investigaciones que demuestran que el espacio CIE XYZ no se corresponde acertadamente con las diferencias de color percibidas por el ser humano, al tratarse de una apreciación extremadamente no-uniforme [5-8]. Nace de esta manera en 1976 el espacio

CIELAB, caracterizado por su no-linealidad. A partir de este momento se propone el uso de linealizaciones globales y locales, sin comprometer la uniformidad perceptual [9]. Desde su creación, ha sido el espacio más empleado hasta el momento, sufriendo diversas modificaciones, en función de la industria y de las actividades en las que se utilice, como es el caso de CMC para la industria textil [10] y CIE94 para la industria de las pinturas [11]. Con el fin de unificar todas estas fórmulas, la CIE se reúne en Rochester (E.E.U.U.) dando lugar en 2001 a la presentación de CIEDE2000, que toma como base el espacio CIELAB y establece 5 nuevas modificaciones. A pesar de todo, el espacio CIELAB continúa siendo el más empleado en todos los sectores [12, 13].

Dentro del dicho espacio, tres de las coordenadas registradas son: L^* , a^* y b^* (CIE, 1976). La coordenada L^*

representa la luminosidad, tomando valores desde 0 (negro) a 100 (blanco), mientras que las coordenadas a^* y b^* expresan la rueda del color, tomando valores de $+a^*$ (rojo) hasta $-a^*$ (verde) y de $+b^*$ (amarillo) hasta $-b^*$ (azul). De esta manera se pueden calcular las variaciones $\Delta L^* = L^* - L^*_{00}$, $\Delta a^* = a^* - a^*_{00}$ y $\Delta b^* = b^* - b^*_{00}$. Estos valores son usados para hallar el cambio global del color entre dos tintes (ΔE^*_{ab}). La variación ΔE^*_{ab} , es calculada como la distancia euclídea entre los puntos resultantes de su representación en el espacio, por lo que $\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$. Valores bajos de ΔE^*_{ab} se corresponden con pequeñas diferencias de color [3].

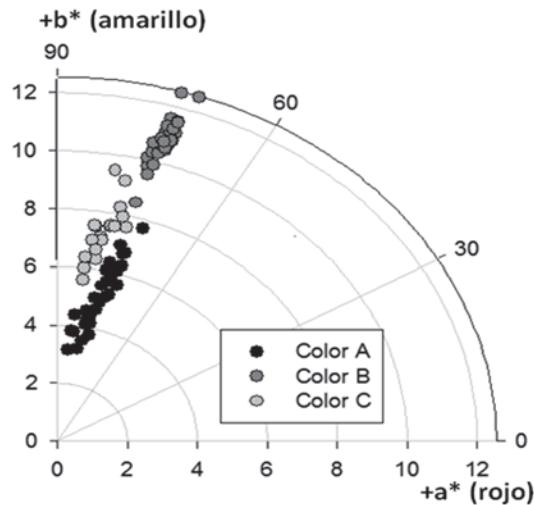
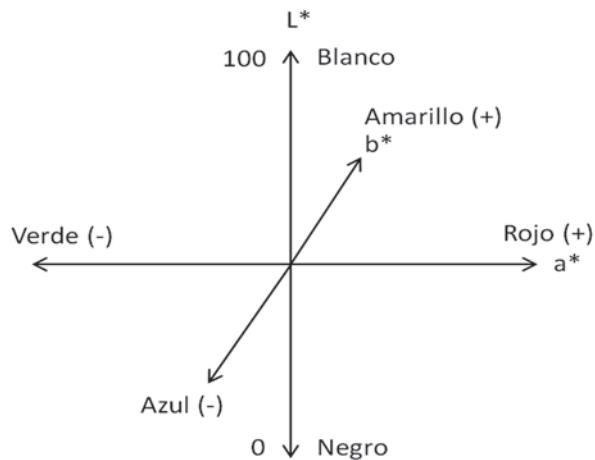


Figura 1. Ejemplo de gráficas de representación del espacio CIELAB. En la figura de la izquierda se presenta un gráfico a^* , b^* de 3 colores. La figura de la derecha representa tridimensionalmente el espacio.

Para realizar las mediciones de cada uno de los parámetros empleando colorímetros o espectrofotómetros, es importante determinar unas condiciones de medida (fuente de luz y circunstancias de observación). Generalmente dentro de las fuentes de luz [3], se debe escoger entre las siguientes alternativas [3]: Iluminante Standard tipo A, que se basa en la bombilla incandescente de filamento de tungsteno y cuya distribución espectral se corresponde con la de un cuerpo negro a unos 2856 K; tipo B, que representa la luz solar directa, con una temperatura de color correlativa de 4900 K; tipo C, representación de la luz media del día, con una temperatura de color correlacionada de 6800 K sin incluir la radiación UV; y tipo D, que se corresponde con la serie de luz de día (*daylight*) incluyendo la radiación UV y se representa con la letra D mayúscula y dos cifras que indican la temperatura aproximada del color (por ejemplo, D50 tiene una temperatura de unos 5000 K). Dentro de esta última fuente la más habitual es la D65, que representa la luz al mediodía en Europa noroccidental. Cuando esta no puede ser empleada, se recomienda el uso de D50, D55 o D75. Dentro de las circunstancias de observación, las consideraciones a tener en cuenta son: la inclusión o no del componente especular (*Spectral Component Included* (SCI) y *Spectral Component*



Excluded (SCE)); el diámetro del spot, que hace referencia al área de medición del color; y el ángulo de observación, definido como la visión normal del color de la media de la población humana. El cálculo de esta media es necesario debido a que la sensibilidad del ojo cambia según el ángulo de observación, por esta razón, la CIE definió en 1931 un observador a 2° y, en 1964, a 10°.

Una vez registrados los valores de las coordenadas del color, las formas más habituales de representación son gráficos bidimensionales a^* y b^* y gráficos de representación tridimensional L^* , a^* y b^* (Figura 1).

Hoy en día la ciencia del color es empleada principalmente en los sectores de pintura, en la industria textil y en el área de la construcción (por ejemplo, investigaciones sobre la calidad de roca ornamental [14] o la durabilidad de las pinturas en diversos soportes, como cemento Portland blanco [15], cerámicas [16], granitos [17], etc.). Su uso se está implantando en otras actividades, tales como la industria de los alimentos y las bebidas, donde el color denota la diferenciación y la calidad del producto [18, 19], para el análisis de imagen [20] e incluso en odontología, para determinar con precisión el color de las porcelanas dentales [21].

Los pigmentos, responsables de atribuir el color a la pintura al mezclarse con ligantes y aditivos, pueden ser bien productos naturales micronizados, o bien productos sintéticos [22]. Una de las materias prima más utilizada para la obtención de pigmentos naturales de color rojo es el mineral de hierro (α - Fe_2O_3) o hematites [23]. Se encuentra normalmente en depósitos de tamaño heterogéneo, alcanzando en ocasiones extensiones considerables y siempre asociado a rocas ígneas, pudiendo originarse debido a diversos procesos como pueden ser el metamorfismo de contacto, alteraciones siderita – magnetita o como resultado de la sublimación o volatilización de la roca [24]. Tras su extracción en mina, recibe un intenso procesamiento en planta de trituración y molienda, con el que se pretende conseguir un producto micronizado con un porcentaje en óxido de hierro elevado.

Para la obtención de este pigmento es muy importante un exhaustivo control de calidad que se ocupe de mantener el porcentaje de óxido de hierro constante, dado que es el responsable de la caracterización del color, lo que repercutirá en la obtención de un producto lo más homogéneo posible. Es de gran importancia la distribución de la granulometría del producto, ya que se ha comprobado que pigmentos de menor tamaño de grano proporcionan mejores propiedades físicas y ópticas, presentando una mayor intensidad y tonalidad rojiza, así como unos poderes colorantes y cubrientes más elevados [23].

El problema principal del sector dedicado a la fabricación de pigmentos naturales es conseguir regularizar de forma sencilla, rápida y económica el tono final del color, aportándole calidad al producto. Una solución a este problema es la visualización instantánea de la comparación de colores en el espacio CIELAB. Partiendo de un patrón de características deseadas, se permite la comparación del producto obtenido tras su tratamiento en planta, consiguiendo la homogeneización del producto final.

Actualmente PROMINDSA dispone de los recursos suficientes, ya que explota varios yacimientos de óxido de hierro, y de la capacidad técnica y tecnológica para producir pigmentos con propiedades de color “a la carta”. Para ello, además de controlar el tamaño de partícula en el proceso de micronizado, lleva a cabo procesos de mezclado ajustando de forma fina el contenido necesario de distintos óxidos de hierro producidos por la empresa para alcanzar un determinado matiz o tono de color. En la actualidad, PROMINDSA abarca la producción de una amplia gama de pigmentos rojos, amarillos, negros, naranjas o marrones. Por ello, la aplicación informática presentada en este trabajo supone un impulso importante en el desarrollo de nuevos productos que requieren un fino ajuste de las propiedades colorimétricas. Se facilita la obtención de pigmentos de origen natural de alta calidad, capaces de competir con la fuerte industria de los productos sintéticos.

2. Aplicación desarrollada

2.1 Data

Para el desarrollo de esta aplicación, se ha partido del análisis de las coordenadas colorimétricas de un total de 100 muestras de pigmentos de óxido de hierro (tanto naturales como sintéticos) de 1 gramo cada una. Se debe tener en

cuenta, que se podrán utilizar el número de datos que se desee, pero una mayor cantidad dificultará la visibilidad.

La medición del color es expresada en el espacio CIELAB [25], obteniendo las coordenadas colorimétricas mediante el empleo de un espectrofotómetro Minolta CM-700d/600D conectado a un PC equipado con el software CM-5100 W SpectraMagic NX. Las mediciones de color se realizan en la región visible del espectro electromagnético (longitudes de onda de 400 a 700 nm). Las medidas fueron tomadas incluyendo la reflexión specular (modo SCI Spectral Component Include), con una máscara de medición cuyo diámetro de spot es de 8 mm, la fuente de luz empleada es Iluminante D65 y se emplea un ángulo de observación de 10°. Previamente a su empleo, el aparato es calibrado (calibración del blanco CM-A177). Para realizar las medidas de una forma correcta el espectrofotómetro se debe aplicar siempre de forma perpendicular a la superficie de medida, siendo ésta lo menos rugosa posible. Una vez tomados los valores de L^* , a^* y b^* del color patrón y de los colores que se quieren estudiar se realiza el cálculo del cambio global del color ΔE^*_{ab} . Dicha información se exporta a un documento .xls, constituido por tres columnas L^* , a^* y b^* . Es importante recordar que la primera muestra registrada en la primera fila define el color patrón, que sirve de referencia para el cálculo de la medición de error o desviación al comparar varios colores.

2.2 Aplicación de comparación de color

Para la comparación simultánea de uno o varios colores entre sí, o respecto a un color patrón, se desarrolló una aplicación a medida. En ella, a partir de unas restricciones de error (ΔE^*_{ab}) impuestas de antemano por la empresa, se puede identificar y cuantificar el error cometido en cada una de las coordenadas del espacio CIELAB, y así poder corregirlo de forma rápida y sencilla sin necesidad de cálculos ni tiempos de espera prolongados. Se ha creado una interfaz limpia y sencilla (Figura 2) para esta aplicación, de forma que su manipulación sea directa e intuitiva.

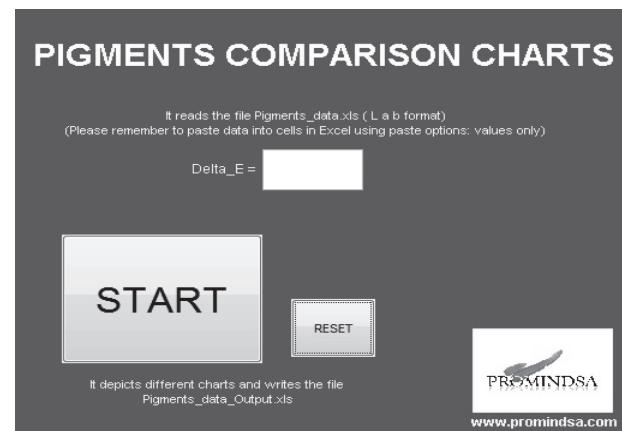


Figura 2. Pantalla principal de la aplicación creada.

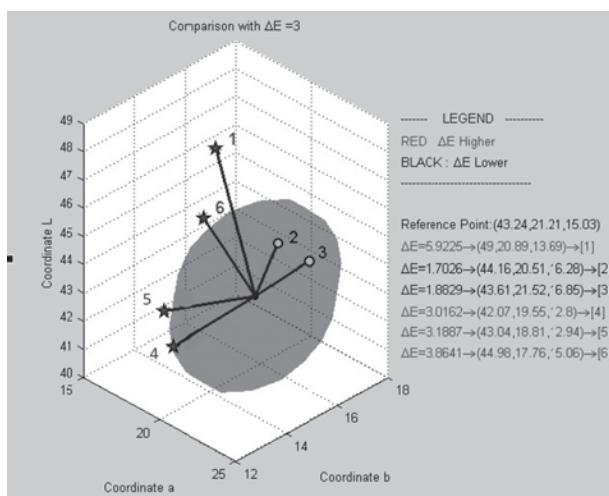
La aplicación consta de tres módulos de graficación: 3D, 2D y 1D, en donde se puede visualizar la dispersión de la muestra testeada con respecto a la de referencia, pudiendo observar el error límite admitido en cada caso y comprobar que parámetro está dentro o fuera de la región frontera.

Tras la generación y carga de los datos de partida, se establece el error ΔE^{*ab} que se pretende asumir y seguidamente comienza el análisis tras pulsar el botón de inicio del software. En pocos segundos se obtienen en pantalla las tres figuras de comparación de color.

2.2.1 Gráfica 3D

El primer módulo del software es la representación gráfica 3D, donde los ejes x e y, que forman el plano horizontal, representan las coordenadas a^* y b^* , y el eje vertical, el parámetro L^* , que denota la luminosidad.

Los colores testeados serán simbolizados mediante puntos en el espacio. En negro se representa el color de referencia (origen de la esfera), y en verde (círculo) y rojo (estrella) los colores a comparar, en función de si se encuentran dentro o fuera de las tolerancias permitidas respectivamente. El error (ΔE^{*ab}) previamente determinado por un experto, se representa por el radio de la esfera que aparece en color azul. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de este módulo, realizándose la comparación con respecto al patrón, de un solo color en el caso de la izquierda y de cuatro en la derecha.



2.2.2. Gráfica 2D

El segundo módulo consta de dos gráficas usualmente utilizadas para la representación del color. En la primera se representa la coordenada a^* en abscisas y la b^* en ordenadas. La segunda gráfica muestra la magnitud L^* únicamente en un eje vertical.

El color de referencia se sitúa en la parte central mediante un punto negro, mientras que en círculos verdes se dibujan todos aquellos puntos que estén dentro del orden de error admitido, y en estrellas rojas todos aquellos que se encuentren fuera (ver Figura 4). Esto permite una identificación rápida de las muestras aceptadas como válidas o inválidas. Estas últimas serán tratadas para encontrarse dentro de las tolerancias exigidas.

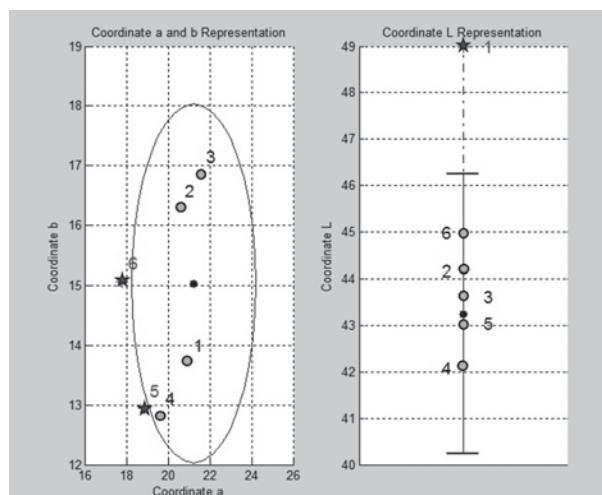


Figura 4. Ejemplo de comparación de colores 2D clásica, que enfrenta los parámetros a^* y b^* , junto con la representación del eje vertical o parámetro L^* .

El límite establecido como error también se gráfica. En la figura en 2D dicho límite viene dado por una circunferencia cuyo origen es el color de referencia. En la gráfica de la magnitud L^* , se marcan los límites mediante dos pequeñas barras horizontales de color negro.

2.2.3. Gráfica 1D

El último módulo desarrollado diferencia las tres magnitudes independientemente en gráficas 1D.

Al igual que en las anteriores, el color de referencia es el punto negro central y los colores comparados se sitúan en algún lugar del eje vertical, bien en verde (círculo), bien en rojo (estrella), en función de si se encuentran dentro o fuera del margen de error adoptado, respectivamente (ver Figura 5).

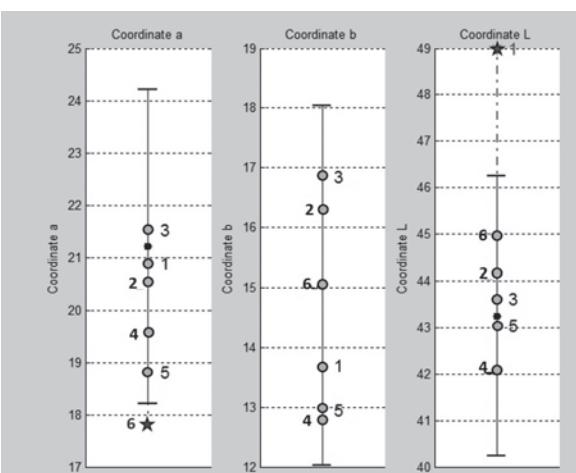


Figura 5. Ejemplo de comparación 1D, donde se analizan los colores en función de sus magnitudes L^* , a^* y b^* de forma independiente.

La ventaja principal de esta visualización reside en que permite cuantificar el error en cada una de las variables por

separado, ya que se identifica de forma instantánea la desviación entre los puntos. Asimismo, posibilita saber cuál es la variable que más se aleja del patrón, y por tanto permite a los expertos encontrar el tratamiento adecuado para la muestra, de forma que cumpla con los criterios establecidos por la empresa. A modo de ejemplo, se puede comprobar que la muestra número 5 de la figura 5, está situado dentro de los intervalos en cada una de las coordenadas, mientras que el gráfico a^*b^* anterior se situaba fuera de los límites admisibles.

2.3.4. Otras gráficas

Además de las tres gráficas básicas presentadas en los apartados anteriores, también se consideró de gran ayuda introducir un par de gráficas finales que facilitasen el análisis y a la toma de decisión final. Una de ellas es la representación de la gráfica a^*b^* presentada en el apartado 2.2.2 pero de una forma más detallada, ya que se aplica un fondo a color para identificar de forma directa hacia que tonalidad se desvían las muestras testeadas.

La segunda gráfica es similar a la descrita anteriormente, con la diferencia de que los puntos se dibujan en coordenadas polares, definidas por una distancia y un ángulo. La transformación de las coordenadas sigue la norma clásica, donde la distancia al centro $r = \sqrt{a^2 + b^2}$, y el ángulo $\theta = \arctg(b, a)$. Esta representación es muy utilizada en la industria de la pintura (Figura 6).

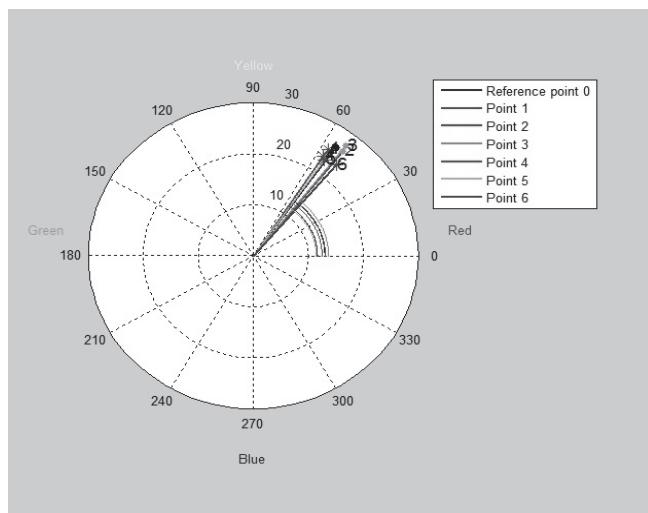


Figura 6. Gráfico de coordenadas polares de las muestras analizadas.

3. Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación de comparación y discriminación de pigmentos a partir de su información del color, de un modo sencillo y visual. Así, el usuario de dicha aplicación puede establecer conclusiones de un modo rápido y eficiente, analizando más exhaustivamente si así lo desea, cada una de las componentes del color en el espacio CIELAB.

Anteriormente, la comparación de colores se realizaba mediante software generalistas del sector de las pinturas en

base a la información obtenida mediante un espectrofotómetro en el laboratorio. Esto permitía analizar y comparar únicamente dos pigmentos, lo que reducía la capacidad de análisis por parte del usuario.

Mediante este software es posible reconocer, de un modo sencillo, productos que no están dentro de los límites establecidos por el usuario, en términos del error. Además, se puede analizar de un modo más detenido en cada una de las componentes del espacio CIELAB, comúnmente utilizado dentro de este sector.

Como líneas futuras de trabajo se plantea la ampliación del presente software mediante la incorporación de modelos basados en redes neuronales, con los cuales se abordaría la predicción de las componentes del color a partir de las proporciones de cada uno de sus elementos y sus correspondientes coordenadas L^* , a^* y b^* .

Agradecimientos

La investigación de Carla Iglesias está financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte a través de una beca FPU 12/02283. La investigación de Santiago Pozo está financiada por la Universidad de Vigo, a través de su contrato pre-doctoral 2011.

Referencias

- [1] CIE. Colorimetry, CIE Publ. nº 15.2, Centr. Bureau CIE, Vienna, Austria, 1986.
- [2] Wyszecki, G. and Stiles, W. S., Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed., New York: Wiley, 1982.
- [3] CIE. Colorimetry, CIE Publ. nº CIE 15.3, Centr. Bureau CIE, Vienna, Austria, 2004.
- [4] Luo, M. R., Applying colour science in colour design, Optics and Laser Technology, 38, pp. 392-398, 2006.
- [5] Newhall, S. M., Nickerson, D. and Judd, D.B., Final report of the O.S.A. subcommittee on spacing of the Munsell colors. Journal of the Optical Society of America, 33, 385, 1943
- [6] MacAdam, D. L., Visual sensitivities to color differences in daylight. Journal of the Optical Society of America, 32, 247, 1942.
- [7] Vhrel, M. J. and Trussell, H. J., Filter considerations in color correction, IEEE Transactions on Image Processing, 3, pp. 147-161, 1994.
- [8] Sharma, G. and Trussell, H. J., Figures of Merit for Color Scanners, IEEE Transactions on Image Processing, 6, pp. 990-1001, 1997.
- [9] Wolski, M., Bouman, C. A., Allebach, J. P. and Walowit, E., Optimization of sensor response functions for colorimetry of reflective and emissive objects, Proceedings IEEE Int. Conf. Image Processing 2, pp. 323-326, 1996.
- [10] Clarke, F. J. J., McDonald, R. and Rigg, B., Modification to the JPC79 colour-difference formula. Journal of the Society of Dyers and Colourists, 100, 128-132 and 281-282, 1984.
- [11] CIE. Parametric effects in colour-difference evaluation, Technical report CIE Pub. N° 101, Centr. Bureau CIE, Vienna, 1993.
- [12] Luo, M. R., Cui, G. and Rigg, B., The development of the CIE 2000 colour difference formula, Color Research and Application, 26, pp. 340-350, 2001.
- [13] CIE. Improvement to industrial colour-difference evaluation. CIE Publication 14-2001. Central Bureau of the CIE, Vienna, 2001.
- [14] Álvarez, M.J., González, E., Bianconi, F., Armesto, J. and Fernández, A., Características de color y textura para recuperación de imágenes en la industria del granito, DYNA, 161, pp. 121-130, 2010.

- [15] Morales, J. G. and Restrepo, O. J., Estabilización del pigmento azul ultramar en cemento Portland Blanco, DYNA, 155, 171-180, 2008.
- [16] Dosta, S., Torrell, M., Cano, I. G. and Guilemany, J. M., Functional colored ceramic obtained by thermal spray for decorative applications, Journal of the European Ceramic Society, 32, pp. 3685-3692, 2012.
- [17] Rivas, T., Pozo, S., Fiorucci, M. P., López, A. J. and Ramil, A., Nd:YVO₄ laser removal of graffiti from granite. Influence of paint and rock properties on cleaning efficacy, Applied Surface Science, 263, 15, pp. 563-572, 2012.
- [18] Taub, I. A. and Singh, R. P., Food storage stability. United States of America, CRC Press, 1997.
- [19] Bakker, J., Bridle, P. and Timberlake, D. F., Tristimulus measurements (CIELAB 76) of port wine colour, Vitis, 25, pp. 67-78, 1986.
- [20] Comolly, C. and Fliess, T., A study of efficiency and accuracy in the transformation from RGB to CIELAB Color Space, IEEE Transactions on Image Processing, 6 (7), pp. 1046-1048, 1997.
- [21] Segui, R. R., Johnston, W. M. and O'Brien, W. J., Spectrophotometric analysis of color differences between porcelain systems, The Journal of Prosthetic Dentistry, 56 (1), pp. 35-40, 1986.
- [22] Calvo Carbonel, J., Pinturas y Recubrimientos: Introducción a su tecnología, Ed. Díaz de Santos, 2009.
- [23] Gialanella, S., Belli, R., Dalmeri, G., Lonardelli, I., Mattarelli, M., Montagna, M. and Toniutti, L., Artificial or natural origin of hematite-based red pigments in archaeological contexts: The case of riparo Dalmeri (Trento, Italy), Archaeometry, 53 (5), pp. 950-962, 2011.
- [24] Barron López de Torre, V., Predicción del color en mezclas de arcillas con óxidos de hierro: Aplicación del análisis de Kubelka - Munk, Bol. Soc. Esp. Ceram. V/Dr., 26 (5), pp. 299-304, 1987.
- [25] CIE S 014-4/E:2007, ISO 11664-4:2008 (Colorimetry, Part 4: CIE 1976 L*a*b* Colour space).

A hazard index for roadside of two-lane rural roads

Un indice de peligrosidad para zonas laterales de carreteras de dos carriles

Juan Ignacio Rivera ^a & Tomas Echaveguren ^b

^a MSc, Universidad de Concepción, Chile, jriverab@udec.cl

^b PhD, Profesor Asociado, Universidad de Concepción, Chile, techaveg@udec.cl

Received: July 22th, 2013. Received in revised form: January 15th, 2014. Accepted: January 17th, 2014

Abstract

Roadside areas are elements intended to reduce the Run-off-road crashes. The hazardousness is an indicator of compliance of this objective. There are few methods to measure hazardousness, which usually depend of the availability of accident data. This paper examines the factors that explain the roadside hazardousness on the basis of existing models and analysis of field data. It was determined that the clearance side next to the barriers of protection, especially in curves with inclined slopes, it is significant to explain the hazards. It was determined that for straights and curves without barriers is relevant the type of object and its position measured position in the roadside.

Keywords: Roadside hazardous, highways.

Resumen

Las zonas laterales de carreteras son elementos destinados a reducir la severidad de accidentes por salida de calzada. La peligrosidad es un indicador de cumplimiento de este objetivo. Existen pocos métodos para medir peligrosidad, que usualmente dependen de la disponibilidad de datos de accidentes. Este trabajo estudia los factores que explican la peligrosidad con base en modelos existentes y el análisis de datos de campo. Se determinó que el despeje lateral junto a las barreras de protección, especialmente en curvas con taludes inclinados, es significativo para explicar la peligrosidad. Se determinó que en rectas y curvas sin barreras de protección es relevante el tipo de objeto y su posición en la zona lateral.

Palabras Clave: Zonas laterales, peligrosidad, carreteras

1. Introducción

Las zonas laterales (ZL) de las carreteras corresponden al espacio comprendido entre la berma y el límite de la faja vial. En promedio, entre 30 % y 45 % de los accidentes con resultado de muerte en carreteras en el mundo ocurren en las zonas laterales, debido a que los vehículos que pierden el control se desplazan hacia los costados de las vías colisionando con algún objeto o volcando hacia depresiones [1- 2]. Este tipo de accidentes se conoce como accidentes por salida de calzada.

El grado de daño potencial de los ocupantes del vehículo está directamente relacionado con la presencia o ausencia de objetos y/o depresiones, con su densidad a lo largo de la vía y su distancia respecto del borde de las bermas. Este grado de daño se define como peligrosidad, la cual es una medida indirecta del riesgo de accidentes, que depende del tipo de objeto o depresión presente en la zona lateral tales como: árboles, muros, postes eléctricos, rocas, zanjas, pendientes laterales pronunciadas, accesos vehiculares, señales de tránsito, postes de pórticos, sistemas de contención sin

ancho de trabajo adecuado, terminales de puentes y estructuras [3-4].

Por lo anterior, las normativas de diseño geométrico han establecido especificaciones de diseño para las secciones transversales de las carreteras, que proporcionan áreas libres de depresiones y obstáculos, para emplearlas como elementos de seguridad pasiva.

Las ZL como elemento de diseño geométrico nacieron en la década de los 60 en Estados Unidos. El “Consejo Nacional de Seguridad” estimaba que más del 45 % de las muertes en accidentes de tránsito ocurría en dichas áreas y que por lo tanto se debían adoptar medidas para reducir la mortalidad. Para ello implementaron campos de prueba como parte un sistema de caminos privados desarrollado por la compañía automotriz *General Motors*, con el fin de evaluar la seguridad de sus vehículos y anticipar posibles accidentes, además de establecer salvaguardias para minimizar los efectos de fallas tanto humanas como mecánicas [5].

AASHTO publicó la primera guía formal de diseño de ZL en 1988. La “Guía de Diseño de Zonas Laterales”

(*Roadside design guide*) estableció recomendaciones de diseño y un método de cálculo de peligrosidad en ZL [6].

Desde ese entonces, el concepto de ZL ha evolucionado. Actualmente se concibe como un elemento de seguridad pasiva que tiene por objetivo re-direccionalizar al vehículo fuera de control y/o a mitigar la severidad de los posibles accidentes que allí pudiesen ocurrir.

La Figura 1 muestra que las ZL se compone de 3 elementos [7]: La zona 1 (Z1) que corresponde al espacio adyacente a la calzada entre la berma y el sobre ancho de la plataforma; la zona 2 (Z2) que corresponde a la zona libre de obstáculos y contigua a la zona 1 y la zona 3 (Z3), que corresponde al espacio entre el despeje lateral y el resto de faja vial.

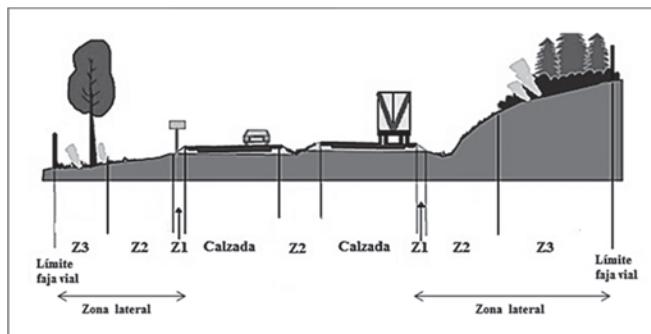


Figura 1. Componentes de la zona lateral

Un aspecto importante para el diseño de ZL es contar con especificaciones de diseño que minimicen la peligrosidad, tanto en la fase de diseño como en la fase de operación de las carreteras. Por lo tanto, el problema esencial es contar con un índice que permita calificar la peligrosidad y tomar decisiones con base en esa calificación [8]: eliminar obstáculos, modificar la zona lateral, disponer atenuadores de impacto o barreras y delinear los obstáculos,

Tabla 1.

Criterios para calcular el índice RHR [12]

RHR	Despeje lateral (m)	Talud	Recuperación del control	Característica de la zona lateral
1	≥ 9.0	menor a 1:4	Si	Llana y no rugosa
2	6.0 – 7.5	1:4	Si	Llana y no rugosa
3	3.0	1:3 a 1:4	Si	Superficie rugosa
4	1.5 – 3.0	1:3 a 1:4	Si	Barreras; árboles, postes, otros
5	1.5 – 3.0	1:3	No	Barreras
6	< 1.5	1:2	No	Sin barrera – obstáculos rígidos
7	< 1.5	mayor a 1:2	No	Sin barrera – risco o corte vertical

La peligrosidad varía a lo largo de la carretera, por lo cual el método de calificación usa un valor promedio que representa la peligrosidad general de un tramo del camino. Lo anterior se aplica a casos donde las condiciones de borde son cambiantes y con diversidad de zonas despejadas, obstáculos y taludes.

Ayati *et al* [13] usaron los valores de RHR para estimar el peso relativo de los elementos potencialmente peligrosos sobre la peligrosidad de las ZL usando el enfoque de procesos analíticos jerárquicos de Saaty.

Karpinski [14] adaptó el índice RHR incluyendo un índice de severidad como función de las consecuencias de los accidentes por salidas de la calzada sobre las personas.

retirar obstáculos, cubrir depresiones y disponer de sistemas de contención lateral.

Los estudios realizados para evaluar los factores asociados a este tipo de accidente son escasos, debido a la dificultad que reviste desarrollar procedimientos que permitan caracterizar cuantitativamente la peligrosidad, lo cual requiere de datos de accidentes que no siempre están disponibles. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue proponer un índice de peligrosidad para zonas laterales de carreteras basado datos de terreno mediante regresión lineal generalizada (GLM), que permita identificar los factores e interacciones que mejor describen dicha peligrosidad.

2. Los índices de peligrosidad

Los índices de peligrosidad intentan explicar el grado de peligro y la exposición al riesgo de accidentes. La literatura muestra pocos estudios sobre estimación de estos índices, siendo el más importante el trabajo de Zeeger en 1988 [9].

Existen otros índices de peligrosidad de zonas laterales que son parte de indicadores de seguridad vial. Por ejemplo el índice RSI (*Road Safety Index*) es parte del indicador IS (*Safety Index*) desarrollado en el proyecto IASP (*Identificazione e Adeguamento delle Strade Pericolose*) de la Comunidad Europea [10].

2.1 El índice RHR

El índice RHR (*Roadside Hazard Rating*) es una escala de calificación de peligros en las ZL que varía de 1 a 7, siendo 1 el más bajo y 7 el más alto [11]. La calificación depende de la condición del despeje lateral, de la inclinación del talud, de la presencia de obstáculos y de la superficie disponible para la recuperación de control, como lo muestra la Tabla 1.

Estableció un índice que varía de 1 a 4 en función de la severidad de los accidentes observados y la distancia entre la berma y los obstáculos presentes en las ZL.

2.2 El índice RHI

El índice RHI (*Roadside Hazardous Index*) expresa la influencia de la configuración física de las ZL sobre la frecuencia y severidad de los accidentes por salida de calzada. Considera como variables el tipo de trazado geométrico, la inclinación del talud, el despeje lateral y la presencia de barreras de contención.

El índice RHI establece 7 niveles de peligrosidad. El nivel 1 está asociado a la condición de la ZL que permite recuperar el control del vehículo sin provocar ninguna lesión. El nivel 7 representa condiciones extremas con alta probabilidad de impactar con objetos, sufrir vuelcos y lesiones severas.

Pardillo *et al* [15] establecieron estos niveles a partir de un análisis de conglomerados en que intervinieron además de las componentes físicas de la zona lateral, índices de accidentes por salida de la calzada y de severidad de accidentes por salida de calzada. Como resultado del mencionado análisis, obtuvieron la escala de calificación de peligrosidad de la Tabla 2.

Tabla 2.
Características de las ZL del índice RHI [15]

RHI	Características de las zonas laterales
1	Tramos en llano con obstáculos a más de 5 m
2	Tramos en llano con obstáculos entre 3 y 5 m o Pendientes de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a más de 5 m
3	Rectas con pendiente de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m o Pendientes de talud mayores a 1:3 y obstáculos a más de 5 m
4	Rectas con barrera
5	Curvas con barrera
6	Rectas con pendientes de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos a menos de 3 m; curvas con pendientes de talud entre 1:3 y 1:4 y obstáculos entre 3 y 5 m; curvas con pendientes de talud mayor que 1:3 y distancias a obstáculos mayor que 5 m
7	Tramos con pendientes de talud mayor a 1:3 y obstáculos a menos de 5 m o curvas con distancias a obstáculos menor a 3 m

Li *et al* [16] desarrollaron un método similar al índice RHI aplicando el análisis de conglomerados grises a 4 factores: trazado, tráfico, historia de accidentes por salida de calzada y características físicas de las ZL.

2.3 El índice RSI

El índice RSI (*Roadside Safety Index*) forma parte del índice de seguridad de caminos bidireccionales (IS) del proyecto IASP [17]. Se estima mediante la Ec. 1, en la cual WS es la puntuación ponderada de los problemas de seguridad en las zonas laterales; P es el porcentaje de accidentes relacionados con la zona lateral. Se puede adoptar P=0.3 [5]. ΔAS es el aumento relativo en la severidad del accidente y asume el valor 2.

$$RSI = 1 + (WS)(P)(\Delta AS) \quad (1)$$

La puntuación ponderada (WS) de los peligros de las ZL se obtiene mediante la Ec. 2 para el tramo de muestreo k. El término n es el total de tramos de muestreo.

$$WS = \sum_{k=1}^{2n} \frac{\max(wPj)_k}{(2n)5} \quad (2)$$

La calificación Pj se obtiene de una evaluación en terreno de los elementos constituyentes de las ZL, tales como: talud de terraplén, puentes, terminales, transiciones

peligrosas, árboles, postes, obstáculos rígidos y zanjas, calificándolos entre 0, 0.5 y 1, según si el peligro es de relevancia nula, media o alta para la seguridad vial. El factor de ponderación w varía entre 1 y 5 dependiendo del tipo de obstáculo.

3. Análisis de los índices de peligrosidad existentes

Previo a la elaboración del índice de peligrosidad (IP) con datos de terreno, se realizó un análisis de los modelos RHR, RHI y RSI existentes mediante el estudio de escenarios de la Figura 2. A partir de ellos se identificó el efecto de las diversas variables sobre la peligrosidad en las ZL y definir a priori las variables a medir posteriormente en terreno. Las variables de modelación consideradas en el análisis fueron: la jerarquía de la vía, el volumen de tránsito expresado en vehículos/día-año, el despeje lateral, el talud transversal de la ZL, y la presencia de barreras de contención.

Para cada una de estas variables se establecieron rangos de interacción de acuerdo con las condiciones geométricas y de operación de las carreteras de Chile. Esta clasificación representa para cada variable y cada categoría dentro de la variable, los valores mínimo, máximo y más probable.

Las celdas de la matriz de la Figura 2 representan valores individuales de cada uno de los índices de peligrosidad RHR, RHI y RSI. Estos índices se calcularon mediante los modelos descritos en el capítulo 2, para diferentes valores de los datos de entrada muestreados dentro de los rangos de establecidos por cada modelo para cada una de las variables explicativas.

Considerando dos repeticiones por celda, se obtuvieron 432 valores de cada uno de los índices. Luego de normalizar los índices a una escala única, se realizó un análisis de regresión con los todos ellos por separado para cada una de las 3 categorías de carretera establecidas en los escenarios de análisis de la Figura 2: autopista y auto-ruta (C1), primario y colector (C2) y local y desarrollo (C3). Considerando las 24 combinaciones de condición de las zonas laterales, 3 niveles de TMDA por categoría y los 3 índices de peligrosidad, se obtuvieron 216 casos para cada categoría.

Los resultados obtenidos se aprecian en las Ec. 3, 4 y 5. El coeficiente de determinación ajustado (R^2a) obtenido en los tres modelos fue superior a 0.7 y el error resultante (S) fue de 0.9.

$$\begin{aligned} IP(C1) = & 3.024 + 4.132 \times 10^{-5} TMDA - 0.345 DESPEJE \\ & + 5.548 TALUD - 0.278 BARRERA \end{aligned} \quad (3)$$

$R^2a=0.77$; $S=0.9$; $N=216$

$$\begin{aligned} IP(C2) = & 3.634 + 9.349 \times 10^{-5} TMDA - 0.4195 DESPEJE \\ & + 3.173 TALUD - 0.1538 BARRERA \end{aligned} \quad (4)$$

$R^2a=0.71$; $S=0.9$; $N=216$

$$\begin{aligned} IP(C3) = & 3.820 + 8.455 \times 10^{-5} TMDA - 0.4200 DESPEJE \\ & + 2.500 TALUD - 0.097 BARRERA \end{aligned} \quad (5)$$

$R^2a=0.70$; $S=0.9$; $N=216$

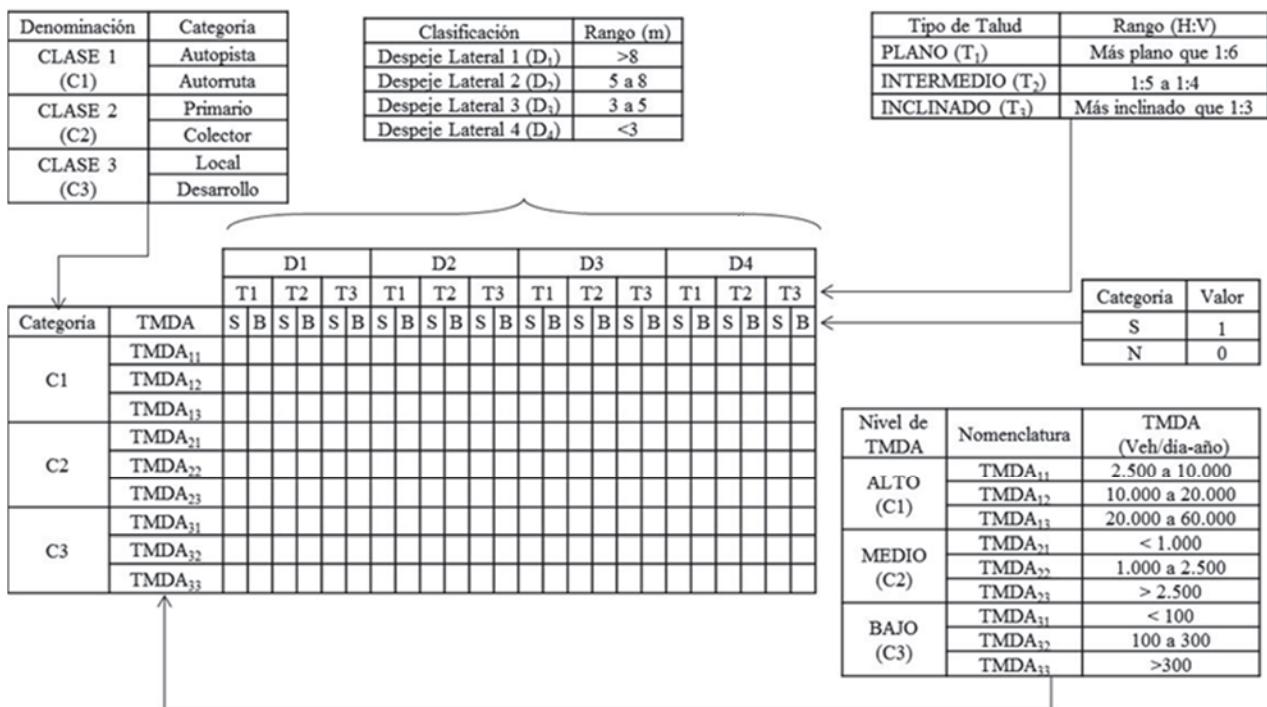


Figura 2. Variables y escenarios de cálculo considerados en el análisis de IP

En las Ec. 3, 4 y 5, TMDA es el tránsito medio diario anual, expresado en veh/día-año; DESPEJE es la distancia entre el borde de la berma y el primer obstáculo presente en la ZL, en m; TALUD es la inclinación del talud de corte/terraplén, medida en decimal y BARRERA describe la presencia (BARRERA = 1) o ausencia (BARRERA = 0) de barreras de contención en el tramo de medición.

Las Ec. 3, 4, y 5 se obtuvieron a partir de los escenarios posibles descritos en la Figura 2, considerando rangos de las variables de acuerdo a los estándares de diseño geométrico de Chile. Estos resultados estiman valores de peligrosidad que agrupan los 3 índices descritos en el capítulo 2, pero separados por categoría de diseño. Las variables explicativas consideradas son comunes a los 3 métodos analizados.

Del análisis de simulación de los índices de peligrosidad, se identificaron dos variables potencialmente relevantes como son la existencia de curvas horizontales y la clasificación por tipo de objeto, que no están explícitamente incluidas en las ecuaciones 3, 4, y 5 dado que no son comunes a todos los índices.

4. Toma de datos en terreno

La recopilación de datos en el terreno se ejecutó sobre tramos de medición de 100 m que consideraban elementos curvos y rectos aledaños previamente utilizados para estudios de velocidad límite [18]. Dichos estudios consideraron tramos ubicados en terreno plano.

De este modo, se obtuvieron 236 tramos de medición. Posteriormente, se seleccionaron en terreno los tramos definitivos de medición aplicando los criterios siguientes: (a) emplazamiento sólo en vías rurales, (b) sólo tramos sin obras o trabajos en la vía y (c) presencia de bermas o espacio en los extremos del tramo de medición suficiente

para disponer de equipos y vehículo en zonas seguras. Aplicando estos criterios se eliminaron en terreno 22 tramos, con lo cual las mediciones se realizaron finalmente en 214 tramos.

Las variables medidas en terreno fueron el despeje lateral, el talud transversal, el tipo de obstáculo, la presencia de barreras de contención y la geometría de la vía. Asimismo, se estimaron los datos de tránsito medio diario anual (TMDA, en veh/día-año) para las rutas estudiadas, en base a los datos del Plan Nacional de Censos de la Dirección de Vialidad de Chile [19]. Esta base de información contiene datos de tránsito desde el año 1994 hasta el año 2012.

El despeje lateral se obtuvo a través de la medición directa de la distancia horizontal existente entre la berma y el objeto u obstáculo dentro de la ZL más cercano. La medición se realiza con huinchía métrica, registrando horizontalmente la distancia antes señalada.

El talud transversal se obtuvo a través de medición indirecta de la inclinación promedio con el apoyo de un taquímetro, midiendo 3 puntos a lo largo de la ZL en la unidad de muestreo. Se estimó la inclinación promedio de cada talud en decimal.

El tipo de obstáculo se obtuvo a través de la identificación visual del objeto más próximo a la calzada y que constituye el primer elemento de riesgo de accidente ante la pérdida de control vehicular. La presencia de barrera contención y su geometría se obtuvieron por identificación visual. Se registró presencia o ausencia de barreras de contención y la presencia de una recta (R) o de una curva (C). La Tabla 3 resume los datos obtenidos en terreno.

Tabla 3.

Resumen de datos obtenidos en las mediciones en terreno

Ruta	# Tramos	# Curvas	# Rectas	DESPEJE (m)	TALUD (decimal)	TMDA (veh/día-año)	Barreras	Obstáculos (#)
1	11	7	4	0.5 – 3.5	0.25 – 1.00	5765	Si	Árbol (1), Corte (6), Zanja (3), O. de Arte (1)
2	27	13	14	1.0 – 3.5	0.17 – 1.00	56 – 3198	No	Poste (14), Zanja (6), Rocas (3), Árbol(3), Canal (1)
3	21	7	14	1.0 – 3.0	0.25 – 0.33	3043	No	Poste (8), Zanja (3), Rocas (2), Árbol(4), Vegetación (6)
4	81	26	55	0.5 – 8.0	0.25 – 1.00	2004 – 2770	Si	Poste (15), Zanja (13), Rocas (29), Árbol(13), Vegetación (9)
5	74	23	51	1.0 – 8.0	0.17 – 1.00	75 – 7015	Si	Poste (15), Zanja (36), Rocas (10), Árbol(11), Vegetación (2)

5. El indice de peligrosidad propuesto

Para obtener el IP, se utilizaron los datos obtenidos en terreno y los resultados obtenidos en la sección 3 de este trabajo. Considerando que todos los índices analizados convergen a las Ec. 3, 4 y 5, se analizaron los efectos de los factores DESPEJE, BARRERAS, TALUD, TMDA y GEOMETRIA sobre la peligrosidad evaluada en terreno usando el índice RHI. Se seleccionó este modelo debido a que incorpora de manera simple las características físicas de las ZL, y la geometría de la carretera representada a través solo de rectas y curvas. Esto facilita el trabajo de levantamiento de información en terreno. Asimismo, el modelo considera indirectamente las características generales del terreno donde se emplaza la carretera a través de la categoría de diseño. En el futuro se puede incluir esta variable agregándolo como factor en la Figura 2.

Para el análisis se utilizó la regresión lineal generalizada, ya que permite obtener modelos aditivos con variables categóricas y binarias, aplicar funciones de transformación para

normalizar residuos mal comportados, e incluir la interacción entre variables. En primer lugar se analizaron 3 modelos sin interacción entre variables a partir de la Ec. 6. Luego se probaron modelos con interacción entre variables.

5.2 Modelo sin interacción entre variables

La Tabla 4 muestra los resultados de la regresión para el modelo lineal de la Ec. 6 usando los datos de terreno obtenidos de acuerdo a lo descrito en sección 4. En ella e muestran los valores de los coeficientes de regresión (β_i), el valor t de student asociado a cada coeficiente de regresión y el valor p, que representa la significancia estadística de cada coeficiente de regresión, para 3 modelos distintos basados en la formulación de la Ec. 6

$$\begin{aligned} IP = & \beta_0 + \beta_1 TMDA + \beta_2 DESPEJE + \beta_3 TALUD \\ & + \beta_4 BARRERA + \beta_5 GEOMETRIA \end{aligned} \quad (6)$$

Tabla 4.

Resultados del análisis de regresión de modelo lineal sin interacciones

Modelo 1: Ecuación 6 considerando todas las variables excepto GEOMETRIA

Coeficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.27	+32.10	0.000	Significativo
β_1	-0.00006	-1.41	0.157	No significativo
β_2	-0.94	-15.00	0.000	Significativo
β_3	+0.89	+3.00	0.003	Significativo
β_4	+0.83	+2.30	0.024	Significativo
β_5	0.00	0.00	0.000	
$S = 1.2$	$R^2 = 0.54$	N=213		

Modelo 2: Ecuación 6 considerando todas las variables excepto TMDA y GEOMETRIA

Coeficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.13	+34.6	0.000	Significativo
β_1	0.00	0.0	0.000	
β_2	-0.96	-15.5	0.000	Significativo
β_3	+0.78	+2.1	0.034	Significativo
β_4	+0.86	+2.85	0.005	Significativo
β_5	0.00	0.00	0.000	
$S = 1.1$	$R^2 = 0.53$	N=213		

Modelo 3: Ecuación 6 considerando todas las variables excepto TMDA

Coeficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.10	+42.9	0.000	Significativo
β_1	0.00	0.0	0.000	
β_2	-1.05	-20.0	0.000	Significativo
β_3	+0.29	+1.1	0.290	No significativo
β_4	-0.18	-0.8	0.417	No significativo
β_5	+1.46	+11.6	0.000	Significativo
$S = 0.8$	$R^2 = 0.76$	N=213		

El modelo 1 de la Tabla 4 muestra que la variable TMDA no resulta significativa puesto que el valor p es mayor que el nivel de significancia del 95 %. Por tanto se puede eliminar del análisis. En el caso del modelo 2 de la Tabla 4, se aprecia que las variables DESPEJE, TALUD y BARRERA son

significativas. Se aprecia también que al incorporar la variable GEOMETRIA (modelo 3 de la Tabla 4), la calidad del modelo mejora sustancialmente respecto del modelo 2, pero pierden significancia las variables BARRERA y TALUD. Esto implica que individualmente estas variables no contribuyen a explicar la

peligrosidad de las zonas laterales por lo cual es necesario estudiar las interacciones.

Dentro de las variables significativas, el despeje lateral (variable DESPEJE), contribuye a reducir la peligrosidad, lo cual es consistente con la evidencia del estado del arte. Lo mismo ocurre con la variable GEOMETRIA. La presencia de curvas horizontales, contribuye a aumentar la peligrosidad de la ZL. Considerando lo anterior, se incluyó en el análisis la interacción entre variables. Para especificar estas interacciones se asumió que:

- La inclinación del talud protegido con barrera en rectas incrementa la peligrosidad,
- barreras en ausencia de curvas en terreno llano incrementan la peligrosidad,

- taludes inclinados sin protección en rectas incrementan la peligrosidad,
- la presencia de barreras protegiendo taludes en curvas reduce la peligrosidad,
- la presencia de taludes en curvas sin considerar el efecto de las barreras incrementa la peligrosidad.

Con estos supuestos se analizó el modelo de la Ec. 7. Los resultados de la regresión se resumen en la Tabla 5. Estos no consideran el tipo de obstáculo presente en la ZL.

$$IP = \beta_0 + \beta_1 DESPEJE + \beta_2 (BARRERAS)(TALUD) + \beta_3 (GEOMETRIA)(TALUD) + \beta_4 (GEOMETRIA)(TALUD)(BARRERAS) \quad (7)$$

Tabla 5.

Resultados del análisis de regresión de modelos lineales con interacciones

Coeficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_0	+7.16	+57.0	0.000	Significativo
β_1	-0.93	-19.9	0.000	Significativo
β_2	+3.76	+7.2	0.000	Significativo
β_3	+2.26	+9.8	0.000	Significativo
β_4	-4.33	-6.6	0.000	Significativo
S = 0.8	$R^2 = 0.74$	N=213		

Los resultados de la Tabla 5 muestran que: al aumentar el despeje lateral (DESPEJE) la peligrosidad se reduce ($\beta_1 < 0$); en curvas horizontales con taludes inclinados y barreras de protección la peligrosidad se reduce ($\beta_4 < 0$); en curvas con taludes inclinados sin protección se incrementa la peligrosidad ($\beta_3 > 0$); y en terreno recto, llano y con taludes inclinados, la peligrosidad se incrementa independientemente de la presencia de barreras ($\beta_2 > 0$).

El modelo descrito por la Ec. 7 es más robusto que los modelos descritos por las Ec. 4, 5 y 6, por lo cual es recomendable para predecir la peligrosidad de zonas laterales. Sin embargo, si bien el modelo descrito por la Ec. 7 resulta adecuado estadísticamente, no incorpora como variable el tipo de obstáculo, aspecto que es importante desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento y de la seguridad vial.

5.2. Modelo con interacción entre variables

Para analizar este efecto se especificaron 2 modelos adicionales, separando el efecto de rectas y curvas y aislando de la muestra aquellos tramos de medición en donde no se contaba con elementos de protección. Los objetos se codificaron según: OBJETO = 1.0 para árboles, postes, zanjas, obras de arte, rocas, cortes; OBJETO = 0.5 para vegetación y OBJETO = 0.0 para zona despejada sin obstáculos. El modelo especificado para zonas rectas sin barreras de proyección y presencia de taludes se representó usando las Ec. 8. Para curvas se especificó el modelo de la Ec. 9. La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos mediante regresión generalizada.

$$IP = \beta_{0R} + \beta_{1R} DESPEJE + \beta_{2R} OBJETO + \beta_{3R} TALUD + \beta_{4R} (DESPEJE)(OBJETO)(TALUD) \quad (8)$$

$$IP = \beta_{0C} + \beta_{1C} DESPEJE + \beta_{2C} (DESPEJE)(GEOMETRIA)(OBJETO) \quad (9)$$

Tabla 6.

Resultados del análisis del efecto del tipo de objeto en rectas y curvas sin barreras

Modelo para rectas				
Coeficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_{0R}	+ 5.52	+5.1	0.000	Significativo
β_{1R}	-0.73	-4.3	0.000	Significativo
β_{2R}	+1.01	+1.4	0.170	No significativo
β_{3R}	+3.35	+3.0	0.003	Significativo
β_{4R}	-1.62	-3.7	0.000	Significativo
S = 0.76	$R^2 = 0.80$	N=121		
Modelo para curvas				
Coeficiente	Valor del coeficiente β_i	Valor t de student	Valor p	Comentario
β_{0C}	+7.55	+74.7	0.000	Significativo
β_{1C}	-1.25	-29.8	0.000	Significativo
β_{2C}	+0.82	-18.4	0.000	Significativo
S = 0.64	$R^2 = 0.86$	N=178		

Los resultados de la Tabla 6 muestran que en rectas (Ec. 8) la presencia de despeje lateral por si sola reduce la peligrosidad ($\beta_{1R}<0$), el tipo de objeto incrementa la

peligrosidad aun cuando es poco significativo ($\beta_{2R}>0$), el talud incrementa en mayor medida la peligrosidad que el tipo de objeto ($\beta_{3R}>0$), y la presencia de despeje lateral en

zonas con taludes y objeto reduce la peligrosidad ($\beta_{4R}<0$), efecto que es diferenciado según el tipo de objeto presente en la ZL. En el caso de las curvas (Ec. 9), la presencia del despeje lateral reduce la peligrosidad pero en mayor medida que en rectas ($\beta_{1C}<0$). El efecto conjunto del despeje, presencia de curvas y dependiendo del tipo de objeto incrementa la peligrosidad ($\beta_{2C}>0$).

En conclusión, los modelos de las Ec. 8 y 9 resultan más convenientes que los modelos desarrollados en la sección 5.1, por lo cual fueron los seleccionados finalmente para explicar la peligrosidad en curvas y rectas.

6. Conclusiones

En este trabajo se analizaron y propusieron modelos para estimar la peligrosidad de las zonas laterales para vías bidireccionales de dos carriles. Para ello se identificaron las variables explicativas más importantes simulando el comportamiento de los índices RHR, RHI y RSI. Usando esta simulación y datos de campo tomados en Chile, se analizaron diferentes modelos de peligrosidad para luego proponer los tres modelos más consistentes en términos estadísticos y físicos.

Los resultados mostraron que por un lado los modelos obtenidos mediante simulación resultaron distintos de aquellos obtenidos mediante datos de terreno sin considerar interacción entre variables, lo cual era esperable considerando que los modelos existentes no consideraban la variable geometría, proximidad del obstáculo y los efectos combinados entre variables. En este sentido el modelo finalmente propuesto (Ecuaciones 8 y 9) resultó el más eficiente en términos estadísticos.

El método de análisis en base a simulación de escenarios aplicado en este trabajo, permitió identificar las variables relevantes comunes a los tres índices analizados, pero no permitió analizar el efecto de la presencia de curvas horizontales ni del tipo de obstáculo sobre la peligrosidad. Estos efectos se lograron incluir con datos de terreno tomados en 214 tramos en rutas de Chile.

El análisis de los datos de terreno se realizó usando modelos de regresión lineal generalizada. Se estudió el efecto sobre la peligrosidad los factores despeje lateral, talud, presencia y tipo de obstáculo, presencia de barreras, tráfico y efecto de las curvas en la peligrosidad. Los resultados mostraron que el nivel de tráfico (TMDA) no resultó significativo, lo cual es consistente con los modelos revisados en el estado del arte, que lo utilizan para calcular la exposición al riesgo más que para estimar la peligrosidad.

Se determinó que el despeje lateral explica en mayor medida la peligrosidad que el resto de factores especialmente en presencia de curvas. Asimismo, se determinó que la presencia de barreras en curvas con taludes pronunciados reduce la peligrosidad.

En rectas sin barreras laterales y con taludes el efecto del tipo de obstáculo es significativo para explicar la peligrosidad. En las curvas, se determinó que también es significativo para explicar la peligrosidad, pero en interacción con el despeje lateral.

En tanto no se disponga tales datos, el modelo propuesto permite realizar estimaciones adecuadas para: apoyar la decisión de incluir o no barreras de protección, la calificación del nivel de seguridad de segmentos de carreteras y la evaluación costo-efectividad de adopción de medidas de reducción de la peligrosidad.

Referencias

- [1] La Torre, F., Saleh, P., Cesolini, E. and Goyay, Y., Improving roadside design to forgive human errors, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, pp. 235–244, 2012.
- [2] Veith, G., *Roadside design, safety and barriers. Guide to Road Design: Part 6*, 1st ed., Sydney, AUSTROADS, 2009.
- [3] Rivera, J.I., *Modelación de la peligrosidad en zonas laterales de caminos bidireccionales*, tesis (Magíster en Ciencias de la Ingeniería), Chile, Universidad de Concepción, P. 372, 2013.
- [4] AEC. *Manual de buenas prácticas para el diseño de márgenes de carreteras convencionales*, 1a ed., España, Asociación Española de Carreteras, 2010.
- [5] Stonex, K.A., *Roadside design for safety*, HRB, 39, pp. 120 – 156, 1960.
- [6] Powers, R.D., Hall, J.W., Hall, L.E. and Turner, D.S., The “forgiving roadside” design of roadside elements, in *International Symposium on Highway Geometric Design Practices* (1st, 1995, Boston, United States), 1995.
- [7] WSDOT. *Roadside manual*, 1st ed., Olympia, Washington State Department of Transportation, 2012.
- [8] AASHTO. *Roadside design guide*, 4th ed., Washington D.C., American Association of State Highways and Transportation Officials, 2011.
- [9] Zegeer, C., Reinfurt, D., Hummer, J. and Stewart, R., Accident effects of sideslope and other roadside features on two-lane roads. *Transportation Research Record*, 1195, pp. 103-118, 1988.
- [10] Perandones, J.M. and Ramos, G., *Road safety index*, España, Fundación para la Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía. P. 64, 2008.
- [11] AASHTO *Highway safety manual Vol. 2*, 1st ed., Washington D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [12] Harwood, D.W., Council, F.M., Hauer, E., Hughes, W.E. and Vogt, A., *Prediction of the expected safety performance of rural two-lane highways*, United States, Federal Highway Administration, P.194, 2009.
- [13] Ayati, E., Pirayesh, M., Sadeghi, A. and Moghaddam, A.M., *Introducing roadside hazard severity indicator based on evidential reasoning approach*, *Safety Science*, 50, pp. 1618–1626, 2012.
- [14] Karpinski, J., *Main Roads roadside hazard rating*, in *ARRB Conference (25th, 2005, Perth, Australia)*, 2012.
- [15] Pardillo, J., Domínguez, C. and Jurado, R., *Empirical calibration of a roadside hazardousness index for Spanish two-lane rural roads*, *Accident Analysis & Prevention*, 42, pp. 2018–2023, 2010.
- [16] Li, CH., Gao, H., Shen, S. and Qi, G., *Evaluation on roadside safety degree based on grey theory*, in *IEEE ITS Conference (9th, 2006, Toronto, Canada)*, 2006.
- [17] Cafiso, S., La Cava, G. and Montella, A., *Safety evaluation process for two-lane rural highways*, *Transportation Research Record*, 2019, pp. 136–145, 2007.
- [18] Echaveguren, T. and Vargas-Tejeda, S., *A model for estimating advisory speeds for horizontal curves of two-lane rural roads*, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(12), pp. 1234–1243, 2013.
- [19] DV. *Volúmenes de Tránsito Plan Nacional de Censos 1994 – 2012* [online], Santiago, Chile. [Visitado Marzo 15, 2012]. Disponible en: <http://servicios.vialidad.cl/censo/index.htm>.

Analytical model to determine optimal production lots considering several productive and logistics factors

Modelo analítico para determinar lotes óptimos de producción considerando diversos factores productivos y logísticos

Javier Valencia ^a, M^a Pilar Lambán ^b & Jesús Royo ^c

^a M. Sc., M. L., Doctorando en Dpto. en Ing. de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza, España, 644662@unizar.es

^b Dra. Profesor Colaborador, Dpto. de Ing. de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza, España, plamban@unizar.es

^c Dr. Profesor Titular, Dpto. de Ing. de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza, España, jaroyo@unizar.es

Received: June 20th, 2013. Received in revised form: October 28th, 2013. Accepted: November 20th, 2013

Abstract

The current economic crisis has led companies worldwide to pursue costs reductions in order to remain productive. To support this effort we propose an analytical model to establish the optimal lot size based on the celebrated EOQ (Economic Order Quantity) model. The value of this model is that –in order to provide solutions closer to the actual optimal– it includes several costs factors, many of them never before considered. Of particular interest are the incorporation of two characteristics of the model, the "Logistical index" first published in *Revista Dyna Colombia*, 179 [1], and the possibility of working with variable production times, features never included in a model of this type before. Also, to facilitate the implementation of this model several in companies, including SMEs, two simplifications and a solved problem are showed.

Keywords: Supply chain, logistics, optimal lot size, EOQ, logistics index

Resumen

La crisis económica actual ha impulsado a las empresas en todo el mundo a disminuir sus costos para mantenerse rentables, para apoyar este esfuerzo se propone un modelo analítico para la determinación del lote óptimo de producción basado en el reconocido modelo EOQ (Economic Order Quantity). La validez de este modelo radica en que incluye diversas partidas de costo, muchas de las cuales no se habían considerado previamente, lo que permite dar soluciones más próximas a los óptimos reales. De particular interés son dos características que incorpora el modelo, la incorporación del "Índice Logístico" publicado por primera vez en la *Revista Dyna Colombia*, 179 [1] y la posibilidad de trabajar con tiempos variables de producción, ambos aspectos nunca considerados en modelos similares. Además, para facilitar la aplicación del modelo en diversas empresas, incluyendo Pymes, se muestran dos simplificaciones del mismo y un problema resuelto.

Palabras Clave: Cadena de suministro, logística, lote óptimo, EOQ, índice logístico.

1. Introducción

La crisis económica actual ha incrementado en las empresas alrededor del mundo la necesidad de reducir sus costos operativos con el fin de mantenerse productivas y rentables, ya que esto es un factor clave para cualquier organización [2].

Existen diversas iniciativas que se pueden poner en marcha para buscar la reducción de los costos en una organización: Reducir la plantilla, externalizar operaciones, optimizar procesos, entre otras. En este trabajo nos enfocamos en la optimización de un proceso clave para cualquier empresa productiva, la determinación del lote óptimo de fabricación.

La importancia de determinar la cantidad óptima a producir, o comprar, en una organización es tal que el conocido modelo EOQ, presentado por Harris en 1915 [3], no solo se utiliza en múltiples empresas [4,5] sino que aún se enseña en muchos programas educativos en todo el mundo. Más aún, el artículo de Wagner y Whitin donde se presentó la versión dinámica de dicho modelo [6] fue seleccionado como uno de los diez trabajos más influyentes de la publicación "Management Science" de los últimos cincuenta años (1954-2004) [7].

El modelo EOQ tanto en su versión original como en la introducida por E. Taft en [8] denominada EPQ (Economic Production Quantity) intenta optimizar el tamaño del lote de compra o de producción al minimizar el resultado de combinar dos costos importantes en la gestión del



empresarial, el fijo de compra o de producción (e. g. actividades como las llamadas telefónicas para levantar el pedido o hacer los cambios necesarios en la línea de fabricación) y el de mantenimiento del inventario, en el cual se engloban costos como la renta, consumo eléctrico, mano de obra y otros tantos que se detallan en [1].

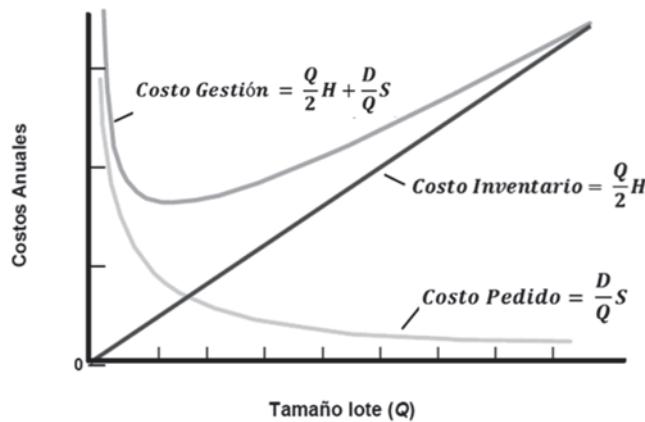


Figura 1. El modelo EOQ. Adaptada de [3].

En el modelo EOQ/EPQ se busca determinar el lote óptimo de producción (normalmente representado como Q^*) a partir de únicamente los siguientes datos:

H = Costo unitario anual de mantener el inventario.

D = Demanda.

S = Costo fijo de comprar (o producir).

Conociendo dichos datos el lote óptimo se determina al derivar e igualar a cero el costo de gestión ilustrado en la figura 1, obteniéndose así la ecuación (1).

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}} \quad (1)$$

Aunque este modelo aún es muy utilizado en múltiples empresas, diversos autores consideran que, por el reducido número de costos que toma en cuenta, es demasiado simplista y por lo tanto impreciso [6]. Como resultado de esto diferentes investigadores han propuesto recientemente modificaciones al modelo para obtener óptimos más próximos a los reales [10].

Entre los modelos desarrollados en los últimos años más destacados se encuentran el de Hall [11] y el de Mendoza [12] quienes incorporan el costo de la distribución en el cálculo de lotes óptimos. Otros trabajos destacados incluyen [13], donde se considera por primera vez costos de materia prima, y [14] donde se empieza a tomar en cuenta la necesidad de incorporar costos de reprocesso; la importancia de este último trabajo fue tal que una nueva versión de éste se presentó recientemente en [4].

Además de desarrollarse nuevos modelos que incorporan costos que no habían sido contemplados previamente, en la literatura reciente también ha cobrado gran importancia el dejar de considerar ciertos costos que tradicionalmente se han supuesto constantes para tratarlos como variables, siendo muestra de ello [15] y [16]. En [15] se propone un

modelo para determinar lotes óptimos de producción considerando costos de "set up" variables y en [16] es el costo de almacenaje el que de deja de considerarse constante.

Si bien los trabajos aquí expuestos resultan particularmente trascendentales por las aportaciones hechas no son los únicos en donde se proponen nuevos modelos de lotes óptimos, por lo que se recomienda al lector interesado en conocer la totalidad de modelos desarrollados la lectura de las revisiones de la literatura presentadas en [17-20].

Tanto del análisis de los modelos comentados como de las revisiones mencionadas se determinó que los trabajos realizados hasta la fecha tienden a enfocarse en desarrollar modelos que únicamente aportan alguna novedad relativa a esfuerzos previos, hechándose en falta un modelo con características integradoras [21] siendo esto la principal motivación para la realización de este trabajo.

Debido a lo anterior, es que el modelo propuesto toma en consideración tanto costos tratados previamente por diversos autores como costos que no habían sido tomados en cuenta, elegidos éstos porque resultan fundamentales para los sistemas productivos [21]. Así mismo, el modelo incorpora por vez primera ciertos elementos que permiten que éste se ajuste mejor a la realidad tales como los tiempos variables de producción o el uso del índice logístico (inductor de costo propuesto en [1] y en [21] que aproxima el costo de los procesos logísticos a una referencia en concreto, a partir de sus dimensiones). En las siguientes secciones de este artículo se detalla el modelo propuesto, secciones que se resumen en seguida. La 2 describe el proceso productivo a optimizar, la 3 detalla las características del modelo, la sección 4 presenta algunas simplificaciones del mismo, la sección 5 muestra un problema resuelto y la 6 presenta algunas conclusiones y posibles futuras líneas de investigación.

2. El proceso productivo

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar un modelo analítico para determinar el lote óptimo de producción de un sistema productivo concreto, al considerar diversos costos que afectan dicho proceso.

El proceso elegido para optimizar representa con buena precisión la forma de trabajar de diversas empresas [6] ya que, como sucede en los entornos industriales, éste integra diversas operaciones productivas incluyendo algunas propuestas en trabajos detallados en la sección 1 y, como sucede en dichos trabajos, para que el modelo propuesto pueda ser aplicado se requiere se satisfagan los siguientes supuestos del proceso:

- Se analiza un único producto.
- Se tiene, o se supone, una demanda constante a lo largo del año.
- Se tiene capacidad productiva para satisfacer la demanda.

El proceso productivo a optimizar se ilustra en la figura 2 y consiste en: Procesar la materia prima suficiente para

realizar Q productos, posteriormente inspeccionarlos (por lote) para determinarse cuáles resultan satisfactorios y cuáles deberán reprocesarse, lo que se hace de manera inmediata. Una vez el propio proceso retrabaja los productos, se realiza otra inspección para determinar qué productos son satisfactorios y satisfactorios y cuáles

resultan inservibles, mismos que deberán recibir una disposición final adecuada. Por último, los productos satisfactorios son almacenados y entregados al cliente (interno o externo) en cantidades fijas y en un tiempo establecido.

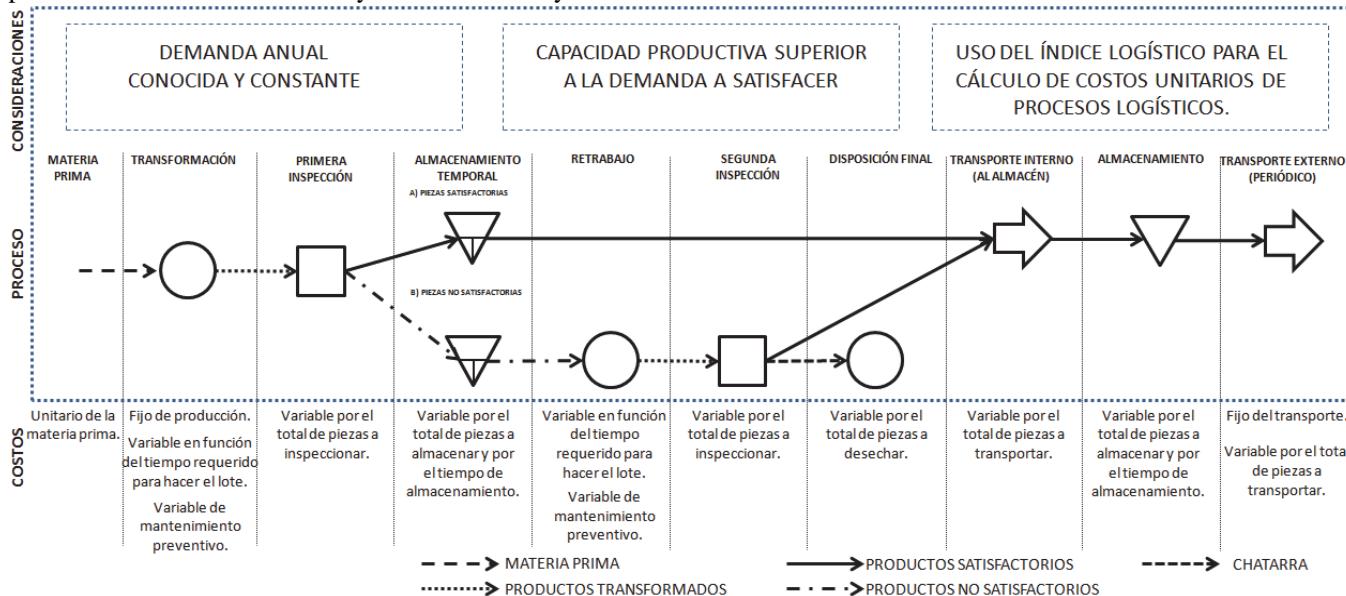


Figura 2. El proceso a optimizar.

Del proceso productivo comentado se desprende el comportamiento del inventario que se muestra en la figura 3, en la cual se muestra como durante el tiempo de transformación (T_1) el total de productos va en aumento – aunque no necesariamente a un ritmo constante – hasta alcanzar un primer nivel de stock máximo (H_1), inmediatamente después durante el tiempo T_2 los productos defectuosos son retrabajados a una tasa también variable, para alcanzarse el valor definitivo del stock (H), finalmente, dicho stock máximo decrece a un ritmo constante y periódico durante el plazo de entregas (T_3).

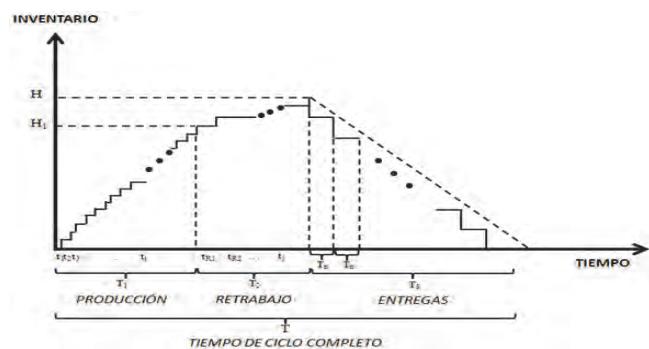


Figura 3. El volumen del inventario

3. El modelo propuesto

3.1. Características del modelo

Para determinar el tamaño de los lotes óptimos de producción del proceso estudiado se requiere en primera

instancia de determinar los costos a considerar para a partir de ellos encontrar una función costo objetivo (C_Q) la cuál, al minimizarla, permitirá calcular el lote óptimo (Q^*).

Para mantener el modelo de fácil aplicación para las empresas, incluyendo pymes, no se consideraron todos los costos que afectan al proceso productivo descrito sino únicamente aquellos que, en la opinión de otros autores como [21] resultan claves en la producción, dichos costos se muestran de forma gráfica en la figura 4.

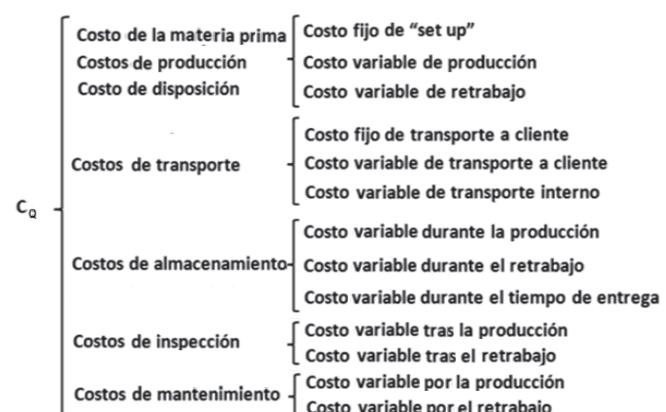


Figura 4. Las partidas de la función costo.

A pesar de que en el presente trabajo no se han considerado todos los costos relacionados con el proceso analizado, el modelo aquí presentado es él que al día de hoy introduce más variables de costos en el cálculo de lotes óptimos, esto de acuerdo con una extensa revisión de la literatura realizada.

Para la obtención de lotes óptimos más precisos, además de considerarse nuevos costos, en este trabajo se introducen por primera vez ciertas aportaciones que permiten ajustar el modelo más a la “realidad”. Entre dichas aportaciones se cuentan la posibilidad de que los tiempos de producción no sean constantes sino que sigan una distribución Normal (claramente, de estarse en presencia de tiempos constantes de producción se tiene un caso particular del modelo propuesto) así como el integrar el índice logístico, inductor de costo que permite ajustar los costos logísticos a una referencia en concreto.

3.2. La formulación matemática

Para incorporar tanto las partidas de costo como las aportaciones expuestas en la sección 3.1 de este trabajo a la función (C_Q) que represente el proceso productivo descrito se requiere una importante cantidad de variables, mismas que se presentan con detalle en la tabla 1.

Tabla 1.
Los datos de entrada.

PROCESO		COSTO
λ	Demanda anual.	K Costo fijo de prod.
P	Tasa de producción para el ciclo estudiado.	C Costo de producción por unidad de tiempo.
x	Porción de productos defectuosos.	C_R Costo de reproceso por unidad de tiempo.
P_1	Tasa de reproceso de los productos defectuosos.	C_s Costo de manejar la chatarra producida.
Θ_1	Porción de productos convertidos en chatarra.	r Costo de la materia prima por producto.
Q	Tamaño del lote.	K_1 Costo fijo por envío
N	Entregas a realizar.	C_T Costo unitario de transporte al cliente.
I_{logA}	Índice logístico de almacenamiento.	C_{TI} Costo unitario de transporte interno.
I_{logT}	Índice logístico de transporte.	h_1 Costo de almacenaje unitario por tiempo durante el reproceso, será el costo medio si el índice logístico es diferente de 1.
H_1	Inventario al finalizar la producción inicial.	
H	Inventario máximo tras el reproceso.	
T_1	Tiempo de producción.	
T_2	Tiempo de reproceso.	
T_3	Tiempo del período de envíos.	
μ_{tp}	Tiempo medio unitario de producción.	h Costo de almacenaje unitario por tiempo, será el costo medio si el índice logístico es diferente de 1.
μ_{tr}	Tiempo medio unitario de reproceso.	
t_j	Tiempo unitario de reproceso del prod. j	M Costo unitario de mantenimiento.
t_i	Tiempo unitario de fabricación del prod. i.	N Costo unitario de inspección.

Si bien la nomenclatura empleada en la tabla 1 guarda cierta similitud con la utilizada en [4] y [15] la incorporación de diversos elementos que no se habían considerado previamente tales como el índice logístico necesitó de definir nuevas variables.

Más aún, para incorporar el índice logístico al modelo expuesto se requirió de modificarlo de tal manera que el costo de los procesos logísticos se ajustaran a una referencia en concreto no a partir del total, como se propuso en [1] y [22], sino de la media de las referencias, tal cual se puede

ver en el en el apéndice 1 donde se detalla el cálculo del índice logístico tal como se ha empleado aquí mientras que la importancia de su uso se muestra con detalle en la sección 5.

Como se pude apreciar en la ecuación (1) no todos los costos detallados en la figura 4 se ven influenciados por la presencia del índice logístico sino que, como su nombre lo indica, este solo se debe considerar en procesos como el transporte o el almacenaje.

$$\begin{aligned}
 C_Q = & \text{Costo variable de materia prima} + \text{Costo fijo de set up} + \\
 & \text{Costo variable de producción} + \text{Costo variable de retrabajo} + \\
 & \text{Costo variable de la disposición de la chatarra} + \text{Índice} \\
 & \text{logístico del transporte} (\text{Costo fijo del transporte al cliente} + \\
 & \text{Costo variable del transporte al cliente} + \text{Costo variable del} \\
 & \text{transporte interno}) + \text{Índice logístico del almacenaje} (\text{Costo} \\
 & \text{variable de almacenaje durante la producción} + \text{Costo variable} \\
 & \text{de almacenaje durante el retrabajo} + \text{Costo variable de} \\
 & \text{almacenaje durante las entregas}) + \text{Costo variable de la} \\
 & \text{inspección tras la producción} + \text{Costo variable de la inspección} \\
 & \text{tras el retrabajo} + \text{Costo variable de mantenimiento por} \\
 & \text{producción} + \text{Costo variable de mantenimiento por retrabajo} \\
 & (1)
 \end{aligned}$$

La ecuación (1), la cual se obtuvo de sumar los costos detallados en la figura 4, permite la formulación de la función C_Q mediante un significativo análisis de la sección 2, el cual permite sustituir las partidas de costos por sus equivalencias utilizando las variables operativas expresadas en la tabla 1. Como se puede ver en la ecuación (2), en la formulación de C_Q se mantuvo tanto la totalidad y el orden de los sumandos como el uso del índice logístico de la ecuación (1).

$$\begin{aligned}
 C_Q = & rQ + K + C \sum_{i=1}^Q t_i + C_R \sum_{j=1}^{Qx} t_j + \\
 & C_s x \theta_1 Q + n K_1 + \\
 & I_{logT} [C_{TH} + C_{TIH}] + I_{logA} \left[h \sum_{i=1}^{Q-1} t_{i+1} i + \right. \\
 & \left. h_1 \sum_{j=1}^{Qx} (t_j) (Qx - j) + h H_1 \sum_{j=1}^{Qx} t_j + \right. \\
 & \left. h \sum_{j=1}^{Qx-1} t_{j+1} j + h \left(\frac{n-1}{2n} \right) H T_3 \right] + M Q + \\
 & M Q x + N Q + N x Q
 \end{aligned} \quad (2)$$

Para el correcto entendimiento de la ecuación (2) en el apéndice 2 se detallan ciertos conceptos necesarios para la obtención de dicha ecuación los cuales pueden resultar poco intuitivos.

Para determinar el tamaño del lote óptimo (Q^*) a partir de la función C_Q se requeriría derivar la ecuación (2), igualarla a cero y hallar el valor de Q que satisfaciera la igualdad. Esto, sin embargo, no se puede realizar ya que una de las aportaciones de este modelo es que por primera vez se permite que los tiempos de trabajo (y por ende sus costos) no sean constantes sino que sigan una distribución Normal, generando esto que la ecuación (2) no sea derivable.

Es por lo anterior que, a partir de la ecuación 2 y usando la esperanza matemática, se propone encontrar la función costo anual esperado (C_{AE}) ya que, por las propiedades de la esperanza matemática de la distribución Normal, dicha función sí es derivable. El cálculo de cómo se obtuvo la función C_{AE} se

muestra en el apéndice 3 y dicha función se detalla en la ecuación (3).

$$\begin{aligned}
 C_{AE} &= \frac{\lambda r}{1 - \theta_1 x} + \frac{\lambda K}{Q(1 - \theta_1 x)} + \frac{\lambda C \mu_{tp}}{1 - \theta_1 x} + \frac{\lambda C_R x \mu_{tr}}{1 - \theta_1 x} \\
 &+ \frac{\lambda C_S x \theta_1}{1 - \theta_1 x} + \frac{\lambda n K_1}{Q(1 - \theta_1 x)} + \lambda I_{\log T} (C_T + C_{TI}) \\
 &+ \frac{\lambda I_{\log A}}{1 - \theta_1 x} \left[\frac{Q - 1}{2} h \mu_{tp} \right. \\
 &+ h_1 \left(Q \mu_{tr} x^2 - \mu_{tr} x \frac{Qx + 1}{2} \right) + Q h (1 - x) x \mu_{tr} \\
 &+ h \mu_{tr} x \frac{Qx - 1}{2} + h \frac{n - 1}{2n} (1 - \theta_1 x) (T - Q \mu_{tp}) \\
 &\left. - Q x \mu_{tp} \right] + \frac{\lambda (M + Mx + N + Nx)}{1 - \theta_1 x} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Como se puede apreciar, la función C_{AE} sí es derivable ya que los tiempos de producción, originalmente variables, han sido sustituidos por tiempos medios (μ_{tp} y μ_{tr}) por lo que – como se haría si la función C_Q fuera derivable – se puede determinar Q^* derivando e igualando a cero C_{AE} . De acuerdo con lo anterior, se presentan la primera y la segunda derivada de C_{AE} en las ecuaciones (4) y (5).

$$\begin{aligned}
 d(C_Q) &= -\frac{\lambda K}{Q^2(1 - \theta_1 x)} - \frac{\lambda n K_1}{Q^2(1 - \theta_1 x)} + \frac{h \lambda \mu_{tp} I_{\log A}}{2 - 2\theta_1 x} \\
 &+ \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 \lambda I_{\log A}}{1 - \theta_1 x} - \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 \lambda I_{\log A}}{2 - 2\theta_1 x} \\
 &+ \frac{h x \mu_{tr} \lambda I_{\log A}}{1 - \theta_1 x} - \frac{h x \mu_{tr} \lambda I_{\log A}}{2 - 2\theta_1 x} \\
 &- h \mu_{tp} h \lambda I_{\log A} \frac{n - 1}{2n} - h x \mu_{tp} \lambda h I_{\log A} \frac{n - 1}{2n} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$(C_Q) = \frac{2\lambda K}{Q^3(1 - \theta_1 x)} + \frac{2\lambda n K_1}{Q^3(1 - \theta_1 x)} \quad (5)$$

Dado que $d^2(C_{AE})$ es positiva, ya que λ , K , K_1 , Q y $(1 - \theta_1 x)$ son siempre positivas, entonces la segunda derivada es convexa para toda Q por lo que efectivamente se puede calcular Q^* igualando $d^2(C_{AE})$ a cero. Dicha igualación, mediante la cual se halló la ecuación (6), se muestra en el apéndice 4.

$$Q^* = \sqrt{\frac{2K + 2nK_1}{I_{\log A} \left\{ \mu_{tr} x (h_1 x + 2h - hx) + h \mu_{tp} \left[1 - (1 - \theta_1 x) \left(\frac{n-1}{n} \right) (1 + x) \right] \right\}}} \quad (6)$$

Como se puede ver, para obtener el lote óptimo no se requiere de contar con todas las variables contempladas originalmente, aunque el contar con ellas permite conocer fácilmente otros valores importantes tal como el costo anual esperado mínimo, el cual se obtiene de sustituir Q^* en la ecuación (3).

4. Simplificaciones del modelo

En ciertas empresas, sobre todo en pymes, puede resultar complicado conocer con precisión todos los factores requeridos para determinar el lote óptimo mediante la formulación presentada en la sección 3 por lo que, para facilitar la implementación del modelo, se dan dos simplificaciones de éste:

- Considerando $I_{\log} = 1$.** Se considera que se conoce con precisión los costos logísticos del producto que se analiza.
- Considerando $\Theta = 0$.** Se considera que el proceso estudiado no genera chatarra por lo que tras el reprocesso todos los productos son satisfactorios.

4.1. Simplificación 1, considerando $I_{\log} = 1$

El costo anual esperado sería:

$$\begin{aligned}
 C_{AE} &= \frac{\lambda r}{1 - \theta_1 x} + \frac{\lambda K}{Q(1 - \theta_1 x)} + \frac{\lambda C \mu_{tp}}{1 - \theta_1 x} + \frac{\lambda C_R x \mu_{tr}}{1 - \theta_1 x} \\
 &+ \frac{\lambda C_S x \theta_1}{1 - \theta_1 x} + \frac{\lambda n K_1}{Q(1 - \theta_1 x)} + \lambda (C_T + C_{TI}) \\
 &+ \frac{1}{1 - \theta_1 x} \left[\frac{Q - 1}{2} h \mu_{tp} \right. \\
 &+ h_1 \left(Q \mu_{tr} x^2 - \mu_{tr} x \frac{Qx + 1}{2} \right) + Q h (1 - x) x \mu_{tr} \\
 &+ h \mu_{tr} x \frac{Qx - 1}{2} + h \frac{n - 1}{2n} (1 - \theta_1 x) (T - Q \mu_{tp}) \\
 &\left. - Q x \mu_{tp} \right] + \frac{\lambda (M + Mx + N + Nx)}{1 - \theta_1 x} \quad (7)
 \end{aligned}$$

y el lote óptimo tendría un valor de:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2K + 2nK_1}{I_{\log A} \left\{ \mu_{tr} x (h_1 x + 2h - hx) + h \mu_{tp} \left[1 - (1 - \theta_1 x) \left(\frac{n-1}{n} \right) (1 + x) \right] \right\}}} \quad (8)$$

4.2. Simplificación 2, considerando $\Theta_1 = 0$

El costo anual esperado sería:

$$\begin{aligned}
 E[TCU(Q)] &= \lambda r + \frac{\lambda K}{Q} + \lambda C \mu_{tp} + \lambda C_R x \mu_{tr} + \\
 &\frac{\lambda n K_1}{Q} + \lambda I_{\log T} (C_T + C_{TI}) + \lambda I_{\log A} \left[\frac{Q - 1}{2} h \mu_{tp} + \right. \\
 &h_1 \left(Q \mu_{tr} x^2 - \mu_{tr} x \frac{Qx + 1}{2} \right) + Q h (1 - x) x \mu_{tr} + \\
 &h \mu_{tr} x \frac{Qx - 1}{2} + h \frac{n - 1}{2n} (T - Q \mu_{tp} - Q x \mu_{tp}) \left. \right] + \lambda (M + \\
 &Mx + N + Nx) \quad (9)
 \end{aligned}$$

y el lote óptimo tendría un valor de:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2K + 2nK_1}{I_{\log A} \left\{ \mu_{tr} x (h_1 x + 2h - hx) + h \mu_{tp} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n} \right) (1 + x) \right] \right\}}} \quad (10)$$

n la siguiente sección se ilustra, con un ejemplo, el grado de variación que puede existir al calcular Q^* con el modelo original y con las versiones simplificadas.

5. Problema resuelto

El problema que se presenta es una adaptación del propuesto en [4] en el cual se desea determinar el lote óptimo de producción con los valores de la tabla 2.

Tabla 2.
Los datos de entrada del caso de estudio.

PROCESO		
λ	Demanda anual (productos/año).	3400
P	Tasa de producción para el ciclo estudiado (productos/año).	60000
X	Porción de productos defectuosos.	0,15
Θ_1	Porción de productos convertidos en chatarra durante el reprocesso.	0,1
P_1	Tasa de reprocesso (productos/año).	2200
N	Entregas a realizar.	4
μ_{tp}	Tiempo medio de producción (hr).	0,5
μ_{tr}	Tiempo medio de reprocesso (hr).	0,8
I_{logA}	Índice logístico de almacenamiento.	0,9
I_{logT}	Índice logístico de transporte.	0,5
T	Tiempo de ciclo (años).	2,23
COSTO		
K	Costo fijo de producción.	\$ 20.000,0
C	Costo de producción variable (\$/hr).	\$ 200,00
C_R	Costo de reprocesso variable (\$/hr).	\$ 120,00
C_S	Costo de manejar la chatarra.	\$ 20,00
K_1	Costo fijo por envío.	\$ 4.350,00
C_T	Costo unitario de transporte externo.	\$ 0,10
C_{TI}	Costo unitario de transporte interno.	\$ 0,05
h_1	Costo de almacenaje unitario en el reprocesso (\$/hr).	\$ 0,0023
H	Costo de almacenaje variable (\$/hr).	\$ 0,0046
M	Costo del mantenimiento por producto.	\$ 0,05
N	Costo de inspección por producto.	\$ 0,01
r	Costo de la materia prima por producto.	\$ 10,00

Para resolver el problema basta con sustituir los valores dados en las ecuaciones (6) y (3) para el modelo completo y en las (7)-(10) para las versiones simplificadas; los resultados obtenidos de dichos cálculos se muestran en la tabla 3, a la cual además se le han agregado las columnas “Costo diario esperado” y “variación de Q^* ”.

Tabla 3. Los resultados del caso de estudio.

Q^*	C_{AE}	Costo diario esperado	Variación de Q^*
8.742	\$ 460.471,25	\$ 1.261,57	-
7.314	\$ 466.492,72	\$ 1.278,06	-19,52%
8.836	\$ 452.239,51	\$ 1.239,01	1,06%

Como se puede apreciar, el tamaño del lote puede variar significativamente cuando no se considera el índice logístico, en cambio, la generación de chatarra prácticamente no afecta el valor de Q^* . El hecho de que la generación, o no, de chatarra prácticamente no afecte los resultados obtenidos es una muestra de la robustez propia de

este tipo de modelos, característica que motiva su aplicación.

Aunque, como se vio anteriormente, los resultados de este tipo de modelos tienden a verse poco influenciados por cambios operativos sí pueden ser sensibles a diferencias significativas en los costos ingresados. Estas diferencias pueden deberse a que en el ambiente empresarial es común trabajar con costos medios, más aún de procesos logísticos [22].

Es por lo anterior que resulta valioso el contar con una herramienta como el índice logístico, cuyo uso en un modelo de lote óptimo se propone por primera vez en este trabajo, para ajustar los costos logísticos a una referencia concreta disminuyendo así el error en el tamaño de lote a producir. Como muestra de lo anterior se ilustra en las figuras 5 y 6 la variación de Q^* con respecto a I_{logA} y de C_{AE} con respecto a I_{logA} y I_{logT} para el problema resuelto.

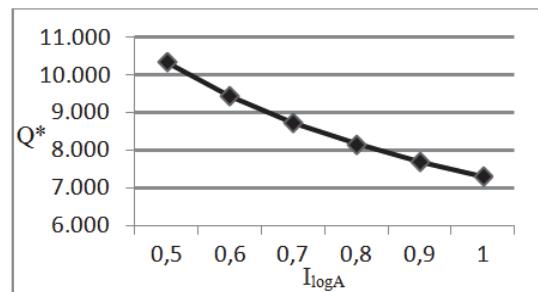


Figura 5. Variación de Q^* generada por I_{logA}

Del análisis de la figura 5 se puede determinar que el índice logístico de almacenaje guarda una relación inversa con el tamaño del lote óptimo es decir, de forma general productos de mayores dimensiones corresponderán con lotes óptimos de producción más reducidos. Así mismo, de la figura 6 se concluye que tanto el índice logístico de transporte como el de almacenaje guardan una relación directa con el costo anual esperado, siendo para el problema estudiado más importante en la variación del costo el que corresponde al almacenaje.

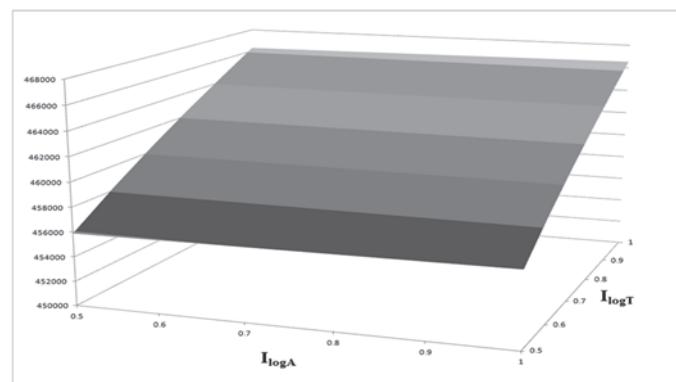


Figura 6. Variación de C_{AE} debido a I_{logA} e I_{logT}

6. Conclusiones

La crisis económica mundial ha acrecentado la necesidad de las empresas de minimizar sus costos operativos para mantenerse competitivas y rentables, para ello existen diversas estrategias que se pueden poner en marcha, siendo la optimización de los procesos las más recomendadas por diversas fuentes especializadas. De acuerdo con esto es que en este trabajo se presenta un modelo para contribuir con la reducción de costos a través de la optimización del proceso productivo, concretamente del tamaño del lote a fabricar.

Si bien el modelo de lote óptimo aquí propuesto tiene sus raíces en el reconocido modelo EOQ/EPQ éste permite determinar tamaños de lotes óptimos significativamente más precisos que los que se obtendrían no solo con dicho modelo sino con los propuestos en la literatura reciente. Lo anterior debido a que el modelo presentado incorpora en su cálculo las que en la opinión de otros autores son las principales partidas de costo que afectan a la producción.

Además de considerar más costos que en ningún modelo de lote óptimo propuesto previamente, en este trabajo se incorporan por primera vez dos aportaciones que permiten ajustar con mayor precisión el modelo planteado a un proceso productivo, el uso del índice logístico –el cual permite ajustar los costos logísticos a una referencia en concreto– y el dejar de considerar los tiempos de producción constantes para considerar que siguen una distribución Normal.

Otra aportación de este trabajo es que para facilitar la implementación del modelo propuesto en las empresas, incluyendo pymes, se mostró que tan solo se requiere conocer nueve valores de entrada, muchos de los cuales no son difíciles de obtener a partir de datos históricos. Más aún, y siempre con el objetivo de facilitar la aplicación del modelo, dos versiones simplificadas del mismo y un problema resuelto fueron presentados.

Para finalizar el presente artículo, se proponen algunas líneas de investigación que enriquecerían lo aquí expuesto. Particularmente interesantes serían aquellas que desarrollen modelos similares considerando tiempos de producción que siguieran otras funciones de probabilidad o comportamientos estocásticos. Así mismo, una comparativa entre el modelo analítico expuesto y uno que permitiera la existencia de restricciones sería muy valiosa.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a los revisores anónimos por su valiosos comentarios para mejorar la calidad de este trabajo. Así mismo, agradecen al Centro Español de Logística, (CEL) el reconocimiento otorgado en 2010 a la mejor Tesis Doctoral española en logística referenciada en [22], de donde surge parte de este trabajo. Javier Valencia agradece al CONACYT y al CONCYTEY por la beca otorgada.

8. Apéndices

8.1. Apéndice 1

El índice logístico (I_{log}) se calculó con:

$$I_{peso} = \frac{Peso\ de\ la\ referencia}{\mu_{peso\ de\ las\ referencias}} \quad (11)$$

$$I_{Vol} = \frac{Volumen\ de\ la\ referencia}{\mu_{volumen\ de\ las\ referencias}} \quad (12)$$

$$I_{log} = \alpha I_{peso} + \beta I_{vol} \quad (13)$$

Donde α y β son coeficientes de ponderación establecidos para cada proceso a analizar y lo cuales cumplen $\alpha+\beta=1$.

8.2. Apéndice 2

El cálculo del costo de almacenaje durante los n períodos de entrega se obtuvo de sumar los $n-1$ “rectángulos de costo” de base T_n que se muestran en la figura 3, dicha suma se detalla a continuación,

$$\frac{HT_3}{n} \left(\sum_{i=1}^{n-1} i \right) h = \frac{Hh(n-1)T_3}{2n} \quad (14)$$

así mismo, el valor de T_3 es,

$$T_3 = T - \sum_{i=1}^Q t_i - \sum_{j=1}^{Qx} t_j \quad (15)$$

por lo que substituyendo los valores H , H_1 y T_3 por los datos de entrada y ordenando en función de Q , se obtiene:

$$\begin{aligned} & C_Q \\ &= Qr + K + C \sum_{i=1}^Q t_i \\ &+ C_R \sum_{j=1}^{Qx} t_j + QC_s x \theta_1 + nK_1 + QI_{log T}(C_T + C_{T1})(1 \\ &- \theta_1 x) + I_{log A} \left[h \sum_{i=1}^{Q-1} t_{i+1} i + h_1 \sum_{j=1}^{Qx} (t_j)(Qx - j) \right. \\ &+ Qh(1 \\ &- x) \sum_{j=1}^{Qx} t_j + h \sum_{j=1}^{Qx-1} t_{j+1} j + Qh \left(\frac{n-1}{2n} \right) (1 - \theta_1 x)(T \\ &\left. - \sum_{i=1}^Q t_i - \sum_{j=1}^{Qx} t_j \right] + Q(M + Mx + N + Nx \end{aligned} \quad (16)$$

8.3. Apéndice 3

Calculando C_{AE} con,

$$C_{AE} = \frac{E[C_Q]}{E[T]} \quad (17)$$

y considerando que,

$$T = \frac{Q}{\lambda} (1 - \theta_1 x) \quad (18)$$

se detalla la función costo anual esperado, considerando los tiempos medios de producción y de reproceso como μ_{tp} y μ_{tr} ,

$$\begin{aligned} &= \frac{Qr}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} + \frac{K}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} + \frac{QC\mu_{tp}}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} \\ &+ \frac{QC_R x \mu_{tr}}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} + \frac{QC_S x \theta_1}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} + \frac{nK_1}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} \\ &+ \frac{QI_{log A}}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} (C_T + C_{TI})(1 - \theta_1 x) \\ &+ \frac{I_{log A}}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} \left[\frac{Q(Q-1)}{2} h \mu_{tp} \right. \\ &+ h_1 \left(\mu_{tr} Q^2 x^2 - \mu_{tr} Q x \frac{(Qx+1)}{2} \right) \\ &+ Qh(1-x)(Qx)(\mu_{tr}) + h\mu_{tr}(Qx) \frac{(Qx-1)}{2} \\ &+ Qh \left(\frac{n-1}{2n} \right) (1 - \theta_1 x) (T - Q\mu_{tp} - Qx\mu_{tp}) \left. \right] \\ &+ \frac{Q(M + Mx + N + Nx)}{\frac{Q}{\lambda}(1 - \theta_1 x)} \end{aligned} \quad (19)$$

Simplificando se obtiene la ecuación (3) comentada previamente en la sección 3.

8.4. Apéndice 4

Para obtener el lote óptimo se iguala la primera derivada a cero y se despeja Q ,

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{\lambda K}{Q^2(1 - \theta_1 x)} - \frac{\lambda n K_1}{Q^2(1 - \theta_1 x)} + \frac{h \lambda \mu_{tp} I_{log A}}{2 - 2\theta_1 x} \\ &+ \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 \lambda I_{log A}}{1 - \theta_1 x} - \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 \lambda I_{log A}}{2 - 2\theta_1 x} \\ &+ \frac{h x \mu_{tr} \lambda I_{log A}}{1 - \theta_1 x} - \frac{h x^2 \mu_{tr} \lambda I_{log A}}{1 - \theta_1 x} \\ &+ \frac{h x^2 \mu_{tr} \lambda I_{log A}}{2 - 2\theta_1 x} - h \mu_{tp} \lambda I_{log A} \frac{n-1}{2n} \\ &- h x \mu_{tp} \lambda I_{log A} \frac{n-1}{2n} \end{aligned} \quad (20)$$

reordenando y simplificando se obtiene,

$$\begin{aligned} &\frac{\lambda K}{Q^2(1 - \theta_1 x)} + \frac{\lambda n K_1}{Q^2(1 - \theta_1 x)} \\ &= \frac{h \lambda \mu_{tp} I_{log A}}{2 - 2\theta_1 x} + \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 \lambda I_{log A}}{1 - \theta_1 x} - \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 \lambda I_{log A}}{2 - 2\theta_1 x} \\ &+ \frac{h x \mu_{tr} \lambda I_{log A}}{1 - \theta_1 x} - \frac{h x^2 \mu_{tr} \lambda I_{log A}}{1 - \theta_1 x} \\ &+ \frac{x h^2 \mu_{tr} \lambda I_{log A}}{2 - 2\theta_1 x} - h \mu_{tp} \lambda I_{log A} \frac{n-1}{2n} - h x \mu_{tp} \lambda I_{log A} \frac{n-1}{2n} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} Q^2 &= \frac{2nK_1 + 2K}{I_{log A} \left\{ \frac{h_1 \mu_{tr} x^2 + 2h x \mu_{tr} \lambda I_{log A} - h x^2 \mu_{tr} \lambda I_{log A} + h \mu_{tp} \lambda I_{log A}}{\left[1 - (1 - \theta_1 x) \left(\frac{n-1}{n} \right) (1+x) \right]} \right\}} \end{aligned} \quad (22)$$

Referencias

- [1] Lambán, M.P., Royo, J., Valencia, J., Berges, L. y Galar, D., Modelo para el cálculo del costo de almacenamiento de un producto: Caso de estudio en un entorno logístico, Dyna Colombia, 179, pp. 23-32, 2013.
- [2] Baykasoglu, A. y Kapanoglu, V., Developing a service costing system and an application for logistics companies, Int. Journal of Agile Manuf., 9, pp. 13-18, 2006.
- [3] Harris, F. W., What quantity to make at once, in The Library of Factory Mgt. Vol. 5, Operation and Costs, The Factory Mgt. Series, Shaw Co. pp. 47-52, 1915.
- [4] Yuan, P., Shang, L., Chun, C. y Huei, C., Mathematical modeling for determining the replenishment policy for EMQ model with rework and multiple shipments, Mathematical and computer modeling, 54, pp. 2165-2174, 2011.
- [5] Salameh, M.K. and Jaber, M.Y., Economic production model for items with imperfect quality, IJPE, 64, pp. 59-64, 2000.
- [6] Wagner, H. M. y Whitin, T. M., Dynamic version of the economic lot size model, Management Science, 5, pp. 89-96, 1958.
- [7] Hopp, W., Ten most influential papers of Management Science's first fifty Years, Management Science, 50, 1763, 2004.
- [8] Taft, E. W., The most economical production lot, The Iron Age, 101, pp. 1410-1412, 1918.
- [9] Correa, A. y Gómez, R., Tecnologías de la información en la CdS, Revista Dyna Colombia, 157, pp. 37-48, 2009.
- [10] Jaber, M., Bonney, M. y Moualek, I., An economic order quantity model for an imperfect production process with entropy cost, IJPE, 118, pp. 26-33, 2009.
- [11] Hall, R., On the integration of production and distribution: Economic Order and production quantity implications, Transportation Research Part B: Methodological, 30, 5, pp. 387-403, 1996.
- [12] Mendoza, A. y Ventura, J., Incorporating quantity discounts to the EOQ model with transportation costs, IJPE, 113, pp. 754-765, 2008.
- [13] Sarker, R. y Khan, L., An optimal batch size for a production system operating under periodic delivery policy. Computers & Industrial Engineering, 37, pp. 711-730, 1999.
- [14] Jamal, A., Sarker, R. y Mondal, S., Optimal manufacturing batch size with rework process at a single-stage production system, Comp. & Ind. Eng., 47, pp. 77-89, 2004.
- [15] Darwis, M. A., EPQ models with varying set up costs, IJPE, 113, pp. 297-306, 2008.
- [16] Pando, V. García, J., San José, L. y Sicilia, J., Maximizing profits in an inventory model with both demand rate and holding cost per unit time dependent on the stock level, Computers & Industrial Engineering, 62, pp. 599-608, 2012.

- [17] Khan, M., Jaber, M., Guiffrida, A. y Zolfaghari, S., A review of the extensions of a modified EOQ model for imperfect quality item, IJPE, 132, pp. 1-12, 2011.
- [18] Glock, C. H., The joint economic lot size problem, IJPE, 135, pp. 671-686, 2012.
- [19] Ramasesh, R., Lot-sizing decisions under limited-time price incentives: A review, Omega-International Journal of Management Science, 38, pp. 118-135, 2010.
- [20] Sufen, C., Purchase-Inventory Model with Varying Purchase Price: A Review, Memorias de la Int. Conf. on Mgt Science and Engineering, Wuhan, China, Tomo 4, pp. 1211-126, Octubre 2010.
- [21] Colledani, M. y Tolio, T., Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 61, pp. 455-458, 2012.
- [22] Lambán, M., Determinación de costos de procesos de la Cadena de Suministro e influencia de factores productivos y logísticos. Tesis (Ph. D.) Universidad de Zaragoza, 2010.

Microbicidal effect of solar radiation (SODIS) combined with *Artemisia annua*

Efecto microbicida de la radiación solar (SODIS) combinado con *Artemisia annua*

Mariana Muñoz-Restrepo ^a, Leidy Viviana Orrego ^b, Diana Carolina Muñoz-Arango ^c, Carlos Neftaly Lozano-Andrade ^d, Diana Carolina Guzman-O. ^e, Maria Cecilia Escobar-Restrepo ^f, Yamilet Arcos-Arango ^g, Néstor Jaime Aguirre-R. ^h, Pierre Lutgen ⁱ & Roberto Mejia-Ruiz ^j

^a Estudiante de Microbiología Industrial y Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia, mariana412@gmail.com

^b Estudiante de Microbiología Industrial y Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia, vivianajph@hotmail.com

^c Estudiante de Microbiología Industrial y Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia, diana.udea@gmail.com

^d Estudiante de Microbiología Industrial y Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia, neftaly.lozano@gmail.com

^e Estudiante del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca, Colombia, diancguz@gmail.com

^f Bacterióloga y Laboratorista Clínico, MSc en Biología, Universidad de Antioquia, Colombia, mariac@udea.edu.co

^g Bacterióloga y Laboratorista Clínico, MSc en Biología, Universidad de Antioquia, Colombia, yaarcos@hotmail.com

^h PhD en Recursos Naturales, Universidad de Antioquia, Colombia, naguirre@udea.edu.co

ⁱ PhD en Físico Química, Université Catholique de Louvain, lutgenp@gms.lu

^j Ingeniero Sanitario, MsC en Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia, rmejia@udea.edu.co

Received: August 23th, 2013. Received in revised form: October 28th, 2013. Accepted: November 29th, 2013

Abstract

This study evaluates the SODIS and SODIS method combined with *Artemisia annua* (SODIS+A. annua) as an alternative for water disinfection in communities without access to potable water. The efficiency of the method in removing *E. coli*, *B. subtilis*, *E. faecalis* and *S. typhimurium* was determined using PET bottles with sterile distilled water and an initial concentration of 1×10^6 UFC/ml of each microorganism. For SODIS+A. annua a 10% (v/v) infusion of *A. annua* was added; the bottles were exposed to sunlight for at least 6 hours and three variables (water temperature, solar radiation and turbidity) were measured. It was found that SODIS treatment was more efficient in the removal of the four microorganisms than SODIS + *A. annua*. The removals were higher after four hours of exposure to the bacterial species in their vegetative state.

Keywords: Solar disinfection (SODIS), *Artemisia annua*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Enterococcus faecalis*, *Bacillus subtilis*, solar radiation.

Resumen

En este estudio se evaluó el método SODIS y SODIS combinado con *Artemisia annua* como una alternativa para la desinfección del agua en comunidades sin acceso a agua segura. Se determinó la eficiencia del método en la remoción de *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Enterococcus faecalis* y *Salmonella typhimurium* usando botellas tipo PET con agua destilada estéril y una concentración inicial de 1×10^6 UFC/ml de cada microorganismo. Para la combinación SODIS-*A. annua* se adicionó a las botellas una infusión de *A. annua* al 10% (v/v); las botellas fueron expuestas al sol durante mínimo 6 horas y se determinaron las variables temperatura del agua, radiación solar y turbidez. Se encontró que el tratamiento SODIS fue más eficiente en la remoción de los cuatro microorganismos que el tratamiento SODIS + *A. annua*. Las remociones más altas se encontraron a partir de las cuatro horas de exposición para las especies bacterianas en estado vegetativo.

Palabras Clave: Desinfección solar (SODIS), *Artemisia annua*, *Escherichia coli*, *Salmonella typhimurium*, *Enterococcus faecalis*, *Bacillus subtilis*, Radiación solar.

1. Introducción

El agua para el consumo humano es responsable de cerca de 4 millones de muertes al año en todo el planeta, cada ocho segundos un niño muere a causa de enfermedades relacionadas

con la contaminación del agua [1]; razón por la cual los procesos de desinfección o de potabilización tienen como objetivo principal la inactivación de microorganismos patógenos que viven o llegan al agua desde diferentes fuentes. [2,3]

Entre las tecnologías para desinfectar el agua de consumo que más se acerca a los requisitos de eficiencia y bajo costo, está la tecnología que utiliza la radiación solar (SODIS) del acrónimo SOlar-DISinfection. La desinfección solar no es una tecnología nueva, existen descripciones de comunidades en el subcontinente de la India hace cerca de 2000 años que disponían su agua de beber en bandejas abiertas para ser “bendecidas por el sol”; su efecto bactericida fue primero investigado por Downes y Blunt en 1877 [4], pero fue el investigador Aftim Acra y colaboradores en Beirut 1984 [5], quienes publicaron el primer trabajo sobre el uso de la luz solar para desinfectar agua contaminada para uso en rehidratación oral; desde entonces varios grupos de trabajo de diferentes universidades en todo el mundo han investigado el potencial de SODIS para inactivar una amplia gama de patógenos de origen hídrico [6-14].

El rango ultravioleta del espectro solar que alcanza la superficie terrestre está limitado a longitudes de onda superiores a 290 nm. De toda esta radiación menos del 10% es luz UV, de la cual solo una pequeña parte es útil para la desinfección del agua [15]; sin embargo, se ha demostrado extensamente su capacidad para eliminar diferentes organismos patógenos evitando la generación de productos tóxicos típicos de las tecnologías convencionales [6-7-9].

El efecto biocida de la luz solar se debe al efecto sinérgico entre la radiación y la temperatura, cuando excede los 45°C. La luz solar es absorbida por fotosensibilizadores naturales presentes en el agua que reaccionan con el oxígeno produciendo moléculas altamente reactivas tales como el peróxido de hidrógeno y el ión superóxido [16,17].

Entre otras alternativas utilizadas para la desinfección del agua se ha planteado con mucha expectativa el uso de *Artemisia annua*, planta de origen chino que en los últimos 30 años se le han redescubierto propiedades microbicas contra una serie de organismos causantes de enfermedades incluida la malaria. En los años ochenta los chinos consiguieron aislar su sustancia activa, la artemisinina y desde entonces las sociedades farmacéuticas la utilizan en sus píldoras ACT (artemisia combined therapy) contra la malaria [18].

Además de las propiedades antimaláricas de la planta los trabajos realizados por los investigadores Pierre Lutgen y Bernard Michels [19], les han permitido concluir que el té de *Artemisia annua* tiene un fuerte efecto bactericida; en sus experimentos con la bacteria *Vibrio fischeri* encontraron que *Artemisia annua* tiene un notable efecto en la luminiscencia de esta bacteria [19,20]. Otros investigadores han encontrado un efecto inhibidor de los aceites esenciales de *A. annua* sobre la bacteria *Enterococcus hirae* [21].

En este trabajo se evaluó el efecto microbico del método SODIS y el método SODIS combinado con el extracto de *Artemisia annua* sobre los siguientes indicadores microbiológicos: *Escherichia coli* (*E. coli*), indicador de contaminación fecal, *Salmonella typhimurium* (*S. typhimurium*), causante de la fiebre tifoidea y uno de los principales causantes de enfermedad diarréica aguda [22]; *Enterococcus faecalis* (*E. faecalis*), indicador de contaminación fecal, muy resistente a condiciones adversas

(congelación, desecación, tratamiento térmico, etc.) y *Bacillus subtilis* (*B. subtilis*), que tiene la habilidad para formar endosporas las cuales presentan un alto grado de resistencia a la inactivación por tratamientos físicos que incluyen calor seco y húmedo, radiación gamma y ultravioleta, oxidantes químicos, desecación extrema, no es considerado patógeno humano [23].

2. Materiales y métodos

2.1. Cepas bacterianas

Para esta investigación se utilizaron las cepas *Escherichia coli* (ATCC 25922), *Salmonella typhimurium* (ATCC 14028), *Bacillus subtilis* (ATCC 6633) y *Enterococcus faecalis* (ATCC 29212) conservadas en viales criopreservados con glicerol a -20°C.

2.2. Medios de cultivo y condiciones de crecimiento

El procedimiento para la preparación de las cepas microbianas consistió en la inoculación de 100µL de los viales de *E. coli*, *E. faecalis* y *S. typhimurium* en caldo Luria Bertani (Merck, USA) y caldo nutritivo (Merck, USA) para *B. subtilis*, se incubaron a 35± 0.5°C durante 18 a 24 horas, pasado el tiempo de incubación 25 µL de cada caldo fueron sembrados sobre placas de agar Luria Bertani para *E. coli* y *E. faecalis* y agar nutritivo (Merck, USA) para *S. typhimurium*, se incubaron a 35± 0.5°C durante 18 a 24 horas. A partir del crecimiento sobre el agar se prepararon las suspensiones bacterianas comparando con un patrón de turbidez 0.5 de la escala de McFarland, se conservaron en refrigeración a 4°C hasta su uso.

Para la obtención de las esporas de *B. subtilis*, se siguió la metodología propuesta por dos autores [6-24]; con las variaciones que a continuación se especifican. Se inocularon 12 placas de Petri que contenían agar tripticase soya (Merck, USA) con 25 µL del crecimiento obtenido previamente en caldo nutritivo, se incubaron a 35±0.5°C durante 15 días aproximadamente para permitir una buena esporulación; pasado el tiempo de incubación, se lavaron y rasparon las superficies de las placas petri con 10 ml de agua destilada estéril hasta recoger una suspensión de aproximadamente 100 ml. Para eliminar las células vegetativas dicha suspensión se sometió a 80°C por 15 a 20 minutos al baño maría, la esporulación fue confirmada mediante el uso de la coloración verde de malaquita y observación microscópica. La suspensión obtenida se conservó en refrigeración a 4°C hasta su uso.

2.3. Infusión de *Artemisia annua*

Se preparó una infusión de *Artemisia annua* al 10% (v/v) siguiendo la metodología propuesta en dos trabajos de investigación [25,26]. Para confirmar la presencia de artemisinina se colocó la infusión frente a una lámpara de UV con el objetivo de evaluar la fluorescencia emitida por este compuesto.

La especie de *A. annua* utilizada en este estudio fue donada por el Profesor Pierre Lutgen de la ONG IfbV-Luxemburgo.

2.4. Ensayos de inactivación

Para los ensayos de inactivación con el tratamiento SODIS se utilizaron botellas tipo PET, una por cada microorganismo evaluado, con 400ml de agua destilada estéril y una concentración bacteriana aproximada de 1×10^6 UFC/ml; para el tratamiento SODIS + *A. annua*, se adicionó además una infusión de *A. annua* al 10% (v/v). Para los controles de los experimentos SODIS y SODIS + *A. annua* se prepararon botellas adicionales, que se conservaron en oscuridad y fueron evaluadas de forma paralela en cada tiempo de muestreo.

2.5. Análisis fisicoquímicos y microbiológicos

Se llevaron a cabo tres campañas de muestreo durante tres meses. Las botellas fueron colocadas en posición horizontal sobre una lámina de acero inoxidable en el techo del laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Antioquia ($6^{\circ}16'16.36''N$; $75^{\circ}34'12.12''O$; 1483m). Estas botellas fueron expuestas a la radiación entre las 9:00am y 5:00 pm, hora local. En cada campaña de muestreo, se evaluaron tanto variables fisicoquímicas como microbiológicas a intervalos regulares de 30 minutos, 1, 2, 4 y 6 horas para *E. coli*, *S. typhimurium* y *E. faecalis* y para *B. subtilis* además se evaluaron los tiempos 8, 12, 16 y 20 horas.

En cada intervalo de tiempo se realizó por duplicado el recuento de los microorganismos mediante el método de extensión en placa (9215C, APHA) [27]; inoculando $100\mu L$ del contenido de cada botella en agar Luria Bertani para *E. coli* y *E. faecalis*, agar nutritivo para *S. typhimurium* y agar TSA para *B. subtilis*; todas las placas de agar se incubaron durante 24 horas a $35 \pm 0.5^{\circ}C$. La temperatura del agua se midió con termómetro Beek Mann, la radiación solar con un cuantímetro (LI-1400 data LOGGER) y la turbidez con turbidímetro portátil HACH 2100Q (APHA) [27].

Para evaluar la posible reactivación de los microorganismos las botellas expuestas a los tratamientos SODIS y SODIS + *A. annua* fueron incubadas en oscuridad durante 48 horas; después del tiempo de incubación se realizó el recuento de las colonias que crecieron sobre el agar. [7].

Los ensayos microbiológicos y fisicoquímicos se llevaron a cabo en las instalaciones de los Laboratorios de Microbiología Ambiental de la Escuela de Microbiología y de Microbiología Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

2.6. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de la información obtenida se empleó como software el programa Statgraphics Centurión XVI versión 16.1.15. Se elaboraron curvas de remoción microbiana y se realizó un análisis de componentes de

varianza para determinar el posible efecto de los factores (tipo de microorganismo, muestreo, tratamiento, hora de exposición y réplica) sobre la variable respuesta (LOG UFC/ml).

3. Resultados y discusión

Los resultados de remoción de cada microorganismo durante los tres muestreos con el tratamiento SODIS se muestran en la Figura 1; al compararlos con los resultados de los controles (Figura 2); se observó una reducción significativa de los cuatro microorganismos después de las cuatro horas de exposición continua, obteniéndose remociones del 100% en algunos microorganismos.

Según el análisis de componentes de varianza la hora fue el factor que más contribuyó a la variabilidad de los datos con un 63,81%; estos resultados fueron coherentes con el comportamiento en la intensidad lumínica acumulada, que osciló entre 14000 y 193000 luxes a medida que aumentó el tiempo de exposición (Figura 3).

El mecanismo de acción del método SODIS, se basa principalmente en el efecto sinérgico de la radiación y la temperatura cuando ésta última sobrepasa los $50^{\circ}C$ [28-29]. Aunque la temperatura, en ninguno de los muestreos superó los $50^{\circ}C$ y la intensidad lumínica presentó valores entre 14000 y 193000 luxes, se obtuvieron remociones significativas de los microorganismos evaluados. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de otros autores [30], quienes llevaron a cabo un estudio comparativo, exponiendo a la radiación solar botellas oscuras y transparentes con agua contaminada, para evaluar la incidencia de la temperatura y la radiación en el proceso de desinfección. Entre los resultados más importantes encontraron que las remociones de microorganismos en botellas oscuras fueron más bajas, por lo tanto la temperatura no fue un factor predominante en la eliminación bacteriana, a diferencia de la radiación que determinó la eficiencia del método, de allí que la reducción microbiana, para nuestro caso, se dió principalmente por la intensidad lumínica alcanzada.

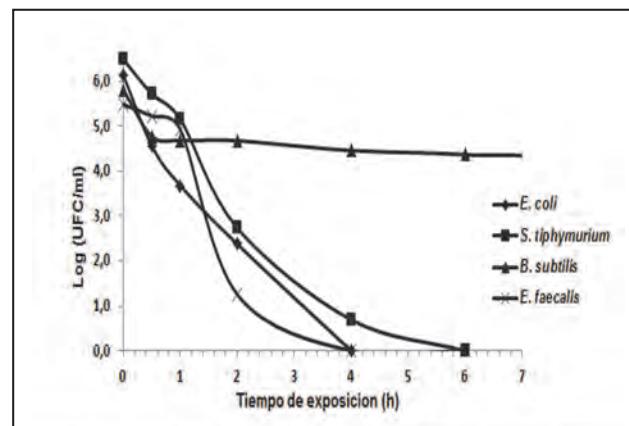


Figura 1. Cinética de remoción de las poblaciones bacterianas: *E. coli*, *S. typhimurium*, *E. faecalis* y *B. subtilis* expuestas al tratamiento SODIS expresadas en unidades logarítmicas.

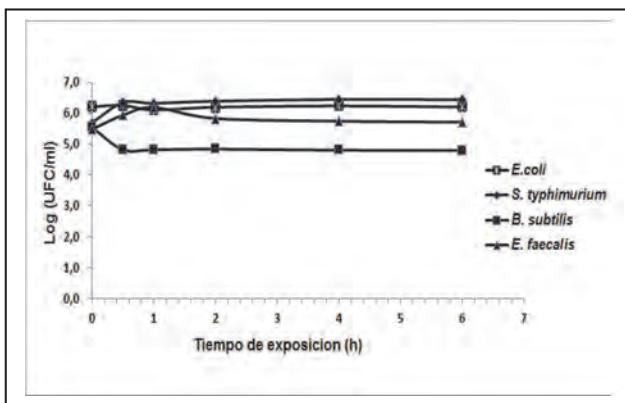


Figura 2. Control de la cinética de remoción de las poblaciones bacterianas: *E. coli*, *S. typhimurium*, *E. faecalis* y *B. subtilis* expuestas al tratamiento SODIS expresadas en unidades logarítmicas.

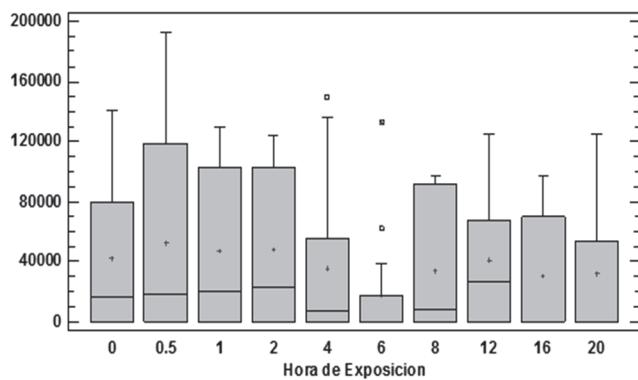


Figura 3. Evolución de la intensidad lumínica durante las horas de exposición.

En cuanto a los porcentajes de remoción de cada uno de los microorganismos en el tratamiento SODIS (Figura 1), encontramos que para *E. faecalis* y *E. coli* fue del 100% a las cuatro horas de exposición, mientras que para *S. typhimurium* solo se alcanzó la remoción completa a las seis horas de exposición continua.

En la figura 4 se puede observar que la exposición prolongada durante 20 horas no logró una remoción del 100% de *B. subtilis*; ya que es una bacteria que forma una endospora altamente resistente a las condiciones medioambientales adversas.

Resultados de estudios moleculares y bioquímicos han explicado como las esporas de *B. subtilis* pueden resistir la exposición prolongada al calor, la radiación UV y agentes oxidantes, debido a la disminución en el contenido de agua de la espora y a la presencia de ácido dipicolínico y calcio, adicionalmente los fotoproductos que se acumulan en el DNA de las esporas durante la exposición a la radiación son reparados de manera muy eficiente durante la germinación cuando estas dejan de estar expuestas a la radiación [31].

A diferencia de *B. subtilis*, las bacterias *E. faecalis*, *S. typhimurium* y *E. coli* (Figura 1) fueron más sensibles a los efectos de la radiación solar; lo que coincide con lo reportado por otros investigadores quienes encontraron que

la radiación solar fue determinante en la tasa de disminución de bacterias en estado vegetativo [32], debido a que no tienen la capacidad de generar estructuras de resistencia, además su proceso de respiración lo llevan a cabo muy cerca a la superficie celular lo que las hace más vulnerables a los efectos oxidativos y degenerativos de la radiación [22].

Otro factor que pudo contribuir a la baja remoción de *B. subtilis* pudo ser la turbiedad, ya que a lo largo de las jornadas de muestreo llama la atención que en los experimentos con *E. faecalis*, *S. typhimurium* y *E. coli* la turbiedad se mantuvo entre 0 y 2 UNT, mientras que la turbiedad en los experimentos con *B. subtilis* estuvo entre 13,2 y 22,3 UNT debido posiblemente a la presencia de los detritos celulares producto de los procesos de esporulación, está claro que la turbiedad disminuye en gran medida la efectividad de la radiación, ya que puede tener un efecto protector sobre el microorganismo [2-32].

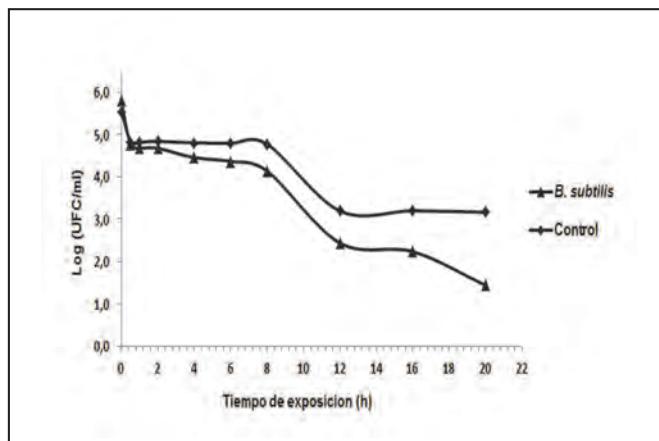


Figura 4. Cinética de remoción de *B. subtilis* expuestas al tratamiento SODIS expresadas en unidades logarítmicas.

Después de seis horas de exposición continua al tratamiento SODIS, las botellas fueron conservadas 48 horas en oscuridad para determinar el efecto reparador que pueden experimentar ciertos grupos bacterianos cuando dejan de estar expuestos a la radiación ultravioleta. En nuestros resultados no encontramos recrecimiento de ninguno de los microorganismos sometidos al tratamiento SODIS, lo que coincide, para el caso de *E. coli*, con la investigación realizada por Berney [33], quienes encontraron que esta bacteria después de 6 horas de exposición al sol no reparó los daños causados por la radiación solar.

Los resultados obtenidos con el tratamiento SODIS + *Artemisia annua* no mostraron un efecto ni sinérgico ni antagonista, ya que los controles para este tratamiento tuvieron un comportamiento constante demostrando que *A. annua* por sí sola no tiene un efecto inhibidor, debido posiblemente a varios aspectos; primero, la actividad antimicrobiana de la planta no se debe solamente a la concentración de artemisinina la cual varía en las diferentes partes de la planta (hoja, semilla, flores, raíz); sino también a la especie de artemisia utilizada; segundo, la síntesis y

acumulación de algunos metabolitos secundarios como sesquiterpenoides, flavonoides, cumarinas, triterpenoides, esteroles, fenoles, purinas, lípidos, compuestos alifáticos y monoterpenoides también influyen en la actividad antimicrobiana [34-36].

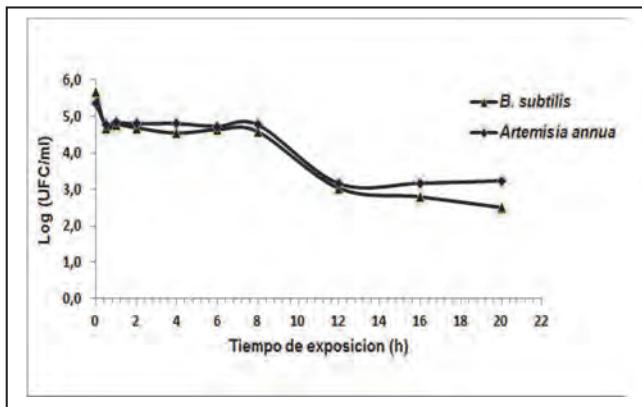


Figura 5. Cinética de remoción de *B. subtilis* expuesta al tratamiento SODIS+*A.annua* expresada en unidades logarítmicas.

4. Conclusiones

Las especies bacterianas en su estado vegetativo como *E. coli*, *S. typhimurium* y *E. faecalis* se inactivaron fácilmente, mientras que aquellas especies que forman esporas como *B. subtilis*, fueron menos sensibles a las condiciones térmicas y oxidativas establecidas durante el tratamiento SODIS.

Las remociones más altas se encontraron después de cuatro horas de exposición con excepción de *B. subtilis*, la cual disminuyó después de 20 horas de exposición.

El método SODIS fue más eficiente en la remoción de los microorganismos evaluados que la combinación SODIS+*A. annua*, por lo que se sugiere en futuras investigaciones profundizar en el conocimiento de la interacción química y/o molecular entre los compuestos activos de la planta con las estructuras bacterianas que pudieran explicar los resultados obtenidos.

Es importante evaluar la combinación de SODIS con diferentes especies de *Artemisia*, ya que algunos estudios han reportado diferencias en la actividad microbicida de la planta de acuerdo a su genotipo.

En este estudio la determinación de artemisinina se realizó de forma cualitativa confirmando su presencia por el método de fluorescencia, por lo que sería importante cuantificar la concentración de la sustancia activa de *Artemisia annua* utilizando otras técnicas de análisis como HPLC para determinar si la cantidad presente en la infusión es suficiente para ejercer una actividad desinfectante efectiva.

Referencias

- [1] OMS. Informe sobre la Salud en el Mundo. Capítulo "Mejorar el desempeño de los sistemas de salud", Switzerland. Organización Mundial de la Salud, 2000.
- [2] Arboleda, J., Teoría y Práctica de la Purificación del Agua. Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia, 2000.
- [3] Bitton, G., Wastewater Microbiology. Wiley-Liss, New York, 2005.
- [4] Downes, A. and Blunt, T. P., Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. Proc. R. Soc., 28, pp. 488-500, 1877.
- [5] Acra, A., Raffoul, Z., y Karahagopian, Y., Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions: Guidelines for household application in developing countries, 1984.
- [6] Boyle, M. C., Sichel, P., Fernández, G. B., Arias-Quiroz, M., Iriarte-Puña, A., et al. Bactericidal Effect of Solar Water Disinfection under Real Sunlight Conditions: Appl. Environ. Microbiol. 74, pp. 2997-3001, 2008.
- [7] Dejung, S. I., Fuentes, G., Almanza, R., Jarro, L., Navarro, G. et al. Effect of Solar Water Disinfection (SODIS) on Model Microorganisms under Improved and field SODIS Conditions. J. water supply: Research and technology-AQUA. 56.4, pp. 245-256, 2007.
- [8] Lujan, G. C., Evaluación de la efectividad del método de desinfección de aguas contaminadas de algunas zonas rurales del municipio de Ayapel, empleando la radiación solar [Tesis pregrado] Medellín, Universidad de Antioquia, 2005.
- [9] Lester W. Sinton, Caeolyn H. Hall, Philippa A. Lynch, and Robert J. davies-colley. Sunlight Inactivation of Fecal Indicator Bacteria and Bacteriophages from Waste Stabilization Pond Effluent in Fresh and Saline Waters: Appl. Environ. Microbiol. 68, pp. 1122-1131, 2002.
- [10] Mausezahal, D., Christien, A., Pacheco, D. G., Tellez, A. F., Iriarte, M. et al. Solar Drinking Water Disinfection (SODIS) to Reduce Childhood Diarrhoea in Rural Bolivia: A Cluster-Randomized, Controlled Trial. Journal.pmed. 6(8), 2009.
- [11] Jaimes, X., Mejía, R., Lutgen, P. y Aguirre, N., Sodis. Desinfección solar del agua. Guía de Aplicación. Universidad de Antioquia, Corpoyapel, IfbV-Luxemburg. ISSN 00000065322. Medellín, 2007.
- [12] Aguirre, N., Lutgen, P. y Schosseler, P., Mise en oeuvre de la méthode de stérilisation de l'eau SODIS en Colombie. Revue Technique Luxembourgeoise, pp. 151-152, 2006.
- [13] Cano, A., Arcos, Y., Lutgen, P. y Aguirre, N., Interaction entre le rayonnement solaire et la tisane d'artémisia annua pour la désinfection de l'eau de la Ciénaga de Ayapel Colombie. Revista FAEC. Fundación Argentina de Ecología Científica. 2010.
- [14] Wolyniak, E.A., Hargreaves, B.R., and Jellison, K. L., Biofilms Reduce Sola Desinfection of Cryptosporidium parvum Oocysts. Appl. Environ Microbiol. 78(12) pp. 4522-4525, 2012.
- [15] Fernandez, P., Solar disinfection of drinking water. Course on: Innovative Processes and Practices for Wastewater and Re-use, Ankara University. Innova-Med, 2007.
- [16] Heaselgrave, W. and Kilvington, S., Antimicrobial activity of simulated solar disinfection against bacterial, fungal and protozoan pathogens and its enhancement by riboflavin: Appl. Environ Microbiol. 76 (17), pp. 6010-6012, 2010.
- [17] Khaengraeng, R. and Reed, R.H., Oxigen and photoinactivation of *Escherichia coli* in UVA and sunlight: J. Appl Microbiol. 99, pp. 39-50, 2005.
- [18] WHO. Monograph on good agricultural and collection practices (GACP) for *Artemisia annua* L. Switzerland. Organización Mundial de la Salud, 2006.
- [19] Lutgen, P. and Bernard, M., Bactericidal properties of artemisia annua tea and dosimetry of artemisinin in water by fluorescence under UV light. Datos no publicados. 2008.
- [20] Lutgen, P., La Tisane d'Artemisia annua une puissante polythérapie!. Memorias 2éme congrés Maladies tropicales, aspects humanitaires et scientifiques. Luxembourg, Avril 2009.

- [21] Juteau, F., Masotti, V., Bessie're, J. M., Dherbomez, M. and Viano, J., Antibacterial and antioxidant activities of *Artemisia annua* essential oil. Fitoterapia, 73, pp. 532-535, 2002.
- [22] Madigan, M., Martinko, J. M. Parker, J. y Sánchez, M., Brock: Biología de los microorganismos. Southern Illinois University Carbondale, 2003.
- [23] Riesenman, P. J. and Nicholson, W. L., Role of the Spore Coat Layers in *Bacillus subtilis* Spore Resistance to hydrogen Peroxide, Artificial UV-C, UV-B, and Solar Uv Radiation: Appl. Environ Microbiol. 66, pp. 620-626, 2000.
- [24] Driedger, A., Staub, E., Pinkernell, U., Mariñas, B., Koster, W. et al. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores and formation of bromate during ozonation: Water research. 35(12), pp. 2950-2960, 2001.
- [25] Allahdin, O., Gothard-Bassebe, M., Biteman, O., Foto, E., Mabingui, J. et al. Essay about the disinfection of well water by *Artemisia annua* in Central African Republic (CAR). Datos no publicados. 2008.
- [26] Mueller, M. S., Karhagomba, I. B., Hirt, H. M., y Wemakor, E., The potencial of *Artemisia annua* L. as a locally produced remedy for malaria in the topics: agricultural, chemical and clinical aspects. J. Ethnopharmacol. 73(3), pp. 487-493, 2000.
- [27] APHA-AWWA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22th ed. American Public Health Association. Washington, DC. 2012.
- [28] Wegelin, M., Canonica, S., Mechsner, K., Fleischmann, T., Pesaro, F. and Metzler, A., Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments. J. Water SRT-Aqua, 43 (3), pp. 154-169, 1994.
- [29] Joyce, T. M., McGuigan, K. G., Elmore-Meegan, M. y Conroy, R. M., Inactivation of faecal bacteria in drinking water by solar heating: Appl. Environ Microbiol. 62, pp. 399-402, 1996.
- [30] Martin, A., Alarcon, M. T., Martín, I. R., y Gonzalez, A., Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation. Solar Energy 78 (1), pp. 31-40, 2005.
- [31] Nicholson, W. L., Munakata, H., Melosh, H. J. and Setlow, P., Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. Microbiol Mol Biol. 64, 548-572, 2000.
- [32] Luke, M., Garcia, F. y Palacio, C., Determinación del T90 en la Bahía de Santa Marta (Col). Rev. Dyna, 78 (167), pp. 122-131, 2011.
- [33] Berney, M., Weilenmann, H. U. and Egli, T. "Flow cytometric study of vital cellular functions in *Escherichia coli* during solar disinfection (SODIS)": Microbiol, 152, pp. 1719-1729, 2006.
- [34] Bhakuni, R. S., Jain, D. C., Sharma, R. P. and Kumar, S., Secondary metabolites of *Artemisia annua* and their biological activity. Current Science, 80 (1), pp. 35-48, 2001.
- [35] Cavar, S., Maksimović, M., Vidica, D., y Pari, A., Chemical composition and antioxidant and antimicrobial activity of essential oil of *Artemisia annua* L. from Bosnia. Ind.Crops Prod. 37, pp. 479-485, 2012.
- [36] Vermaa, R. K., Chauhana, A., Vermaa, R. S. and Guptab, A. K., Influence of planting date on growth, artemisinin yield, seed and oil yield of *Artemisia annua* L. under temperature climatic conditions. Ind.Crops Prod. 34, pp. 860-864, 2011.

Unified model of shear modulus degradation curves in sand of Guayuriba river

Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba

María del Pilar Ortiz-Pulido ^a, Juan Felipe Gaitán-Serrano ^b & Javier Fernando Camacho-Tauta ^c

^a Ing. Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, pilar.ortiz08@gmail.com

^b Ing. Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, jfelipeg@gmail.com

^c PhD, Profesor Asociado, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, javier.camacho@unimilitar.edu.co

Received: January 14th, 2013. Received in revised form: August 30th, 2013. Accepted: September 11th, 2013

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the applicability of two unified model of shear modulus degradation curves in the sand of Guayuriba River (Department of Meta, Colombia). To achieve the objective, it was performed acyclic triaxial tests with controlled strain, by varying the confining pressure, the particle size and the compaction degree of the material. The outcome were the modulus degradation curves, which were compared against the model proposed by Ishibashi and Zhang, and the model proposed by Santos and Gomes Correia, showing that the behavior of these materials fit better to the second one.

Keywords: cyclic triaxial, shear modulus, unified curves.

Resumen

El propósito de este artículo es analizar la aplicabilidad de dos modelos unificados de curvas de degradación del módulo cortante en la arena del río Guayuriba (Departamento del Meta, Colombia). Para lograr el objetivo, se realizó una serie de ensayos triaxiales cílicos a deformación contralada, variando la presión de confinamiento, la granulometría del material y el grado de compactación. Como resultado, se obtuvieron curvas de degradación del módulo cortante, que se compararon con el modelo propuesto por Ishibashi y Zhang, y por el modelo propuesto por Santos y Gomes Correia, encontrando que el comportamiento dinámico de estos materiales se ajusta mejor al segundo modelo.

Palabras Clave: curvas unificadas, módulo cortante, triaxial cílico

1. Introducción

El comportamiento dinámico de los suelos granulares ha sido objeto de investigación por diferentes autores alrededor del mundo como Kokusho [1], Ishibashi y Zhang [2], Zhou y Chen [3], y Jafarzadeh y Sadeghi [4], por ser determinante en los efectos sísmicos a nivel local que se pueden producir en depósitos de este material. En Colombia se han efectuado investigaciones con materiales locales, por ejemplo Yamin et al. [5], García [6], Rivas [7], Chaves [8], quienes han realizado investigaciones de este tipo en esquistos de Sabaneta (Antioquia) o estudiado el comportamiento ante el fenómeno de licuación de las arenas de Tumaco (Chocó).

El módulo cortante es uno de los parámetros necesarios para estimar la respuesta dinámica del suelo como por ejemplo en la evaluación del comportamiento sísmico de un depósito de arenas para evaluar el riesgo frente a casos como el ocurrido en el Río Atrato medio, donde se presentó la licuación de un dique conformado por material arenoso producto de un sismo presentado el 17 y 18 de octubre de

1992 [9]. Dentro de este ámbito, surge la necesidad de contar con un modelo que permita generalizar mediante curvas de degradación del módulo cortante la variación de la rigidez del suelo y que tenga en cuenta el efecto de la deformación, la relación de vacíos y el confinamiento.

El presente trabajo tiene como finalidad estudiar el módulo cortante en las arenas colombianas, específicamente en arenas fluviales provenientes del Río Guayuriba (Departamento del Meta), mediante la obtención de las curvas de degradación del módulo cortante. Estas curvas fueron obtenidas mediante ensayos triaxiales cílicos efectuados con variados confinamientos y relaciones de vacíos. Como resultado se presenta el análisis y la unificación de las curvas de degradación del módulo cortante en las arenas y la comparación con los modelos de Ishibashi y Zhang [2], y Santos y Gomes Correia [10].

2. Módulo cortante [G]

La relación de esfuerzo-deformación en un suelo depende principalmente del nivel de deformación [11]. De

esta manera, a pequeñas deformaciones el comportamiento mecánico del suelo se puede representar mediante un modelo lineal elástico, a medianas deformaciones el comportamiento se representa bajo un modelo viscoelástico, y a grandes deformaciones la disipación de energía y la degradación de la rigidez van aumentando a medida que va pasando los ciclos por lo cual se debe representar el comportamiento del suelo mediante un modelo no lineal.

Para caracterizar la rigidez del suelo se utilizan dos conceptos que son la relación de amortiguamiento y el módulo cortante. Este último muestra la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado.

3. Módulo cortante máximo [G_0]

El módulo cortante máximo o inicial define el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo a pequeñas deformaciones; además es el parámetro de normalización de las curvas de degradación del módulo cortante en suelos [12].

Diferentes autores han estudiado los factores que influyen sobre este parámetro Kokusho [1], Ishihara [11], y Santos y Gomes Correia [10]. Richart et al. [13] muestra que los factores que más influyen sobre el módulo cortante inicial son el confinamiento efectivo (σ'_0) y la relación de vacíos (e) como se presenta en la ecuación 1.

$$G_0 = A \cdot f(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (1)$$

Donde A y n son constantes determinadas experimentalmente que dependen del tipo de material y $f(e)$ es una relación funcional que depende de la relación de vacíos. Para tener una referencia de los valores de estas constantes, Camacho-Tauta [12] recopiló información de algunos autores que han trabajado con arenas, como Hardin y Richart (1963), Iwasaki and Tatsuoka (1977), Kokusho(1980) y Gomes Correia et al (1994) y que coinciden en que el valor de n es aproximadamente 0.5 y A oscila entre 7000 y 14100, para G_0 y σ'_0 en kPa.

4. Curvas de degradación del módulo cortante

La curva de degradación del módulo es una representación del módulo secante dividido por el módulo cortante máximo en función de la deformación cortante [14]. Su función es facilitar la representación del comportamiento del suelo ya que solo es necesario conocer el módulo cortante inicial para obtener el módulo cortante a cualquier nivel de deformación. En la Figura 1 se muestra la curva de degradación del módulo a lo largo de la deformación cortante [15].

Kokusho en 1980 presentó un conjunto de resultados experimentales de ensayos efectuados sobre arena de Toyoura [1], donde muestra como el módulo normalizado (G/G_0) decrece a medida que la deformación cortante (γ) se incrementa. Una característica adicional que se puede observar en esa investigación es la influencia del confinamiento, debido a que a mayor confinamiento mayor es la relación G/G_0 para una deformación cortante dada.

Adicionalmente, describe influencia de la relación de vacíos (e) sobre G/G_0 ; en donde deduce que elevadas relaciones de vacíos producen una mayor degradación de la curva de degradación del módulo cortante.

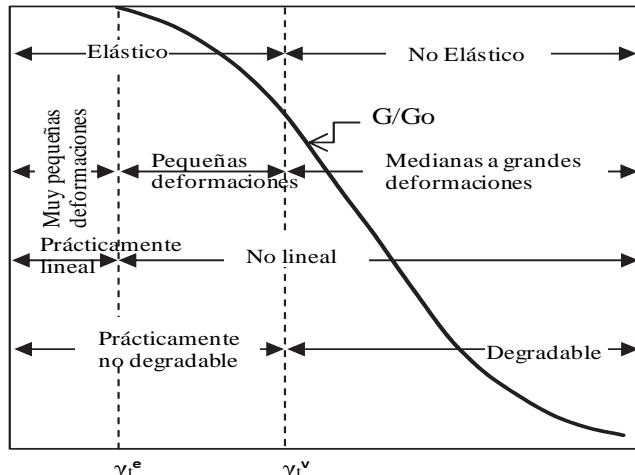


Figura 1. Curvas de degradación del módulo a lo largo de las diferentes zonas deformación cortante cíclica. Adaptado de [15].

5. Rangos de deformación

La deformación cortante se divide en pequeñas (10^{-6} - 10^{-5}), medianas (10^{-5} - 10^{-3}) y grandes (10^{-3} - 10^{-2}) deformaciones teniendo en cuenta los límites arbitrarios que han sido aceptados para diferenciar el modelo para evaluar el comportamiento dinámico del suelo, teniendo como referencia los rangos de deformación presentados por Ishihara [11].

El límite entre las pequeñas y las medianas deformaciones fue definido por Vucetic [15], como la deformación cortante arriba de la cual la microestructura del suelo es irreversiblemente alterada por corte cíclico. Esto se puede explicar por la aparición de cambios irreversibles en la presión de poros o en el volumen del suelo, y es conocido como el umbral volumétrico de deformación cortante (γ_t^v). Vucetic y Dobry [16], presentan una serie de curvas en las que se identifica la localización aproximada donde este umbral tiene lugar en las curvas de degradación del módulo.

Con base en estos estudios la deformación media corresponde a valores entre 10^{-4} y 10^{-3} , dentro de este rango, el suelo tiene un comportamiento elasto-plástico, dando como consecuencia que existan deformaciones no recuperables en el suelo.

6. Modelo hiperbólico

Hardin y Drnevich [17] proponen una curva de degradación del módulo, basada en un modelo hiperbólico que expresa G/G_0 por medio de la Ecuación (2).

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2)$$

Donde γ es la deformación cortante y γ_r es la deformación cortante de referencia definida mediante la

Figura 2. La curva hiperbólica es asintótica a la línea horizontal definida por el esfuerzo cortante en la falla. El módulo secante en un punto de la curva es G y la pendiente en el primer tramo de la curva es G_0 . Si se extiende la línea secante hasta el punto de corte de la línea del esfuerzo cortante en la falla se obtiene la deformación de referencia.

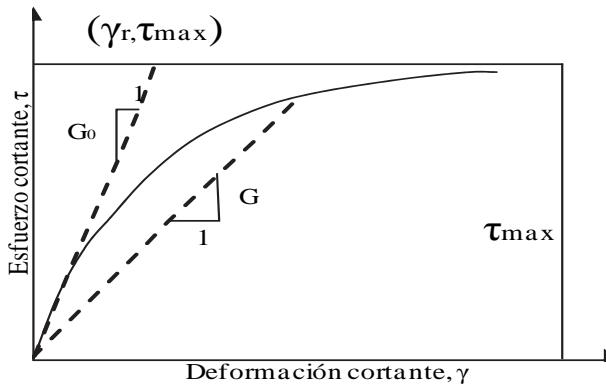


Figura 2. Modelo Hiperbólico y definición de la deformación de referencia. Adaptado de [16]

7. Curvas unificadas

Debido a las variaciones que existen entre las curvas de degradación del módulo cortante, Ishibashi y Zhang [2] proponen un modelo unificado, teniendo en cuenta el índice de plasticidad (IP) y el confinamiento (σ'_0) como se muestra en la Ecuación (3).

$$\frac{G}{G_0} = K(\sigma'_0)^m \quad (3)$$

En donde K está definido en la Ecuación (4) y m está dado en la Ecuación (5).

$$K = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \quad (4)$$

$$m = 0.272 \{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \exp(-0.0145IP^{1.3}) \} \quad (5)$$

$$\tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \exp(-0.0145IP^{1.3})$$

En la Ecuación (6) se muestra el valor que corresponde a n en función de IP:

$$n = \begin{cases} 0.00 & \text{para } IP = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} \times IP^{1.404} & \text{para } 0 < IP \leq 15 \\ 7.00 \times 10^{-7} \times IP^{1.976} & \text{para } 15 < IP \leq 70 \\ 2.70 \times 10^{-5} \times IP^{1.115} & \text{para } IP > 0 \end{cases} \quad (6)$$

Santos y Gomes Correia [10] presentan un modelo para suelos plásticos y no plásticos que está dado en la Ecuación (7),

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + (0.385\gamma^*)} \quad (7)$$

Donde la deformación cortante normalizada (γ^*). Se define como la deformación cortante dividida por la deformación cortante que corresponde a $G/G_0 = 0.7$. Basados en el modelo, Santos y Gomes Correia mediante el análisis de diversos resultados demostraron que éstos se ajustan a un estrecho rango delimitado por las curvas inferior y superior dadas por las ecuaciones (8) y (9) respectivamente [10].

$$\frac{G}{G_0} = 1 \quad \text{para } \gamma^* \leq 10^{-2} \quad (8)$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[0.48 \ln \left(\frac{\gamma^*}{1.9} \right) \right] \right\} \quad \text{para } \gamma^* > 10^{-2}$$

$$\frac{G}{G_0} = 1 \quad \text{para } \gamma^* \leq 10^{-1} \quad (9)$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[0.46 \ln \left(\frac{\gamma^* - 0.1}{3.4} \right) \right] \right\} \quad \text{para } \gamma^* > 10^{-1}$$

En la Figura 3 se muestran algunos resultados experimentales obtenidos por Camacho-Tauta [12] y que se comparan con el rango propuesto por Santos y Gomes Correia [10].

8. Metodología

8.1. Equipos y Materiales

Con el fin de obtener las propiedades dinámicas de la arena se utilizó un equipo triaxial cíclico Dynatriax Tritech 50 kN (WF-Controls) equipado con sensores, unidad de adquisición de datos y software controlador cuya representación esquemática se muestra en la Figura 4. Los sensores utilizados tienen la capacidad y sensibilidad indicada a continuación: presión de cámara y contrapresión (1000kPa, 1kPa), celda de carga sumergible (25kN, 0.01kN), sensor externo de desplazamiento (50mm, 0.002mm) y sensor de cambio volumétrico (100cm³, 0.1cm³).

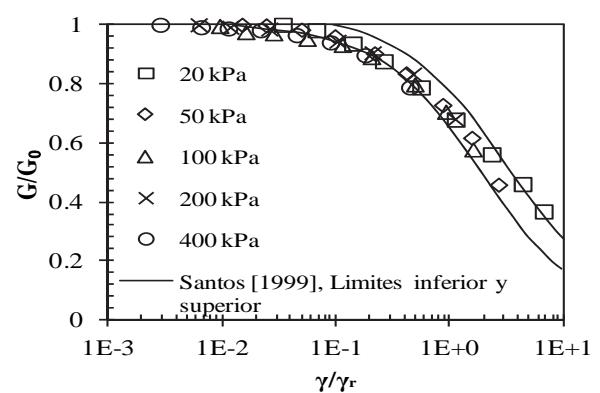


Figura 3. Curvas de degradación del módulo para varios tipos de suelo y comparación contra el modelo propuesto por [10]. Tomado de [12].

El material proveniente del río Guayuriba está conformado en su gran mayoría por cuarcitas pertenecientes al grupo Quetame, según los estudios realizados en la Universidad Nacional de Colombia [18]. Se utilizaron tres granulometrías de la misma arena (Figura 5), para observar la influencia del tamaño del grano en los resultados.

Se realizaron ensayos de gravedad específica de sólidos (G_s) [19], granulometría por tamizado, para obtener los tamaños máximo ($D_{máx}$) y mínimo ($D_{mín}$), coeficiente de uniformidad (C_u), coeficiente de curvatura (C_c) y ensayos de peso unitario seco máximo ($\gamma_{dmáx}$) y mínimo ($\gamma_{dmín}$) con relaciones de vacíos mínima ($e_{mín}$) y máxima ($e_{máx}$), resultados que se encuentran en la Tabla I.

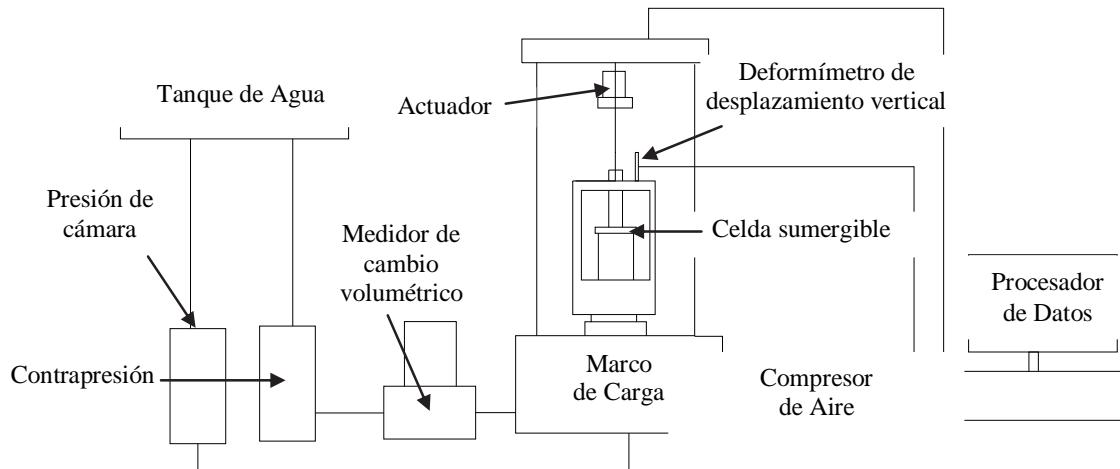


Figura 4. Esquema del equipo triaxial cíclico.

8.2. Procedimiento

Se realizaron 24 ensayos triaxiales cíclicos a muestras de 70mm de diámetro y 140mm de altura. Doce de las muestras se compactaron hasta alcanzar la relación de vacíos mínima mostrada en la Tabla I. La otra mitad de las muestras alcanzó el estado más suelto para obtener la relación de vacíos máxima indicada en la Tabla I.

últimas bajo la aplicación de 40 ciclos sinusoidales a 0.5 Hz de frecuencia, en concordancia con lo especificado por la norma ASTM D-3999.

Las deformaciones axiales cíclicas seleccionadas estuvieron en un rango entre 0.028mm y alrededor de 1.4mm. Este rango está limitado en su límite inferior por la precisión del sensor de deformación axial y en su límite superior por la pérdida de resistencia de la arena a causa de la movilidad cíclica.

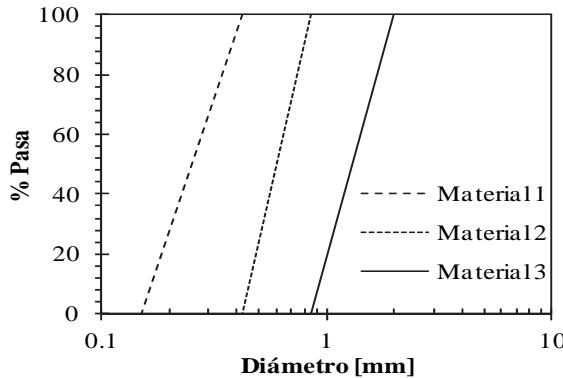


Figura 5. Granulometría de los materiales.

Se utilizaron presiones de confinamiento de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa y 400 kPa por cada material utilizado y por cada grado de compactación. Cada uno de estos ensayos se llevó a cabo bajo los parámetros del Método B (Deformación Controlada) de la norma ASTM D-3999 [20], llevando a cabo las etapas de saturación, en donde el valor del parámetro B alcanzó valores entre 0.97 y 0.98, dando paso a la consolidación y nueve etapas de corte cíclico, éstas

Tabla 1.
Propiedades físicas de los materiales estudiados.

Propiedades	Material		
	1	2	3
$D_{mín}$ [mm]	0.150	0.425	0.850
$D_{máx}$ [mm]	0.425	0.850	2.000
C_u	1.580	1.420	1.39
C_c	0.930	0.940	1.00
G_s	2.680	2.650	2.680
$e_{máx}$	1.017	1.100	1.171
$e_{mín}$	0.813	0.904	0.988
$\gamma_{dmín}$ [g/cm ³]	1.330	1.280	1.230
$\gamma_{dmáx}$ [g/cm ³]	1.480	1.410	1.350

9. Resultados y Discusión

9.1. Ensayos Triaxiales Cíclicos

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de tres bucles de histéresis obtenidos mediante el ensayo triaxial cíclico, de donde se obtiene el módulo cortante correspondiente al nivel de deformación cíclica impuesto.

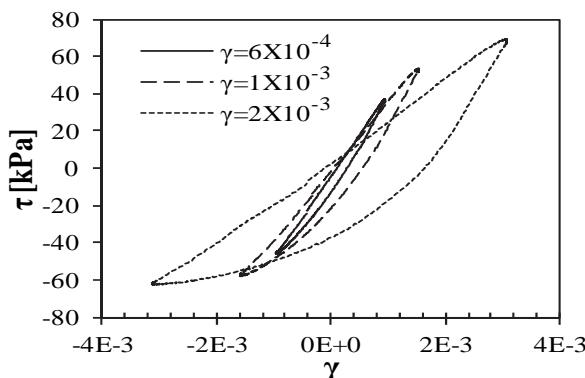


Figura 6. Bucles de histéresis resultado del segundo ciclo del ensayo al Material 3 con $e=0.988$, $\sigma'_0=100$ kPa y diferentes deformaciones unitarias aplicadas.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo triaxial cíclico muestran la influencia de la granulometría del

material, la relación de vacíos, y la presión de confinamiento sobre las curvas de degradación del módulo cortante en las arenas. En la Figura 7 se presentan las curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba, con cambio en las presiones de confinamiento, para los de materiales ensayados y las diferentes relaciones de vacío, manteniendo en cada caso la relación de vacíos y el tipo del material constantes.

Se puede observar la influencia de la presión del confinamiento, ya que a medida que aumenta esta variable, el módulo cortante aumenta.

Para observar la influencia del tipo de material en las curvas de degradación del módulo, y debido a que el comportamiento es similar para todas las presiones de confinamiento y grados de compactación, se muestra como ejemplo la Figura 8, en donde al mantener la presión de confinamiento constante en 50 kPa y el material sin compactar, el módulo cortante es mayor para arenas de tamaño más fino.

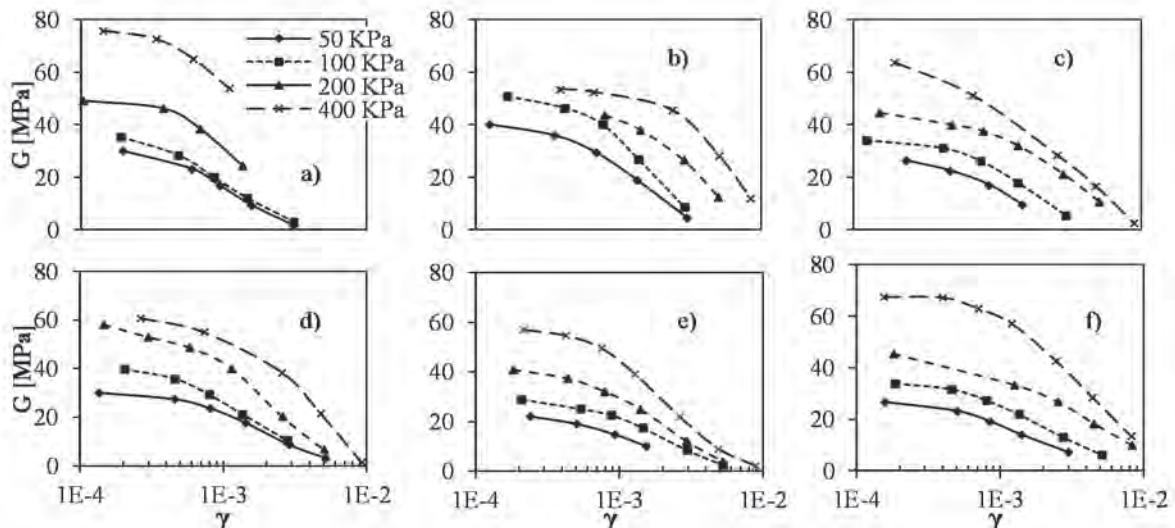


Figura 7. Curvas de degradación del módulo cortante en arena del Río Guayuriba según la variación en la presión de confinamiento. a) Material 1 $e=0.813$ b) Material 1 $e=1.017$ c) Material 2 $e=0.904$ d) Material 2 $e=1.100$ e) Material 3 $e=0.988$ f) Material 3 $e=1.171$.

Por otro lado en la Figura 9. Se muestra un ejemplo del estado de compactación en las curvas de degradación del módulo cortante, dando como resultado que entre más compactada este la muestra mayor va a ser su módulo cortante.

9.2. Aplicación del Modelo Hiperbólico

Dado que se utilizó un equipo triaxial cíclico sin instrumentación interna ni otros dispositivos para medir el módulo cortante inicial (ej.: bender elements); se utilizaron los valores medidos de deformación cortante y módulo cortante para llevar a cabo un proceso de optimización mediante el método de los mínimos cuadrados con el fin de encontrar los parámetros de deformación de referencia γ_r y el módulo cortante inicial G_o . Estos valores se encontraron mediante la Ecuación (2). Este procedimiento puede ser cuestionable, pero es una alternativa para casos como el

presente trabajo, en el cual no se contó con instrumentos para medir directamente el módulo cortante inicial.

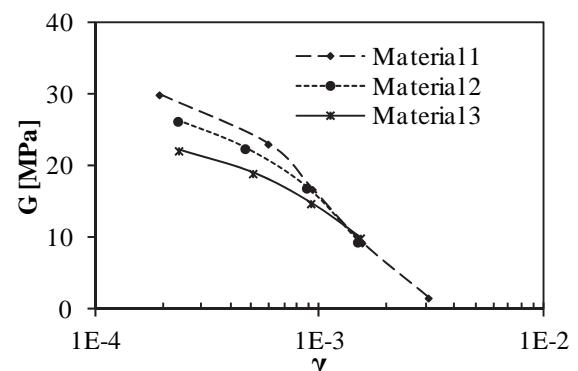


Figura 8. Curvas de degradación del módulo cortante con variación en la granulometría del material, con $e=0.813$ para el material 1, $e=0.904$ para el material 2 y $e=0.988$ para el material 3 y $\sigma'_0 = 50$ kPa.

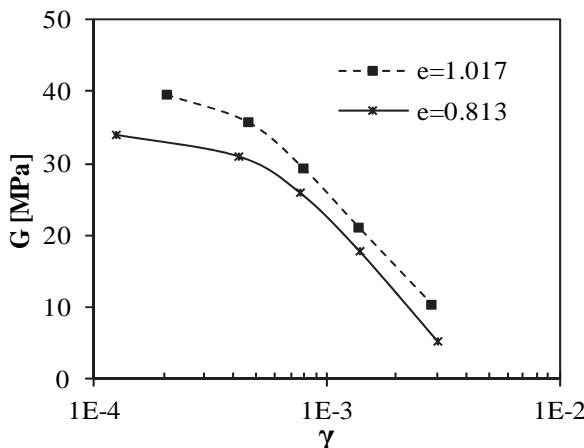


Figura 9. Curvas de degradación del módulo cortante con variación en la relación de vacíos, material 1, $\sigma'_0 = 100$ kPa.

Al obtener los parámetros básicos de la ecuación se construyeron curvas de degradación del módulo cortante en función de la deformación cortante, γ vs G/G_0 . Para esto se eligió un rango de deformaciones de 10^{-6} hasta 10^{-1} .

El resultado de este proceso se ejemplifica en la Figura 10 teniendo en cuenta que el comportamiento de las curvas de degradación del módulo cortante tienen similar tendencia para todos los casos.

En la Tabla II se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos mediante el modelo hiperbólico para G_0 , en ella se puede verificar en general que a medida que el material es más grueso, G_0 disminuye y que entre mayor es el grado de compactación mayor es el valor de G_0 .

En la Tabla III se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos mediante el modelo hiperbólico para γ_r . En ella se muestra que a medida que el material es más grueso la deformación de referencia es menor. Adicionalmente, entre menor es la relación de vacíos mayores las deformaciones de referencia alcanzadas.

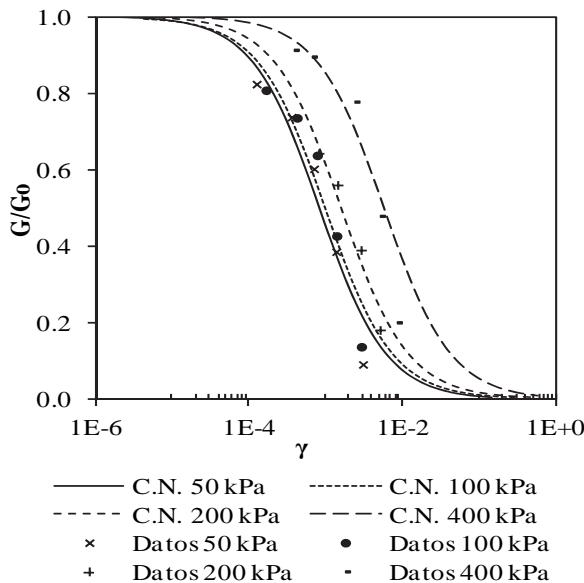


Figura 10. Curvas normalizadas (C.N.) mediante el modelo hiperbólico. Material 1 $e=1.017$.

Tabla 2.
 G_0 [MPa] estimado mediante el modelo hiperbólico

σ'_0 [kPa]	Material 1		Material 2		Material 3	
	$e=0.81$	$e=1.0$	$e=0.90$	$e=1.1$	$e=0.99$	$e=1.17$
50	42.83	48.65	36.47	35.39	28.20	31.36
100	50.33	62.78	40.51	49.61	35.97	40.18
200	55.34	67.67	49.22	66.92	49.88	48.92
400	82.19	58.51	74.02	71.58	70.29	75.80

Tabla 3.
 γ_r estimado mediante el modelo hiperbólico

σ'_0 [kPa]	Material 1		Material 2		Material 3	
	$e=0.81$	$e=1.0$	$e=0.90$	$e=1.1$	$e=0.99$	$e=1.17$
50	5.2E-4	8.3E-4	6.7E-4	1.3E-3	9.5E-4	1.2E-3
100	5.0E-4	9.9E-4	1.0E-3	1.0E-3	1.1E-3	1.5E-3
200	1.3E-3	1.6E-3	2.1E-3	1.3E-3	1.2E-3	2.7E-3
400	2.2E-3	5.8E-3	1.4E-3	2.1E-3	1.4E-3	2.9E-3

9.3. Unificación de Curvas

En esta sección se utilizan los datos experimentales y el módulo cortante inicial estimado con el modelo hiperbólico para obtener los modelos unificados de Ishibashi y Zhang y de Santos y Gómez Correia. No se comparan con las curvas presentadas por otros autores como Vucetic y Dobry [16] o Darendeli [22], pues el objetivo del presente trabajo es utilizar un modelo que busque unificar en un modelo simple, el comportamiento para diferentes confinamientos y relaciones de vacíos.

9.3.1. Modelo Ishibashi y Zhang

En la Figura 11 se observan las curvas unificadas mediante el modelo de Ishibashi y Zhang, obtenidas al aplicar la Ecuación (3) y la relación G/G_0 de los datos experimentales, tomando G_0 como el valor calculado por el modelo hiperbólico.

9.3.2. Modelo Santos y Gómez Correia

Los límites del módulo cortante se calcularon aplicando las ecuaciones (9) y (10). En la Figura 12 se muestra que los datos experimentales están dentro del rango propuesto por el modelo, a excepción de algunos puntos a deformaciones normalizadas cercanas a 10.

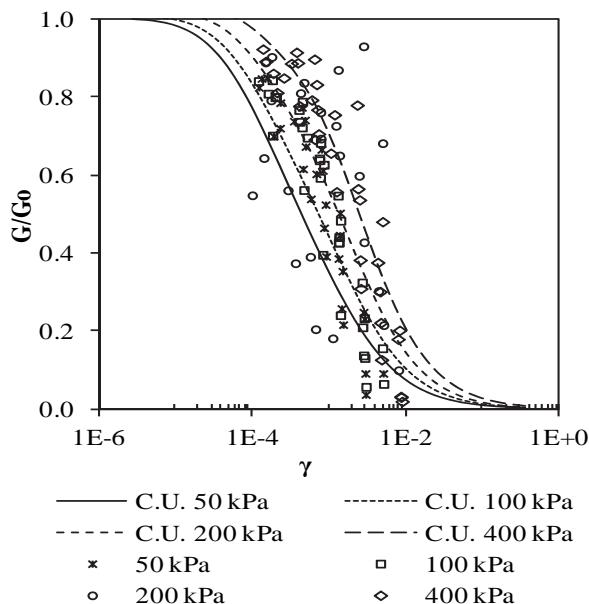


Figura 11. Datos experimentales comparados con las curvas unificadas (C.U.) de Ishibashi y Zhang.

9.4. Discusión de Resultados

Se pudo observar que el valor del módulo máximo G_0 , es mayor cuando la relación de vacíos es menor, ya que al compactarse la muestra las partículas se acomodan mejor entre sí, aportando mayor resistencia. De la misma manera el módulo aumenta en relación con la presión de confinamiento, debido al aumento del número de contactos inter-granulares en el suelo, resultado que muestra Camacho-Tauta et al. [21].

Al realizar la construcción de las curvas de degradación del módulo por medio del modelo hiperbólico se pudo observar que la desviación estándar hallada para las deformaciones de referencia (γ_r) fue de 1.67×10^{-4} para el caso del material 3 con $e=0.988$, presentando en este caso unas curvas que tienden a la unificación. De esta manera lo que define la ubicación de las curvas es γ_r , siendo así que al presentarse valores similares se superponen las curvas y se ubican de derecha a izquierda en función de la deformación de referencia.

En la Figura 11 se muestra la unificación realizada según el modelo de Ishibashi y Zhang, se observa que los datos experimentales que mejor se ajustan son los correspondientes a un confinamiento efectivo de 100 kPa. En general los valores de G/G_0 dados en un rango deformación de 10^{-3} a 10^{-2} se encuentran por fuera de las curvas unificadas, esto se presenta debido a que en este rango de deformación es donde se presenta la mayor degradación del módulo.

La Figura 12. Presenta los límites del modelo propuesto por Santos y Gomes Correia y los datos obtenidos mediante los ensayos triaxiales, donde se puede apreciar el ajuste de la gran mayoría de los datos, en especial los correspondientes a una presión de confinamiento de 200 kPa. Los datos que se salen del rango son aquellos que están cercanos a una deformación normalizada cercana a 10^1

debido a que para este nivel de deformación se presenta licuación de la arena.

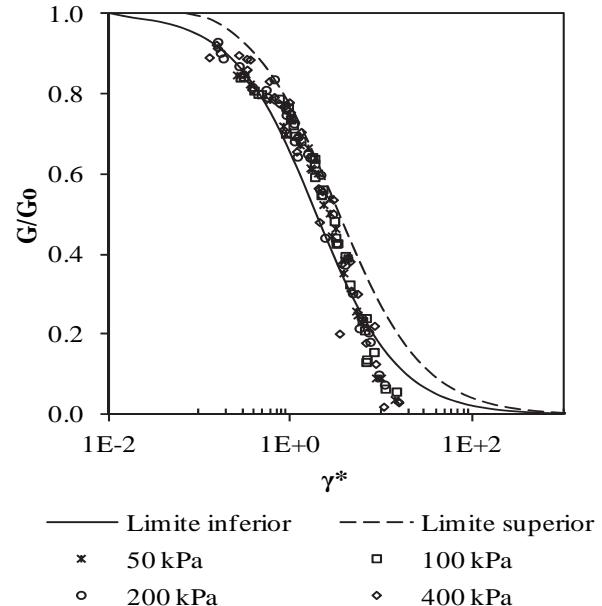


Figura 12. Datos experimentales comparados con los límites propuestos por Santos y Gómez Correia.

10. Conclusiones

El procedimiento para la ejecución del ensayo triaxial cíclico fue implementado y probado en arenas colombianas obteniendo resultados favorables si se comparan con la literatura y los modelos propuestos por otros autores.

Los datos se ajustaron mejor al modelo presentado por Santos y Gomes Correia, mostrando la aplicabilidad a las arenas del río Guayuriba, en Colombia. Este modelo en particular tiene la ventaja de que es relativamente simple pues solamente se requiere el valor del módulo máximo y el módulo secante degradado al 70% con su correspondiente deformación.

Tal y como indica la literatura los valores de G_0 aumentan en función de la presión de confinamiento, y son mayores cuando la relación de vacíos disminuye, esto tanto en función de la compactación como del tamaño de las partículas del material.

Agradecimientos

Este trabajo hace parte del proyecto de investigación ING-953 “Hacia la obtención de un modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante” financiado por la Universidad Militar Nueva Granada. Fausto Andrés Molina, apoyó y colaboró en la ejecución de los ensayos triaxiales de este proyecto.

Referencias

- [1] Kokusho, T., Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, *Soils and Foundations*, vol. 20(2), pp. 45-60, 1980.

- [2] Ishibashi, I. y Zhang, X., Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, *Soils and Foundations*, vol. 33(1), pp. 182-191, 1993.
- [3] Zhou, Y. y Chen, Y., Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 20, pp. 341-353, 2005.
- [4] Jafarzadeh, F. y Sadeghi, H., Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 32, pp. 26-41, 2012.
- [5] Yamin, L., Caicedo, B. y Solano, E., Evaluación de la respuesta dinámica del subsuelo en depósitos volcánicos y sus implicaciones para el diseño sísmico, *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, vol. 10, pp. 79-84, 1999.
- [6] Garcia, J. R., Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. aplicación a Tumaco (Colombia), Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña, 2007.
- [7] Rivas, D., Influencia de la micro-estructura en el comportamiento dinámico de los suelos residuales de esquistos en Sabaneta, tesis de maestría, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Feb. 2010.
- [8] Chaves, J. F., Generación de presión de poros en procesos cílicos no drenado, tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [9] Velásquez, A., Los terremotos del Atrato Medio-Murindó en Octubre de 1992, Desastres de origen natural en Colombia 1979 - 2004, Medellín, pp. 91-108, 2005.
- [10] Dos Santos J. A. y Gomes-Correia, A., Reference threshold shear strain of soil. Its application to obtain an unique strain-dependent shear modulus curve for soil, 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, 2001.
- [11] Ishihara, I., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University, Oxford, 1996.
- [12] Camacho-Tauta, J. F., Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non- conventional dynamic testing methods, Ph.D. Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [13] Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D., *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1970.
- [14] Camacho-Tauta, J. F., Hacia la obtención de un modelo unificado de curvas de reducción del módulo cortante. Propuesta proyecto de investigación, Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Geotecnia, Bogotá. 2012.
- [15] Vucetic, M., Cyclic threshold shear strain in soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 120(12), pp. 89-107, 1994.
- [16] Vucetic, M. and Dobry, R., Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 117(1), 89-107, 1991.
- [17] Hardin, B. O. and Drnevich, V. P., Shear modulus and damping ratio in soils: Design equations and curves, *Journal of Soils Mechanics and Foundations Division*, ASCE, vol. 98, no. SM7, pp. 667-692. Jul, 1972.
- [18] Amorocho, R., Bayona, G. y Reyes-Harker, A., Controles en la composición de arenas fluviales en la zona proximal de una cuenca de antepais tropical (Colombia), *Revista Geología Colombiana*, vol 36 (1), pp. 163-178. Ago, 2011.
- [19] INVIA, Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral. Norma I.N.V.E-128-07, Colombia. 2007.
- [20] ASTM. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus, D3999-91, Reapproved 1996.
- [21] Camacho-Tauta, J. F., Jiménez, J. D. and Reyes-Ortiz, O. J., A procedure to calibrate and perform the bender element test, DYNA. Vol. 79(175), pp. 10-18, 2012.
- [22] Darendeli, M.B., Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD Thesis, The Univ. of Texas, Austin, TX, 2001.

Influence of the normal stresses to direction of shear flow in the rheology of concentrated kaolin suspensions

Influencia de los esfuerzos normales a la dirección de flujo cizallante en la reología de suspensiones concentradas de caolín

Néstor Ricardo Rojas-Reyes ^a & Moisés Oswaldo Bustamante-Rúa ^b

^a Dr. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. nrrojasr@unal.edu.co

^b Dr. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. mobustam@unal.edu.co

Received: July 29th, 2013. Received in revised form: October 7th, 2013. Accepted: November 5th, 2013.

Abstract

Due to the multiple applications that kaolin has, including the ceramic industry where it is used as a slurry with high solid concentrations, its rheological behavior is quite important in mixing, agitation and pumping stages. After characterizing the kaolin by applying XRD, XRF, SEM and particle size methods, a rheological evaluation was performed in a rotational rheometer which consisted of measuring the primary normal stress difference $N1$ by a method that delivered good reproducibility results. With $N1$ data it was obtained a kind of viscosity known as dilatant viscosity which was found only for those suspensions with a volumetric concentration higher than 0.13. This dilatant viscosity depends on the shear rate and the CV , and it was modeled with the power law structure having good coefficients of determination. Finally it was found that the dilatant viscosity with a $CV = 0.2$ is almost five times the value of the shear viscosity, thus demonstrating that for a better understanding of the deformation stage must be taken into account the normal stresses in shear flow happening in the kaolin concentrated suspension.

Keywords: Kaolin concentrated suspensions, rheology, normal stress difference.

Resumen

Debido a las múltiples aplicaciones que tiene el caolín, entre ellas en la industria cerámica, donde se utiliza como suspensión con altas concentraciones de sólido, su comportamiento reológico es de suma importancia en etapas de mezclado, agitación y bombeo. Luego de caracterizar el caolín por DRX, FRX, SEM y tamaño de partícula, se le realizó una evaluación reológica en un reómetro rotacional, consistente en la medición de primera diferencia de esfuerzos normales $N1$, mediante un método que entregó buenos resultados de reproducibilidad. Con los datos de $N1$ se obtuvo un tipo de viscosidad denominada viscosidad dilatante, la cual se encontró sólo para suspensiones con concentración volumétrica de sólido, Cv , mayor a 0,13. Esta viscosidad dilatante depende de la tasa de cizalladura y de la Cv , y se modeló con la estructura de ley de potencia con buenos coeficientes de determinación. Por último se encontró que la viscosidad dilatante a $Cv = 0,20$ es casi 5 veces el valor de la viscosidad cizallante, demostrando con esto que para una mejor comprensión del escenario de deformación se deben tener en cuenta los esfuerzos normales en flujo cizallante que experimenta una suspensión concentrada de caolín.

Palabras Clave: Suspensiones concentradas de caolín, reología, diferencia de esfuerzos normales.

1. Introducción

El caolín es una roca masiva con un porcentaje variable de minerales de arcilla, de composición igual o próxima a la del mineral caolinita ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el cual está constituido por capas sucesivas de octaedros de alúmina y tetraedros de sílice, que se alternan para formar partículas laminares con forma pseudo-hexagonal [1]. Las arcillas caoliníferas son valoradas comercialmente debido al uso directo en la industria, mientras que los caolines son procesados previamente para incrementar las propiedades deseadas que residen en las partículas individuales [2]. El caolín posee múltiples aplicaciones industriales; las más conocidas son: como

recubrimiento y relleno para papel, imprenta, lubricación, adhesión, industria cerámica, pinturas, plásticos, refractarios, cementos, muy importante en la industria de cosméticos y farmacéutica, construcción, en cauchos y hules, química y forraje [2, 3]. Esta variedad de usos deriva de sus propiedades fisicoquímicas, entre las que destacan: blancura, inerte ante reactivos químicos, atoxicidad, poder de recubrimiento, resistencia mecánica después de calcinación y elevada refractariedad [4]. El caolín es utilizado generalmente disperso en agua para determinadas aplicaciones industriales, como es el caso de recubrimiento de papel y relleno de plásticos, sin embargo, la formulación de algunos productos de la industria cerámica demanda suspensiones de altas concentraciones en



sólidos, llegando incluso hasta un contenido sólidos de 60 % en peso (20% en volumen) [5].

El comportamiento reológico de las suspensiones de caolín depende de diferentes parámetros tales como las propiedades físicas y químicas del solvente, nivel de pH, fracción volumétrica de sólidos, distribución y tamaño de partícula, propiedades superficiales de las partículas, entre otros [6, 7]. Las suspensiones cerámicas con alta fracción volumétrica generalmente muestran un comportamiento no newtoniano caracterizado por una viscosidad cizallo-dependiente [8, 9].

Con respecto a la medición de la diferencia de esfuerzos normales DEN (como aparecerá de aquí en adelante), en estado estacionario, Brady y Vicic (1995) [10], quienes utilizaron suspensiones de partículas esféricas brownianas mono-tamaño en líquido newtoniano, determinaron que los esfuerzos en suspensiones concentradas divergen de la teoría debido a un alto empaquetamiento de las partículas y que también se deben tener en cuenta efectos termodinámicos e hidrodinámicos para predecir el comportamiento reológico de éstas suspensiones. Zarraga et al., (2001) [11], determinaron que la magnitud de la primera y segunda DEN se incrementa con la fracción volumétrica de sólidos, en suspensiones viscoelásticas de esferas no coloidales mono-dispersas, en un fluido puramente elástico. Mall-Gleissle et al., (2002) [12], con suspensiones de esferas de vidrio mono-tamaño sumergidas en fluido viscoelástico, encontraron, a diferencia de las demás investigaciones, que para éstas dispersiones la primera DEN disminuye con el contenido de sólidos. Boyer et al., (2010) [13], reportaron medidas de la DEN en suspensiones con esferas de poliestireno micrométrico mono-tamaño en fluido newtoniano, pero trabajaron con un reómetro de rodillo y un perfilómetro óptico para medir la deflexión superficial negativa o positiva, y de esta forma la DEN. En dicho trabajo ellos determinaron que la DEN se incrementa con el aumento en la concentración de sólidos y que éste comportamiento es tiempo-dependiente debido a la migración de las partículas. Garland et al., (2013) [14] quienes utilizaron suspensiones concentradas de esferas micrométricas de poliestireno con distribución de tamaño en un fluido polimérico, obtuvieron esfuerzos normales radiales mediante la medición de la presión en la pared de un sistema cilíndrico Taylor-Couette, determinando que el esfuerzo normal radial de la fase partícula no muestra dependencia con respecto al tamaño de partícula y se incrementa linealmente con la tasa de cizalladura y cuadráticamente con la concentración volumétrica de sólidos.

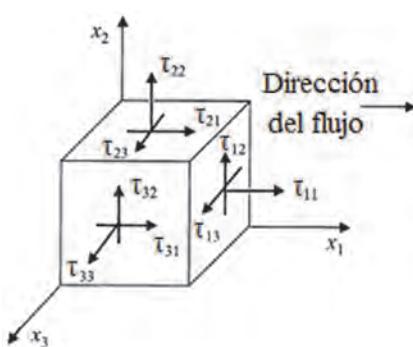


Figura 1. Notación usada en el artículo para las componentes de esfuerzo [16].

La distribución de esfuerzos en un líquido visco-elástico durante su flujo cizallante puede ser escrita formalmente definiendo el esfuerzo de cizalla τ_{21} y la primera DEN $N1$ y segunda DEN $N2$ (todas con unidades de Pa) como:

$$\tau_{21} = \mu_C \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$N_1 = \tau_{11} - \tau_{22} \quad (2)$$

$$N_2 = \tau_{22} - \tau_{33} \quad (3)$$

donde los subíndices 1, 2 y 3 denota la dirección de flujo, dirección normal al flujo y dirección de vorticidad, respectivamente [15 – 17], como se observa en la Figura 1.

μ_C es la viscosidad cizallante y $\dot{\gamma}$ es la tasa de cizalladura, con unidades de Pa·s y s^{-1} , respectivamente. Se debe tener en cuenta que valores negativos de $N1$ (Ecuación 2) aparecen cuando los esfuerzos en dirección normal al flujo son mayores que los esfuerzos normales en dirección paralela al flujo, pero los reómetros registran este valor como positivo. Aunque el valor de $N1$ y $N2$ para fluidos newtonianos es cero, para líquidos poliméricos o fluidos viscoelásticos, $N1$ es positiva y $N2$ es negativa y/o mucho más pequeña que $N1$ [18 – 20]. Un ejemplo de respuesta visible a un valor $N1$ positivo, aparece cuando un fluido o suspensión “asciende” por una varilla que está girando dentro de él, fenómeno que se conoce como efecto Weissenberg [15, 16].

Hasta el momento generalmente la medición de la DEN ha sido asociada sólo a suspensiones con fluidos poliméricos [21, 22], y aparece debido a la anisotropía de los esfuerzos cizallantes y normales que se presentan en este tipo de suspensiones [11] y no se encuentra relacionada al comportamiento pseudoplástico o cizallo-adelgazante de suspensiones cerámicas comunes [8, 23 - 25]. El objetivo del presente estudio es determinar la importancia de los esfuerzos en dirección normal al flujo cizallante a partir de la medición de la primera DEN $N1$ (como aparecerá de aquí en adelante), encontrada en suspensiones concentradas de caolín.

2. Materiales y metodología

2.1. Material y equipo

La materia prima con la cual se trabajó en el proyecto es un caolín proveniente del departamento de Antioquia - Colombia. Este caolín se comercializa para diferentes empresas cerámicas y cementeras de la región. El valor promedio de la densidad del caolín es $2,46 \text{ g/cm}^3$ y para su venta se asegura que el 80% de los tamaños de partícula sean menores de 44 micrones. La caracterización del caolín consistió en un análisis por DRX, FRX, tamaño de partícula y SEM. El análisis por DRX se llevó a cabo en un equipo Panalytical Xpert-Pro con una lámpara de cobre de longitud de onda $1,548 \text{ \AA}$, con $2q$ de cero hasta 60° y una velocidad de barrido de $2^\circ/\text{min}$, utilizando el método de polvo de Debye Scherrer, y se comparó con una muestra de caolín

estándar, este último adquirido a la empresa Motamineral – Minerais Industriais, S.A. (Brasil). El equipo utilizado para el análisis por FRX fue un Bruker S1 Turbo SD. La distribución de tamaño de partícula (DTP) se determinó en un analizador por difracción láser Mastersizer 2000, de la casa Malvern (UK), y el análisis por SEM fue realizado en un equipo JEOL JSM-6490LV. Las medidas reológicas se llevaron a cabo en un reómetro rotacional Bohlin Instruments C-VOR 200 (Malvern Instruments), en la celda Peltier a temperatura controlada ($25^{\circ}\text{C} \pm 0,01$), con la geometría cono-plato de 4° y 40 mm de diámetro, fabricada en titanio bajo norma, con una separación entre platos de 150 micras, la cual es predeterminada por la geometría. Las suspensiones se fabricaron a diferente concentración volumétrica de sólidos C_v , pesando la cantidad de sólido calculada en seco, mezclando con agua desionizada y microfiltrada, a pH natural de 4,5, agitándola por un tiempo mínimo de 5 minutos antes de realizar cada medición reológica y con tres repeticiones para cada medición.

2.2. Método para medición de la DEN

Valores de la DEN aparecen en el estado de equilibrio, el cual se obtuvo al repetir la aplicación de la cizalla sobre la muestra 3 veces, encontrándose que los valores de la tercera medida poseen buena reproducibilidad entre diferentes pruebas, como se observará en la sección de resultados. La respuesta particular de la suspensión en estudio es atribuida a la existencia de una estructura anisotrópica cizallado-inducida debido precisamente a la aparición de esfuerzos normales [13, 26]. Con base en que las investigaciones que se encontraron en la literatura siempre trabajan con partículas esféricas [11, 12, 27], se supone que el mayor tiempo que tarda la suspensión de caolín en reportar valores de N1 con poca variación, es decir, estabilización de la medida con la aplicación de la cizalla por lo menos 3 veces, se relaciona con la morfología laminar que presentan las partículas de caolín, pues éstas van a tardar más tiempo en migrar y organizarse (comparadas con partículas esféricas) hasta lograr una medición de esfuerzos normales con una variación de los datos relativamente pequeña, como se observa en la Figura 2. Todos los valores reportados en el presente trabajo provienen de la tercera medida reométrica de las suspensiones de caolín.

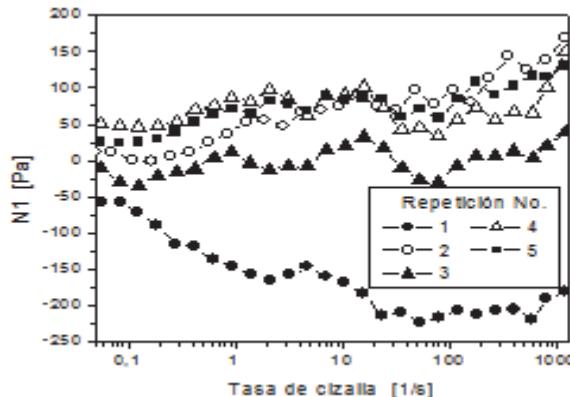


Figura 2. Estabilización de la medición de N1.

2.3. Definición de viscosidad dilatante μ_D

La $N1$ positiva puede ser medida a partir de la fuerza normal F , que trata de separar el cono del plato inferior cuando la suspensión se está ensayando [28]. Para la geometría cono-plato la proporcionalidad de la $N1$ a la fuerza axial o empuje F ejercido, donde R es el radio de la geometría [11, 12], se define como:

$$N1 = \frac{2F}{\pi R^2} \quad (4)$$

Las relaciones que utilizan el valor de $N1$, generalmente al trabajar con materiales viscoelásticos, tales como el coeficiente de esfuerzo normal Ψ_1 [16], la viscosidad de esfuerzo normal $\mu_n(\phi)$ [27] y el esfuerzo normal adimensional ζ_1 [11], son relaciones que no entregaron gráficos aptos para análisis con los valores de $N1$ obtenidos para las suspensiones de caolín; por esta razón se buscó una nueva relación para evaluar los efectos de las propiedades de la suspensión de caolín sobre la $N1$. Así como la viscosidad cizallante se define como la razón del esfuerzo cizallante sobre la tasa de cizalladura (Ecuación 1), la viscosidad dilatante se define en la presente investigación, como la razón de la primera diferencia de esfuerzos normales ($N1$) sobre la tasa de cizalladura:

$$\mu_D = \frac{N1}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

donde μ_D también posee unidades Pa·s.

2.4. Ecuación para la modelación de μ_D

Al graficar en escala log-log el esfuerzo de cizalla y la tasa de cizalladura de tal forma que aparece un comportamiento lineal en gran parte de la tasa de cizalladura elegida para el análisis, aparece una relación funcional empírica conocida como la ley de potencia, la cual fue propuesta originalmente por de Waele en 1923 y por Oswald en 1925 [29, 30], y se encuentra frecuentemente como:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

donde K es una medida de la “consistencia” del fluido, altos valores de K significan viscosidad alta del fluido; n es el “índice de potencia”, entre más alejado de 1 indica un comportamiento más alejado del newtoniano. La viscosidad cizallante de un fluido que obedece la ley de potencia puede ser expresada en términos de K y n como:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (7)$$

Esta ecuación puede modelar entre otros: polímeros de cadenas largas, suspensiones con polímeros, con cementos y con arcillas. Una interpretación de este comportamiento es que, con el incremento en la tasa de cizalladura, las moléculas o las estructuras de la suspensión son progresivamente alineadas [31].

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del material

La Figura 3 muestra el análisis por DRX del caolín y una muestra estándar de caolín, donde se reporta que para el material en estudio la fase mineralógica principal es la caolinita con presencia del 89 %, y las fases secundarias son la moscovita con 8 % y el cuarzo con 3 %. Con respecto al caolín estándar, el análisis reportó un 99% de pureza.

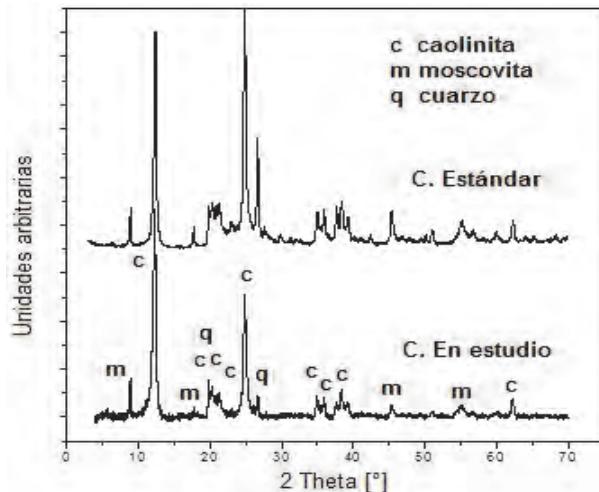


Figura 3. DRX del caolín en estudio y un caolín estándar.

Tabla 1.

Ánálisis por FRX del caolín.

Compuesto	%
SiO ₂	40,02
Al ₂ O ₃	36,00
Fe ₂ O ₃	1,24
MgO	0,56
K ₂ O	0,50
TiO ₂	0,50
S	0,08
CO	0,01

Los resultados del análisis por FRX se observan en la Tabla 1, donde se encuentra que los valores están acordes con los análisis reportados para diferentes tipos arcillas caoliniticas de acuerdo con Murray (2007) [32], Torres y Mejía (2007) [33] y Yuan y Murray (1997) [9].

La distribución de tamaño de partícula (DTP) entrega valores para los percetiles d10, d50 y d90 de $2,67 \pm 0,08 \mu\text{m}$, $16,79 \pm 0,19 \mu\text{m}$ y $60,91 \pm 0,36 \mu\text{m}$, respectivamente, como se puede observar en la Figura 4.

Las micrografías por SEM se presentan en la Figura 5, donde se observa en general una geometría de partículas completamente heterogénea (Figura 5a); y al detallar una de

ellas se observa que está formada por varias láminas en forma de "libro" (Figura 5b), las cuales en contacto con el agua se separan y fluyen de forma tal que la superficie basal se organiza en dirección paralela al flujo [34].

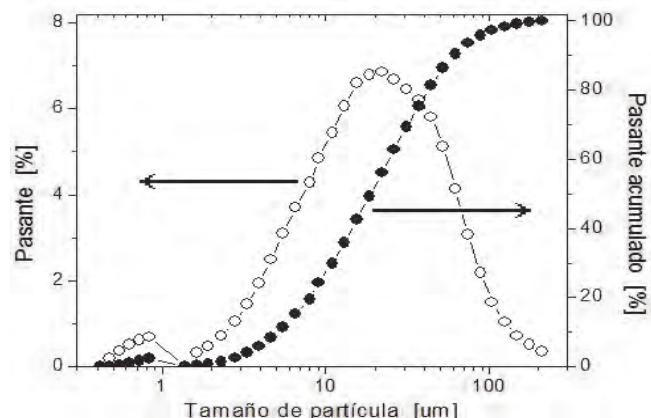


Figura 4. DPT del caolín.

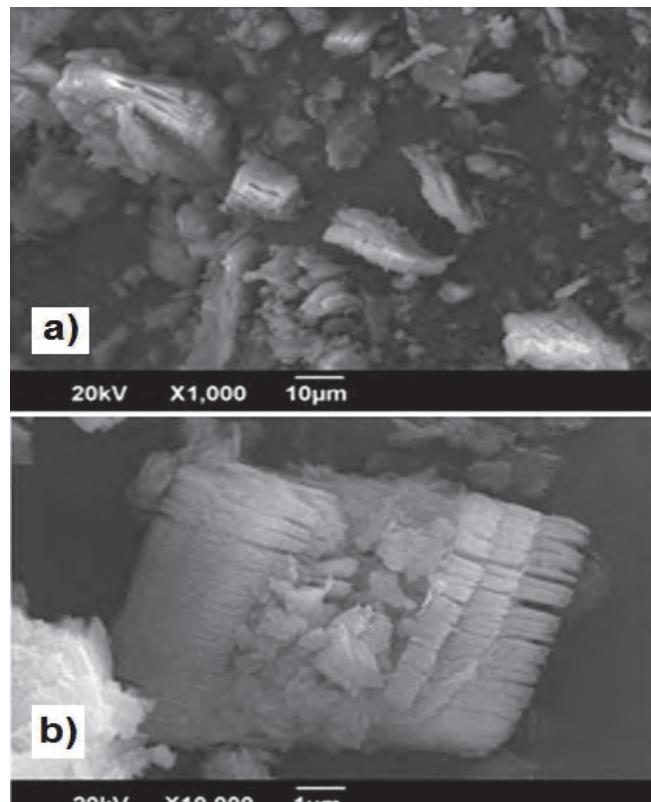


Figura 5. SEM de a) partículas de caolín a 1.000 X y b) detalle de una partícula a 10.000X.

3.2. Caracterización reológica

Dentro del procesamiento normal de un material cerámico, las suspensiones de caolín están sometidas a una serie de etapas tales como mezclado, agitación y bombeo, por lo que a menudo es importante analizar adecuadamente las propiedades reológicas del sistema en valores muy dispares de velocidad de cizalla [24]. Por esta razón se seleccionó un barrido de la tasa de cizalladura desde $0,01$ hasta 1200 s^{-1} en un tiempo de 300 s.

3.2.1. Reproducibilidad del método

Cabe recordar que la N_1 la reporta el reómetro positiva cuando los esfuerzos normales son mayores que los esfuerzos cizallantes, lo cual se obtuvo para suspensiones de caolín concentradas. La Figura 6 muestra un ejemplo de los datos obtenidos para una suspensión de caolín a una concentración volumétrica $C_v = 0,16$. En dicha figura se observa la conveniencia de graficar la viscosidad dilatante μ_D en lugar de graficar la N_1 , con respecto a la reproducibilidad de datos y posterior análisis. También se observa la dependencia lineal de la viscosidad dilatante con respecto a la tasa de cizalladura.

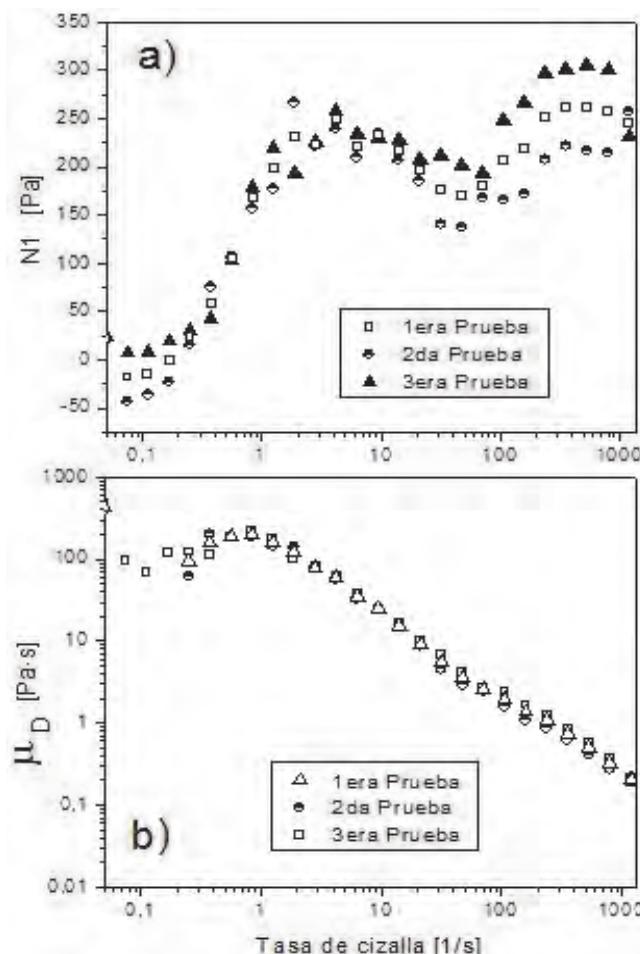


Figura 6. a) Datos de N_1 y b) datos de la viscosidad dilatante μ_D , en estado de equilibrio.

3.2.2. Efecto de la concentración volumétrica de sólidos C_v

En la Figura 7 se grafica la viscosidad dilatante en función de la tasa de cizalladura y de la C_v , con datos de viscosidad dilatante a valores de C_v mayores a 0,13.

Los datos presentados en la Figura 7 se pueden modelar sobre la parte lineal que se observa a tasas de cizalladura superiores a 1 s^{-1} , con lo cual se plantea que a bajas velocidades de deformación existen micro-estructuras de partículas desordenadas y por lo tanto, una DEN nula; pero a medida que aumenta la tasa de cizalladura, las partículas

de caolín se van organizando de forma direccional y van fluyendo en la dirección de la cizalla. La estructura del modelo, basado en las ecuaciones 6 y 7, es la siguiente:

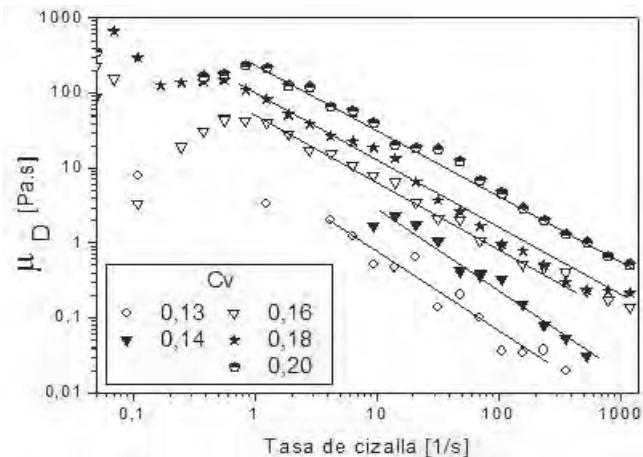


Figura 7. Viscosidad dilatante μ_D , en función de la tasa de cizalladura y de la C_v .

$$\mu_D = \frac{N_1}{\dot{\gamma}} = K_D \cdot \dot{\gamma}^{n^* - 1} \quad (8)$$

donde K_D es una función con unidades de Pa, y n^* es una medida del grado de comportamiento de la viscosidad dilatante.

Tabla 2.
Modelos reológicos para la viscosidad dilatante μ_D , para $1 > \dot{\gamma} > 1200 \text{ s}^{-1}$.

C_v	Ecuación de la recta	R^2
0,13	$\mu_D = 7,831 \cdot \dot{\gamma}^{-1,035}$	0,9483
0,14	$\mu_D = 13,867 \cdot \dot{\gamma}^{-0,947}$	0,7211
0,16	$\mu_D = 48,694 \cdot \dot{\gamma}^{-0,864}$	0,9945
0,18	$\mu_D = 110,71 \cdot \dot{\gamma}^{-0,952}$	0,9869
0,20	$\mu_D = 273,09 \cdot \dot{\gamma}^{-0,885}$	0,9931

Los modelos reológicos de viscosidad dilatante con la estructura de ley de potencia obtenidos para las curvas de suspensiones de caolín con $C_v > 0,13$ se reportan en la Tabla 2, donde también se observa el coeficiente de determinación para cada una, con lo cual se puede determinar que existe una buena correlación entre los datos y el modelo. También se observa que existe una relación proporcional entre el valor de K_D y la concentración de sólidos, así que una generalización de las ecuaciones de la Tabla 2 en función de la C_v para K_D es la siguiente:

$$K_D = 1,7 \times 10^8 \times C_v^{8,2546} \quad (9)$$

Y en relación a n^* , también se puede obtener la siguiente relación:

$$n^* = 1,4878 \times C_v - 0,174 \quad (10)$$

Con respecto a la viscosidad cizallante, la Figura 8 entrega las curvas de flujo donde se observa un

comportamiento cizallo-adelgazante, el cual es típico de suspensiones arcillosas, con un aumento en el esfuerzo de cizalla a medida que crece la concentración de sólidos en la suspensión.

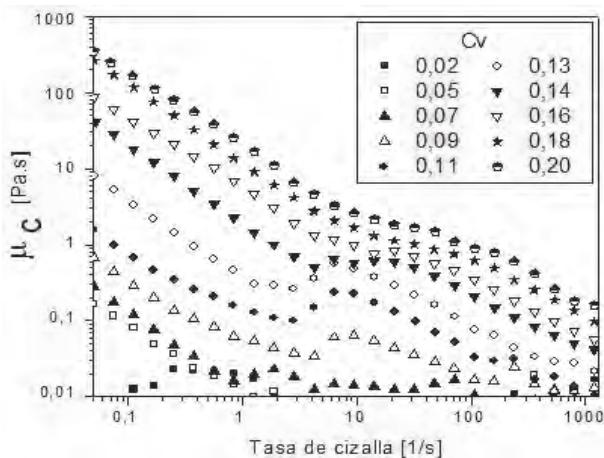


Figura 8. Viscosidad cizallante μ_C , en función de la tasa de cizalladura y de la Cv .

En la Figura 9 se observa que la aparición de la DEN coincide también con el reporte de valores relativamente altos de viscosidad cizallante. Entonces se puede determinar que a concentraciones altas de suspensiones de caolín, aunque el flujo del material vaya en sentido de la cizalla, se generan interacciones entre las partículas que crean desplazamientos de las mismas en dirección normal a la cizalla, y se observa además que dichas interacciones se van haciendo más significativas y evidentes a medida que aumenta la cantidad de partículas en suspensión.

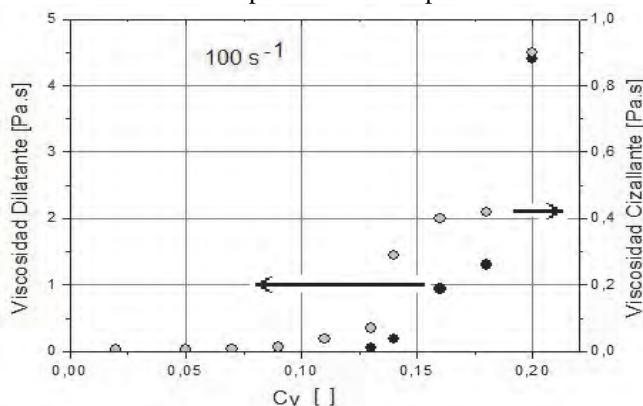


Figura 9. Viscosidad dilatante y cizallante en función de Cv , a una tasa de cizalla = 100 s^{-1} .

La cuantificación de la influencia de dichas interacciones en función de la Cv en la Figura 9, se obtuvo a una tasa de cizalladura constante de 100 s^{-1} . Allí se observa que a bajas concentraciones de sólido existe un dominio de la fase continua que controla el comportamiento de la suspensión, de tal forma que las partículas de caolín se organizan en dirección del flujo cizallante, con ausencia de valores de DEN.

Para dispersiones con altas concentraciones de sólido ($Cv > 0,13$), los altos valores de viscosidad cizallante y dilatante no solamente son debidos al gasto energético necesario para trasladar las partículas en suspensión, sino además, a que la

mayor proporción de estos esfuerzos es debida a la DEN que se encuentra en el sistema agua – caolín.

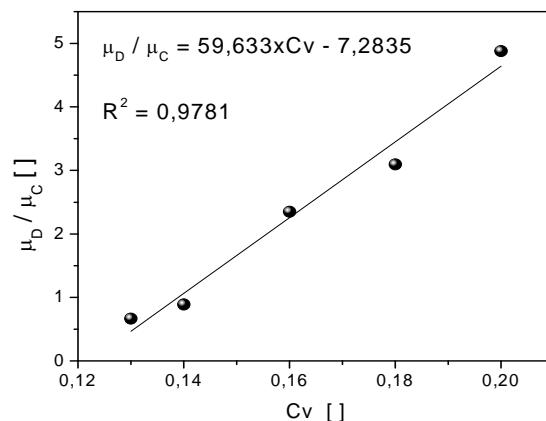


Figura 10. Razón de la viscosidad dilatante sobre la viscosidad cizallante en función de la Cv .

La Figura 10 muestra la razón de la viscosidad dilatante sobre la viscosidad cizallante, y además la ecuación que representa este comportamiento en función de la Cv y su buena correlación lineal. Los valores de viscosidad dilatante y cizallante para suspensiones de caolín con $Cv = 0,13$ son muy semejantes: 0,06 y 0,07 Pa·s, respectivamente; pero a concentraciones altas, como $Cv = 0,20$, los valores de viscosidad dilatante y cizallante son bastante disímiles: 4,39 y 0,9 Pa·s, respectivamente. Es decir, la viscosidad debida a esfuerzos normales es 488 % mayor que la viscosidad debida a esfuerzos cizallantes, datos nunca antes reportados, por lo menos en la literatura consultada por el autor.

Debido a que la viscosidad dilatante posee casi 5 veces el valor de la viscosidad cizallante, este fenómeno debería ser visible, lo cual se observa en la Figura 11, cuando una suspensión de caolín con $Cv = 0,20$ es expulsada por una jeringa. En dicha figura se muestra el cambio de volumen que aparece exactamente cuando la suspensión abandona la punta de la jeringa, lo cual es característico de algunos fluidos no newtonianos.

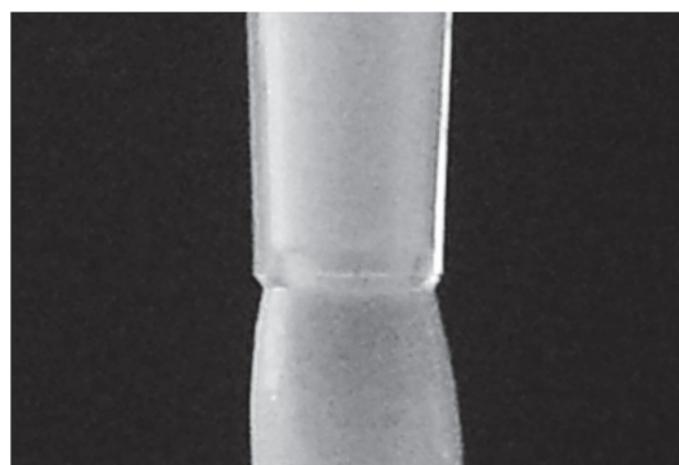


Figura 11. Respuesta visible de la influencia expansiva o dilatante de los esfuerzos normales en una suspensión de caolín con $Cv = 0,20$.

4. Conclusiones

Las conclusiones más relevantes del presente trabajo son las siguientes:

Se determinó un nuevo método para medir la primera diferencia de esfuerzos normales (NI) en suspensiones concentradas de caolín, los cuales aparecen debido a la existencia de interacciones entre las partículas de caolín que crean desplazamientos de las mismas en dirección normal a la cizalla.

A medida que crece el número de partículas colisionantes, aumentan los desplazamientos en dirección normal al flujo, por esta razón el valor de la NI , y por lo tanto de la viscosidad dilatante, es dependiente de la Cv .

Los valores de viscosidad dilatante se pueden modelar sobre la parte lineal a tasas de cizalladura superiores a 1 s^{-1} , para cada Cv estudiado con una estructura de ley de potencia, e incluso se puede obtener una generalización de estas ecuaciones en función de la Cv para los parámetros K_D y n^* .

Existe una relación a la octava potencia entre el valor de K_D y la Cv para la suspensión de caolín en cuestión

El estudio reológico de este tipo de suspensiones se puede realizar mediante una nueva medida reométrica: la viscosidad dilatante, la cual es función de la tasa de cizalladura, lo cual se puede explicar debido a que las partículas se ordenan para su flujo, no sólo bajo la influencia del esfuerzo cizallante sino también en función de las interacciones en dirección normal entre las partículas, lo cual es coherente con la aparición de los esfuerzos normales.

En esta investigación se encuentra que para una mejor comprensión del escenario de deformación de una suspensión de caolín, la consideración de los esfuerzos normales, además de los clásicos de cizalladura, es imprescindible, pues el valor de la viscosidad dilatante es alrededor de 5 veces mayor que el valor de la viscosidad cizallante para suspensiones con $Cv = 0,20$.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto con código 1118-479-22017 y a la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Referencias

- [1] Greenwood, R., Lapčíkova, B., Surýnek, M., Walters, K. and Lapčík, L., The zeta potential of kaolin suspensions measured by electrophoresis and electroacoustics. *Chem. Pap.* 61(2), pp. 83-92, 2007.
- [2] Bartolomé, J., El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio.* 36 (1), pp. 7-19, 1997.
- [3] Teh, E., Leong, Y., Lui, Y., Fourie, A. and Fahey, M., Differences in the rheology and surface chemistry of kaolin clay slurries: The source of the variations. *Chem. Eng. Sci.* 64, pp. 3817-3825, 2009.
- [4] Murray, H., Traditional and new applications for kaolin, smectite and palygorskite: a general review. *Applied Clay Science.* 17, pp. 207-221, 2000.
- [5] Monzo, M., Martínez, A. y Enrique, J., Estudio de las propiedades reológicas de pastas cerámicas para atomización. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vídr.* Vol. 18 (4), pp. 239-241, 1979.
- [6] Horri, B., Ranganathan, P., Selomulya, C. and Wang, H., A new empirical viscosity model for ceramic suspensions. *Chemical Engineering Science* 66, pp. 2798-2806, 2011.
- [7] Johnson, S., Russell, A. and Scales, P., Volume fraction effects in shear rheology and electroacoustic studies of concentrated alumina and kaolin suspensions. *Colloids Surf. A* 141, pp. 119-130, 1998.
- [8] Nuntiya, A. and Prasanphan, S., The rheological behavior of kaolin suspensions. *Chiang Mai J. Sci.* 33(3), pp. 271 – 281, 2006.
- [9] Yuan, J. and Murray, H., The importance of cristal morphology on the viscosity of concentrated suspensions of kaolins. *Appl. Clay Sci.* 12, pp. 209-219, 1997.
- [10] Brady, J. and Vicic, M., Normal stresses in colloidal dispersions. *J. Rheol.* 39(3), pp. 545-566, 1995.
- [11] Zarraga, I., Hill, D. and Leighton, D., Normal stresses and free surface deformation in concentrated suspensions of non-colloidal spheres in a viscoelastic fluid. *J. Rheol.* 45(5), pp. 1065-1084, 2001.
- [12] Mall-Gleissle, S., Gleissle, W., Mckinley, G., and Buggisch, H., The normal stress behavior of suspensions with viscoelastic matrix fluids. *Rheol. Acta* 41, pp. 61–76, 2002.
- [13] Boyer, F., Pouliquen, O. and Guazzelli, É., Dense suspensions in rotating flows: normal stresses and particle migration. Under consideration for publication in *J. Fluid Mech.* pp. 1-18, 2010.
- [14] Garland, S., Gauthier, G., Martin, J. and Morris, J., Normal stress measurements in sheared non-Brownian suspensions. *J. Rheol.* 57(1), pp. 71-88, 2013.
- [15] Morris, J., A review of microstructure in concentrated suspensions and its implications for rheology and bulk flow. *Rheol Acta* 48, pp. 909-923, 2009.
- [16] Macosko, C., *Rheology. Principes, Measurements and Applications. Advances in Interfacial Engineering Series*. Wiley-VCH. New York, 68-77, pp. 135-142, 1994.
- [17] Barnes, H., Hutton, J. and Walters, K., *An Introduction to Rheology. Rheology Series*, 3. Elsevier Science Publishers B.V. The Netherlands, pp. 55-66, 1989.
- [18] Chhabra, R. and Richardson, J., *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology. Engineering Applications*. Second Edition. Elsevier. pp. 34-38, 2008.
- [19] Larson, R., *The Structure and Rheology of Complex Fluids*. Oxford University Press, Inc. New York, Oxford, 11, pp. 164-166, 1999.
- [20] Bird, B. and Wiest, J., *Constitutive Equations for Polymeric Liquids*. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 27, pp. 169–93, 1995.
- [21] Malkin, A., Non-Newtonian viscosity in steady-state shear flows. *Review. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.* 192, pp. 48-65, 2013.
- [22] Barnes, H., A review of the rheology of filled viscoelastic systems. *Rheology Reviews.* pp.1-36, 2003.
- [23] Amorós, J., Beltrán, V., Sanz, V. y Jarque, J., Electrokinetic and rheological properties of highly concentrated kaolin dispersions: Influence of particle volume fraction and dispersant concentration. *Appl. Clay Sci.* 49, pp. 33–43, 2010.
- [24] Moreno, R., *Reología de suspensiones cerámicas*. Biblioteca de Ciencias 17. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, pp. 39-49, 2005.
- [25] Linares, J., Huertas, F., y Barahona, E., *Reología de suspensiones de minerales de arcilla*. Ciencia y Técnica. Noviembre – diciembre, pp. 635-643, 1969.

- [26] Kolli, V., Pollauf, E. and Francis, M., Transient normal stress response in a concentrated suspension of spherical particles. *J. Rheol.* 46(1), pp. 321-334, 2002.
- [28] Tadros, T., *Rheology of dispersions. principles and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim. Chapter 5, 2010.
- [29] Mezger, T., *The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*. 2nd revised edition *Coatings Compendia*, 33-35, 53-58, 2006.
- [30] Tanner, R., *Engineering Rheology*. Oxford Universiy Press. Second Edition. Oxford Engineering Science Series. USA, Chapter 1, 2000.
- [31] Quemada, D., Rheological modelling of complex fluids. I. The concept of effective volume fraction. *The European Physical Journal. Applied Physics*. 1, pp. 119-127, 1998.
- [27] Morris, J. and Boulay, F., Curvilinear flows of noncolloidal suspensions: The role of normal stresses. *J. Rheol.* 43(5), pp. 1213-1237, 1999.
- [32] Murray, H., *Applied clay mineralogy. Occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite and common clays. Developments in clay science*, 2. First edition, Elsevier. 87, 2007.
- [33] Torres, J. y Mejía, R., Influencia de la composición mineralógica de los caolines sobre el desempeño de morteros adicionados con MK. *Dyna*, Año 74(153), pp. 61-67, 2007.
- [34] Bergaya, F., Theng, B and Lagaly, G., "Handbook of Clay Science". *Developments in Clay Science*, Vol 1. *Colloid Clay Science*. Elsevier Ltd. Chapter 5, 2006.

Design of a three-finger end effector for optimal grip

Diseño de un efecto final de tres dedos para agarre óptimo

Vladimir Prada ^a, Oscar Avilés ^b & Mauricio Mauledoux ^c

^a M.Sc. Docente cátedra. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá-Colombia. vladmont@gmail.com

^b Ph.D. Docente de planta. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá-Colombia. oscar.aviles@unimilitar.edu.co

^c Ph.D. Docente de planta. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá-Colombia. mauricio.mauledoux@unimilitar.edu.co

Received: July 15th, 2013. Received in revised form: September 18th, 2013. Accepted: September 23th, 2013

Abstract

This paper presents the design of a three-fingered gripper with two degrees of freedom (DOF) per finger for a total of six (DOF). We show a brief mathematical description of the kinematics involved in the gripper with which to determine the workspace. With the workspace, all possible attachment points are obtained, that will be the points at which the end-effector contacts with the object geometry. To select which of these points is best for hold the object, we proceed to evaluate the force that is exerted on it by mathematical theory called Screw. This force should be the minimum to ensure that do not present sliding as well as avoid damages of the object by excess strength. Due to the fact that the contact points are numerous and evaluate them takes quite time by an algorithm combining, for this reason the optimization algorithm Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) is implemented. The results of the optimization with attachment points that exert minimal force were presented.

Keywords: Grasp, Gripper, NSGA, Optimization, Robotic, Screws.

Resumen

Este trabajo presenta el diseño de un gripper de tres dedos con dos grados de libertad (DOF) por dedo para un total de seis (DOF). Se hace una breve descripción matemática de la cinemática que interviene en el gripper con la cual se determina el área de trabajo. Con el área de trabajo se obtienen todos los posibles puntos de agarre que serán los puntos en el que el efecto final entra en contacto con la geometría del objeto. Para seleccionar cuál de estos puntos es el mejor para sujetar el objeto, se procede a evaluar la fuerza que se ejerce sobre él por medio de la matemática denominada Screw. Esta fuerza debe ser la mínima tal que no halla deslizamiento y a su vez el daño del objeto por exceso de fuerza. Como los puntos de contacto son numerosos y evaluarlos toma bastante tiempo por un algoritmo combinatorio se implementa el algoritmo de optimización Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA). Se presentan los resultados de la optimización con los puntos de agarre que ejercen la mínima fuerza.

Palabras Clave: Agarrar, Efecto final, NSGA, Optimización, Pinza, Robótica, Tornillos

1. Introducción

En la actualidad tanto ingenieros como médicos han visto que los robots son una solución tangible en cuanto a tiempos de ejecución, eficiencia, calidad, precisión y manipulación de objetos [1, 2], pero en algunos casos estas ventajas no son suficientes para la manipulación de objetos de diferente tamaño y peso, con movimientos precisos y con diferentes niveles de fuerza, por esto se diseñó un efecto final o gripper [3, 4] que pueda ser una solución a la manipulación de objetos con formas irregulares [5]. Por lo anterior se realiza un diseño muy similar a la morfología de la mano humana, la cual posee una gran destreza y control sobre objetos de diferentes características [6].

A continuación se mencionan algunos de los grippers desarrollados de importancia a nivel científico destacando sus bondades. El gripper C6M utiliza para su accionamiento un sistema eléctrico de motores y un sistema neumático de

músculos. Esta mano consta de 20 motores montados debajo de la muñeca que proporcionan movimientos conformes. Siguiendo el principio de diseño de inspiración biológica, un par de tendones cada par motor inteligente de la articulación correspondiente de la mano y sensores de presión en cada una de las falanges para controlar fuerza en el agarre [7].

Las manos EH1 Milano y Elu-2 son de escala antropomórfica capaz de agarrar una gran variedad de objetos y detectarlos a través de sensores de fuerza y posición. Estas manos son capaces de reproducir los movimientos de la mano humana inclusive a la misma velocidad [8-10]. La mano Robonaut de la NASA consta de 14 grados de libertad, 2 en la muñeca y 12 grados en la mano. Esta mano alberga los motores y la unidad electrónica en el antebrazo, siendo 14 motores y 12 placas de circuitos [11]. Todos estos dispositivos son desarrollados para la implementación de diferentes técnicas de control y su finalidad es el agarre óptimo de la mayoría de los objetos.

A partir de un diseño de gripper se procede a analizar de qué forma se puede agarrar un objeto, partiendo de los grados de libertad que este posea y de la forma que tenga el objeto. A continuación se escoge la técnica de agarre a utilizar de las que se destacan cierre de fuerza y cierre de forma [12, 13]. El cierre de fuerza busca que la sumatoria de las fuerzas que ejercen cada uno de los dedos del gripper sean cero sobre el objeto que a su vez garantiza que no haya traslación. El cierre de forma busca que el gripper cobije al objeto o que tenga la mayor cantidad de puntos de contacto sobre el objeto.

Sin importar la técnica de agarre seleccionada se debe garantizar que el agarre del objeto sea un agarre efectivo, es decir que la fuerza del gripper no permita deslizamiento ni tampoco la deformación del objeto. Para ello es necesario realizar un equilibrio dinámico de fuerzas [14, 15] y controlar los movimientos del efecto garantizando un mínimo de fuerza [16].

El trabajo está organizado de la siguiente forma: Se muestra la formulación matemática de un efecto final de 6 GDL, en la sección 2.2 se muestra el área de cobertura de cada dedo y las posibilidades de apresión sobre un objeto, en la sección 3 se aborda la optimización del agarre para realizar un mínimo de fuerza por dedo mediante el algoritmo NSGA, y finalmente se presentan algunas conclusiones y trabajos futuros. La validación de este trabajo se realiza por medio de sistemas de diseño asistido por computadora (CAD) y Matlab®.

2. Analogía biomecánica del gripper de 3 dedos

La mano humana abarca desde la muñeca hasta la yema de los dedos en los seres humanos. Son el principal órgano para la manipulación de objetos. La punta de los dedos contiene algunas de las zonas con más terminaciones nerviosas del cuerpo humano y son la principal fuente de información táctil y de fuerza sobre el entorno. Es por lo anterior que se diseña un efecto final muy similar al de la mano humana en cuanto a dimensiones, comportamiento y destreza. Se partió realizando el análisis de la morfología del dedo índice Fig. 1. Las dimensiones para el diseño se determinaron a partir de la longitud y el diámetro de un dedo humano.

Este dedo cuenta con 4 grados de libertad, el primer grado de libertad está dado por la abducción y aducción presentes la falange proximal y los otros tres por la flexión y extensión de las falanges proximal, media y distal. Por facilidad de construcción e implementación se restringe el primero y último grado de libertad, obteniendo dos grados de libertad por cada dedo. Este diseño contempla tres dedos, dos de ellos opuestos al tercero Fig. 4, dando como resultado un gripper de 6 grados de libertad.

2.1. Cinemática del gripper

Con la Cinemática Directa se determina la dependencia que existe entre las coordenadas articulares o generalizadas

(θ), sus parámetros geométricos (e.g. longitud de los eslabones) y las coordenadas cartesianas x, y, z y de orientación θ, ϕ, ψ del último sistema de coordenadas o extremo final del efecto. Para determinar la posición del último sistema coordenado con respecto a la base del dedo, se debe usar la matriz de transformación homogénea, que en forma general se presenta en (1) [18]:

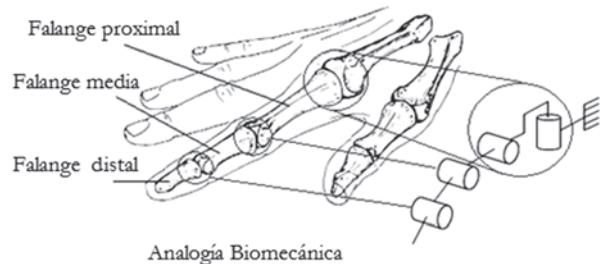


Figura 1. Equivalente Biomecánico de la mano humana.

$${}^{i-1}{}_iT = \begin{bmatrix} n(\theta) & s(\theta) & a(\theta) & | & p(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde ${}^{i-1}{}_iT$ es la matriz de transformación de la junta i con respecto a la junta $i - 1$ y donde los vectores n, s, a , son vectores ortogonales unitarios y p es un vector que describe la posición x, y, z del origen del sistema actual respecto del sistema de referencia.

En la Fig. 2 se muestra uno de los dedos con los sistemas de coordenadas para cada una de las articulaciones y en la Tabla 1 los parámetros estructurales, como lo describe el método de Denavit-Hartenberg [18-20].

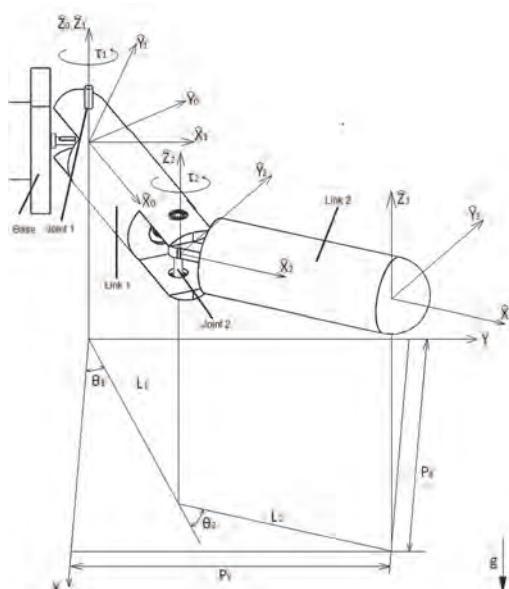


Figura 2. Sistemas coordenados para la obtención de la cinemática.

Tabla 1.

Parámetros de Denavit-Hartenberg para cada dedo con 2 GDL.

	i	θ_i [°]	α_{i-1} [°]	L_{i-1} [mm]	d_i [mm]
Dedo 1	1	0 – 150	0	-25	19
	2	0 – 90	0	60.3	0
	3	0	0	60.3	0
Dedo 2	1	0 – 150	0	25	0
	2	0 – 90	0	60.3	0
	3	0	0	60.3	0
Dedo 3	1	0 – 150	0	-25	-19
	2	0 – 90	0	60.3	0
	3	0	0	60.3	0

Para el dedo con grados de libertad Rotacional-Rotacional es necesario conocer la posición del último sistema coordenado y se realiza mediante la matriz de transformación 0_3T , o en otras palabras mediante el producto de las matrices 0_1T , 1_2T , 2_3T . La matriz de transformación homogénea que relaciona los sistemas coordenadas O0 con O3 es 0_3T , y esta matriz se muestra en (2):

$${}^0_3T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T$$

$${}^0_3T = \begin{bmatrix} {}^0_3R & {}^0_3P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\therefore {}^0_3R = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}^0_3P = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \cos(\theta_1)L_1 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \sin(\theta_1)L_1 \\ d_2 \end{bmatrix}$$

Con la matriz de transformación se tiene la matriz de orientación ${}^0_3R(\theta)_{3 \times 3}$ y el vector de traslación ${}^0_3P(\theta)_{3 \times 1}$ del punto final del dedo con respecto a la base o palma. Con el vector de traslación se determina el espacio de trabajo ya que provee de las posiciones en x , y y z .

2.2. Espacio de trabajo.

El espacio de trabajo es la disposición física de trabajo que cubre el punto final de cada dedo de acuerdo al grado de movilidad de cada articulación. Este se calcula a partir de la cinemática de cada dedo. Por lo tanto se implementa un algoritmo recursivo con (3) y (4).

$$Px = \cos(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \cos(\theta_1)L_1 \quad (3)$$

$$Py = \sin(\theta_1 + \theta_2)L_2 + \sin(\theta_1)L_1 \quad (4)$$

Con el fin de conocer el espacio de trabajo del gripper se hace un barrido con los rangos de rotación posibles de alcanzar por cada articulación y con las longitudes de los eslabones especificadas en la Tabla 1. Se grafica el barrido

de las posibles posiciones que puede alcanzar cada uno de los dedos, el objeto a agarrar y las posiciones de agarre Fig. 3. Las posiciones de agarre se generan cuando el espacio de trabajo toca la superficie del objeto.

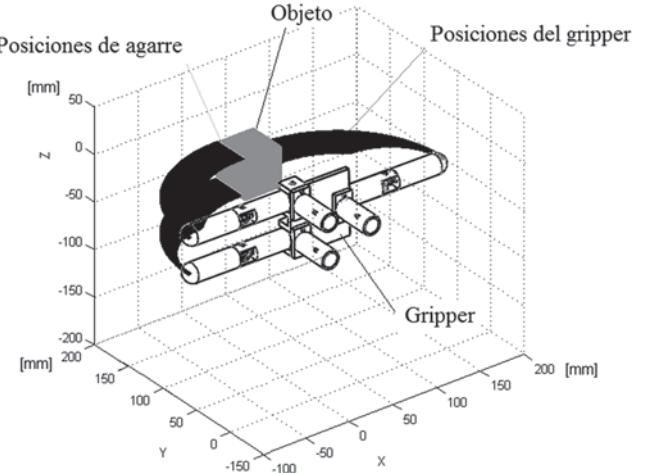


Figura 3. Posiciones del gripper para el agarre de un cubo.

2.3. Estabilidad dinámica de agarre.

La estabilidad dinámica es la matemática que permite a partir de una posición y orientación de cada dedo calcular las fuerzas necesarias para una sujeción sin deslizamiento y sin movimiento rotacional o traslacional. Para ello es necesario declarar sistemas de coordenadas adicionales P, S, C, O [15], como se muestra en la Fig. 4 y desarrollar la matemática que se describe a continuación:

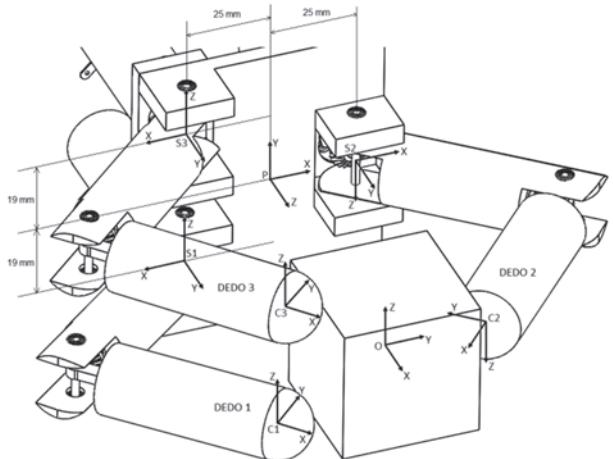


Figura 4. Gripper con sistemas de coordenadas.

- Sistema de coordenadas P hace referencia al origen de todos los sistemas coordinados y está localizado en la palma del gripper.
 - S_1, S_2, S_3 son los sistemas de coordenadas del origen de cada dedo.
 - C_1, C_2, C_3 son los sistemas de coordenadas del punto final de cada dedo.
 - O es el sistema de coordenadas del objeto.
- La teoría *Screw and Wrench* se refiere al álgebra y

cálculo de los pares de vectores, tales como las fuerzas y los momentos y la velocidad angular y lineal, que se presentan en la cinemática y la dinámica de los cuerpos rígidos. El marco matemático fue desarrollado por *Sir Robert Stawell Bola* en 1876 para ser aplicados en la cinemática y la estática de los mecanismos [15]. Un desplazamiento espacial de un cuerpo rígido puede ser definido por una rotación alrededor de una línea y una traslación a lo largo de la misma línea, llamado un desplazamiento tipo *Screw*, esto se conoce como teorema de *Chasles*. Un *Screw* es un vector de seis dimensiones construido a partir de un par de vectores de tres dimensiones, tales como las fuerzas y pares de torsión y la velocidad lineal y angular, que se presentan en el estudio del movimiento del cuerpo rígido espacial. Los componentes del *Screw* definen las coordenadas *Plücker* de una línea en el espacio y las magnitudes de los vectores a lo largo de la línea y el momento sobre esta línea.

Los vectores de fuerza y par de torsión que surgen en la aplicación de las leyes de Newton a un cuerpo rígido se pueden montar en un *Screw* de una llamada *Wrench*. Una fuerza tiene un punto de aplicación y una línea de acción, por lo tanto, define la *Plücker* coordenadas de una línea en el espacio y tiene pitch cero. Un par de torsión, por el contrario, es un momento puro que no está unido a una línea en el espacio y es un tornillo de paso infinito. La relación de estas dos magnitudes define el paso del tornillo. [26]

Para desarrollar esta teoría en el caso del gripper se comienza determinando la matriz de orientación ${}^P_{C_i}R$ y ubicación del punto final ${}^P_{C_i}p$ de cada dedo i con respecto al sistema coordenado P . Las matrices de rotación y posición para cada uno de los dedos se muestran numéricamente en (5), (6) y (7), de acuerdo a la posición mostrada en la Fig. 4 (Las dimensiones del cubo son de $20 \times 20 \times 20$ mm).

$${}^P_{C_1}R = \begin{bmatrix} 0.598 & 0.801 & 0 \\ 0.801 & -0.598 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^P_{C_1}p = \begin{bmatrix} -20 \\ 100 \\ 19 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^P_{C_2}R = \begin{bmatrix} -0.598 & -0.801 & 0 \\ 0.801 & -0.598 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^P_{C_2}p = \begin{bmatrix} 20 \\ 100 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^P_{C_3}R = \begin{bmatrix} 0.598 & 0.801 & 0 \\ 0.801 & -0.598 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^P_{C_3}p = \begin{bmatrix} -20 \\ 100 \\ -19 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir de la ubicación del punto final de cada dedo con respecto a P se calcula la posición de contacto del dedo con respecto al sistema coordenado O que se muestra en (8), (9) y (10).

$${}^O_{C_1}p = \begin{bmatrix} -20 \\ 0 \\ 19 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$${}^O_{C_2}p = \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^O_{C_3}p = \begin{bmatrix} -20 \\ 0 \\ -19 \end{bmatrix} \quad (10)$$

La matriz $Ad_{g_{oc_i}^{-1}}$ es la matriz de transformación wrench que mapea las wrench de contacto con las wrench del objeto, como se muestra en (11).

$$Ad_{g_{oc_i}^{-1}}^T = \begin{bmatrix} {}^O_{C_i}R & 0 \\ {}^O_{C_i}\hat{p} {}^O_{C_i}R & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Para poder realizar el producto ${}^O_{C_i}\hat{p} {}^O_{C_i}R$ basta con convertir el vector columna ${}^O_{C_i}p$ en vector fila y se denota ${}^O_{C_i}\hat{p}$, ya que el problema de sujeción es planar o en dos dimensiones. Debido a que no se ejerce fuerza lo largo del eje z, se elimina el valor en z del vector ${}^O_{C_i}\hat{p}$ y la última fila y columna de la matriz ${}^O_{C_i}R$.

La operación de ${}^O_{C_i}\hat{p}$ para los tres dedos se muestra en (12), (13) y (14)

$${}^O_{C_1}\hat{p} = [0 \quad -20] \quad (12)$$

$${}^O_{C_2}\hat{p} = [0 \quad 20] \quad (13)$$

$${}^O_{C_3}\hat{p} = [0 \quad -20] \quad (14)$$

La matriz $Ad_{g_{cc_1}^{-1}}^T$ para el dedo 1 se desarrolla como se muestra en (15), (16) y (17).

$${}^O_{C_1}\hat{p} {}^O_{C_1}R = [0 \quad -20] \begin{bmatrix} 0.5982 & 0.8014 \\ 0.8014 & -0.5982 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^O_{C_1}\hat{p} {}^O_{C_1}R = [-16.027 \quad 11.963] \quad (16)$$

$$Ad_{g_{oc_1}^{-1}}^T = \begin{bmatrix} 0.5982 & 0.8014 & 0 \\ 0.8014 & -0.5982 & 0 \\ -16.027 & 11.963 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Las matrices $Ad_{g_{cc_2}^{-1}}^T$ y $Ad_{g_{cc_3}^{-1}}^T$ se muestran en (18) y (19).

$$Ad_{g_{oc_2}^{-1}}^T = \begin{bmatrix} -0.5982 & -0.8014 & 0 \\ 0.8014 & -0.5982 & 0 \\ 16.027 & -11.963 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Ad_{g_{oc_3}^{-1}}^T = \begin{bmatrix} 0.5982 & 0.8014 & 0 \\ 0.8014 & -0.5982 & 0 \\ -16.027 & 11.963 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Se procede a definir el mapa de agarre $G_i \in R^{p \times m_i}$ mediante (20), el cual indica la posición y orientación que tiene cada dedo al entrar en contacto con el objeto.

$$G_i = Ad_{g_{oc_i}^{-1}}^T B_{C_i} \quad (20)$$

A partir del mapa de agarre G_i , se obtiene un mapa de agarre general G y para que este sea lineal con las fuerzas de contacto, G_i se multiplica con la matriz de contacto B_{c_i} , siendo i cada dedo y C el punto de contacto. El mapa de agarre general se define mediante (21), y la matriz de contacto en la Tabla 2 dependiendo de la forma de contacto y fuerza que existe entre la superficie y el dedo [15].

$$G = \begin{bmatrix} Ad_{g_o C_1}^T B_{c_1} & Ad_{g_o C_2}^T B_{c_2} & \dots & Ad_{g_o C_i}^T B_{c_i} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\therefore i = 1, 2, \dots, n$$

Tabla 2.

Tipos de contactos comunes.

Tipo de contacto. Imagen	Friction cone FC	Wrench basis (Matriz B)
Punto de contacto Sin fricción	$f_1 \geq 0$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Punto de contacto Con fricción	$\begin{aligned} \sqrt{f_1^2 + f_2^2} &\leq \mu f_3 \\ f_3 &\geq 0 \end{aligned}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Soft-finger	$\begin{aligned} \sqrt{f_1^2 + f_2^2} &\leq \mu f_3 \\ f_3 &\geq 0 \\ f_4 &\leq \gamma f_3 \end{aligned}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Por la morfología del dedo o sus grados de libertad, no es posible ejercer un torque sobre la superficie de contacto ni una fuerza a lo largo del eje z (Eje de rotación, Cinemática), así que se modifica la matriz de contacto con fricción que se muestra en la Tabla 2 y queda como se presenta en (22). Los vectores de fuerza que actúan sobre el objeto se muestran en la Fig. 5. La matriz B_{c_i} da la restricción en forma matemática que existe físicamente en el gripper, estas restricciones están dadas por la morfología propia del efecto final [15].

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \therefore B_{c_1} = B_{c_2} = B_{c_3} = B \quad (22)$$

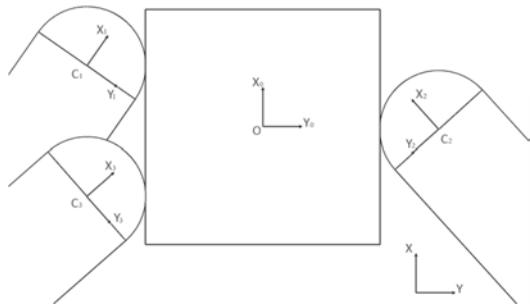


Figura 5. Agarre en un plano.

El mapa de agarre general (21) se muestra numéricamente en (23).

$$G = [G_1 | G_2 | G_3] \quad (23)$$

$$\therefore G_1 = G_3 = \begin{bmatrix} 0.5982 & 0.8014 \\ 0.8014 & -0.5982 \\ -16.0270 & 11.9639 \end{bmatrix}$$

$$\therefore G_2 = \begin{bmatrix} -0.5982 & -0.8014 \\ 0.8014 & -0.5982 \\ 16.0270 & -11.9639 \end{bmatrix}$$

Con la matriz G se puede saber la fuerza y torque a los que va a estar sometido el objeto a partir de los valores de fuerza generada por el contacto de los dedos o viceversa. Para determinar el efecto de las fuerzas de contacto en el objeto, se transforma las fuerzas al marco de coordenadas del objeto. Sea $({}^o_C p, {}^o_C R)$ la configuración de la estructura de contacto i en relación con el marco de objeto. Entonces, la fuerza ejercida por un único contacto se puede escribir en las coordenadas del objeto como se muestra en (24).

$$F_o = Ad_{g_o C_i}^T F_{c_i} = \begin{bmatrix} {}^o_C R & 0 \\ {}^o_C p {}^o R & 1 \end{bmatrix} B_{c_i} F_{c_i} \quad (24)$$

Para el caso se desea que la fuerza en x , y y el torque τ en z del sistema sea cero, por lo tanto se hallan los valores de fuerza requerido para cada dedo mediante (24) que para el caso del gripper implementado quedaría como se muestra en (25).

$$\begin{bmatrix} F_{x_1} \\ F_{y_1} \\ F_{x_2} \\ F_{y_2} \\ F_{x_3} \\ F_{y_3} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} F_{x_1} \\ F_{y_1} \\ F_{x_2} \\ F_{y_2} \\ F_{x_3} \\ F_{y_3} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Numéricamente (25) se muestra en (26):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5982 & 0.8014 & -0.5982 & -0.8014 & 0.5982 & 0.8014 \\ 0.8014 & -0.5982 & 0.8014 & -0.5982 & 0.8014 & -0.5982 \\ -16.0270 & 11.9639 & 16.0270 & -11.9639 & -16.0270 & 11.9639 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_1} \\ F_{y_1} \\ F_{x_2} \\ F_{y_2} \\ F_{x_3} \\ F_{y_3} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Para resolver el sistema de ecuaciones (26) es necesario definir 3 ecuaciones más, para lo cual hay necesidad de considerar el peso del objeto mg y el producto del coeficiente de fricción μ con la fuerza perpendicular que ejerce cada dedo sobre la superficie del objeto y de esta forma se garantiza que no se deslice el objeto y a su vez se contrarresta la fuerza que ejerce la gravedad sobre el objeto, esto se presenta en (27).

$$mg + \mu \vec{F}_{x_1} + \mu \vec{F}_{x_2} + \mu \vec{F}_{x_3} = 0 \quad (27)$$

Para garantizar que las fuerzas que ejerce el dedo 1 y 3 sean iguales se debe satisfacer a (28) y (29) de esta manera se evitan rotaciones en el eje z, es decir:

$$\vec{F}_{x_1} = \vec{F}_{x_3} \quad (28)$$

$$\vec{F}_{y_1} = \vec{F}_{y_3} \quad (29)$$

Para el caso de (27) se toma un μ de 0.58 ya que el contacto es de metal-metal [15,21].

Al solucionar el sistema de ecuaciones el vector de fuerzas \vec{F} se muestra en (30), las unidades de estos valores están en $N \cdot m$:

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0.0084 \\ 0.0169 \\ 0.0084 \\ 0.0113 \\ 0.0226 \\ 0.0113 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0.0092 \\ 0.0155 \\ 0.0092 \\ 0.0322 \\ 0.0650 \\ 0.0322 \end{bmatrix} \quad (31)$$

El diagrama de fuerzas se muestra en la Fig. 6.

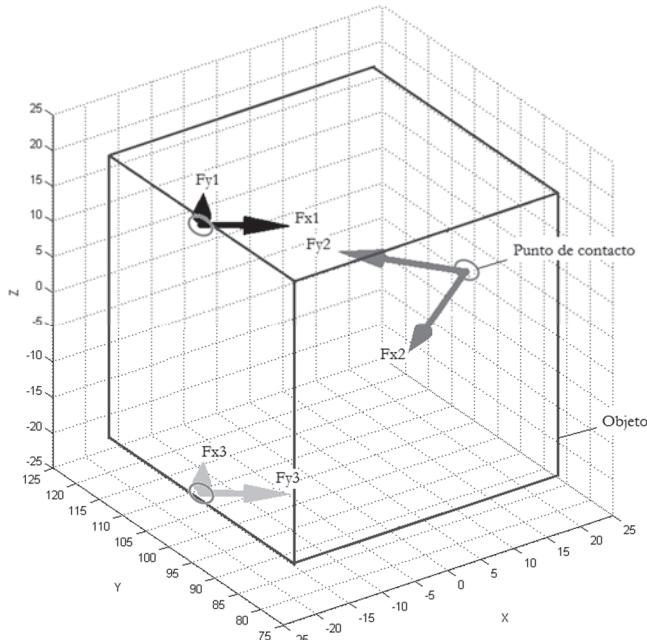


Figura 6. Vectores de fuerza aplicadas sobre el objeto.

3. Optimización multi-objetivo para el agarre

Con la matemática anteriormente presentada se realiza el cálculo de fuerzas para dos casos en los que las posiciones de los dedos son aleatorias. A partir de estas posiciones se calculan las fuerzas necesarias, la solución gráfica y

numérica se presentan en las Fig. 7, 8 y en (31), (32) respectivamente. En las figuras se tiene en la parte izquierda la vista superior del objeto y en la parte derecha la vista frontal con los vectores de fuerza que ejercen los dedos sobre el objeto. Se observa que la magnitud de los vectores del dedo 2 es mayor, ya que este tiene que contrarrestar la fuerza de los dedos 1 y 3. Así mismo se observa que la magnitud de los vectores aumenta a medida que la posición de los dedos se aleja de la palma.

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0.0058 \\ 0.0221 \\ 0.0058 \\ 0.0159 \\ 0.0251 \\ 0.0159 \end{bmatrix} \quad (32)$$

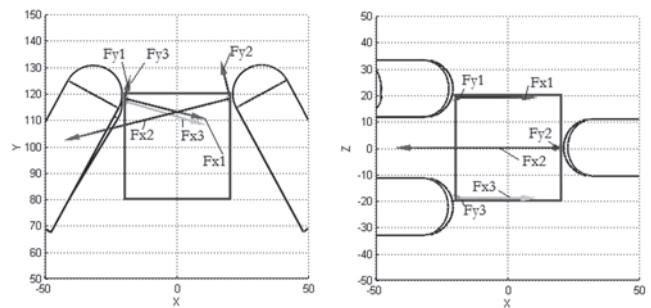


Figura 7. Vectores de fuerza sobre el objeto caso 1.

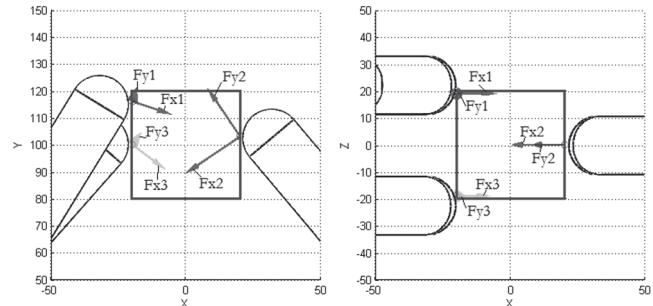


Figura 8. Vectores de fuerza sobre el objeto caso 2.

En los puntos de contacto, los vectores de fuerza mostrados en las Fig. 7, 8 garantizan que el objeto no presente deslizamiento ni desplazamientos lineales o rotacionales, más no se realizan con el mínimo de fuerza por parte de cada uno de los dedos. Para hallar una posición con el mínimo de fuerza de todas las posibilidades de apresión se utiliza el algoritmo de optimización NSGA [27-29]. El algoritmo NSGA II se utilizó como solución al problema propuesto, dada su eficiencia (bajo costo computacional) y eficacia (Precisión de las soluciones) a la hora de calcular un frente de Pareto gracias a su comportamiento Elitista (ranking por capas) y el cálculo del crowding distance [28, 29], como operador utilizado para mantener la diversidad de la población, lo cual mejora considerablemente la distribución de las soluciones dentro del frente de Pareto calculado. El algoritmo NSGA II ya se ha usado para problemas similares obteniendo excelentes resultados como

se muestran en [30] comparado con otros algoritmos.

Se generaron aleatoriamente puntos de agarre y a estos se les denominaran individuos de una población para el algoritmo NSGA, este se encargará de buscar cual a los mejores de acuerdo a las funciones a minimizar.

La optimización multi-objetivo puede ser definida como el problema de encontrar un vector de variables de decisión que satisfacen restricciones y optimiza un vector de funciones cuyos elementos representan las funciones objetivo. Estas definiciones aparecen en los trabajos de Coello y Deb [22-24]. Para el problema de fuerza que se pretende resolver se desea encontrar un vector de decisión que se muestra en (33):

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (33)$$

con $x_i \in R^n$, el cual deberá satisfacer las w restricciones de desigualdad (34)

$$g_i(\vec{x}) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, w \quad (34)$$

y optimizar el vector de funciones (35)

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_b(\vec{x})]^T \quad (35)$$

que generalmente cumple con $\vec{f}(\vec{x}) \in R^b$. El conjunto de todas las soluciones que satisfacen a (34) es conocido como codominio de soluciones factibles, y se representa como Ω , y en forma general $\Omega \subset R^n$.

El correspondiente conjunto imagen Ω_o se define en (36).

$$\Omega_o = \{\vec{f}(\vec{x}) \in R^b \mid \vec{x} \in \Omega\} \quad (36)$$

Definición 1: Dominancia de Pareto, sean dos soluciones $u, v \in \Omega$. Se dice que u domina a v (denotado como $u \succ v$) si es mejor o igual que v en cada uno de los objetivos y estrictamente mejor en al menos un objetivo. Como ejemplo, en un contexto de minimización $u \succ v$ si y solo si se cumple (37):

$$\begin{aligned} f_i(u) &\leq f_i(v) \forall i \\ &\in [1, 2, \dots, b] \wedge \exists j \in [1, 2, \dots, b] \mid f_j(u) < f_j(v) \end{aligned} \quad (37)$$

Definición 2: Soluciones no comparables, dados $u, v \in \Omega$, si $u \not\succ v$ ni $v \not\succ u$, se dice que son soluciones no comparables, lo que se denota como $u \sim v$.

Definición 3: Conjunto de Pareto, el conjunto de todas las soluciones \vec{x} no dominadas en Ω se denomina Conjunto Pareto, lo que se denota como CP . Las soluciones \vec{x} que pertenecen a CP se denotarán como x^* .

Definición 4: Frente de Pareto, la imagen del Conjunto Pareto a través de la función \vec{f} se denomina Frente Pareto, denotado por Y [24].

Para el funcionamiento del algoritmo se ingresaron los siguientes parámetros:

- Vector de variables de decisión:

x_1 = Posiciones del dedo 1 en x, y y z

x_2 = Posiciones del dedo 2 en x, y y z

x_3 = Posiciones del dedo 3 en x, y y z

- Vector de funciones a optimizar, minimización:

f_1 = Suma de las magnitudes de las fuerzas \vec{F}_1 y \vec{F}_3

f_2 = Magnitud de la fuerza \vec{F}_2

- Tamaño de la población: 32

- Número de generaciones: 30

- Porción de la población a reemplazar: 0.9

Los resultados obtenidos por el algoritmo NSGA, se presentan en la Fig. 9 y 10. La Fig. 9 muestra los 32 individuos de la primera generación y la Fig. 10 muestra el mejor individuo en la última generación. En este caso el frente de Pareto está dado por una sola solución o un solo individuo, y este individuo indica la mejor posición de contacto de los dedos con el objeto y a su vez un agarre con el mínimo de fuerza.

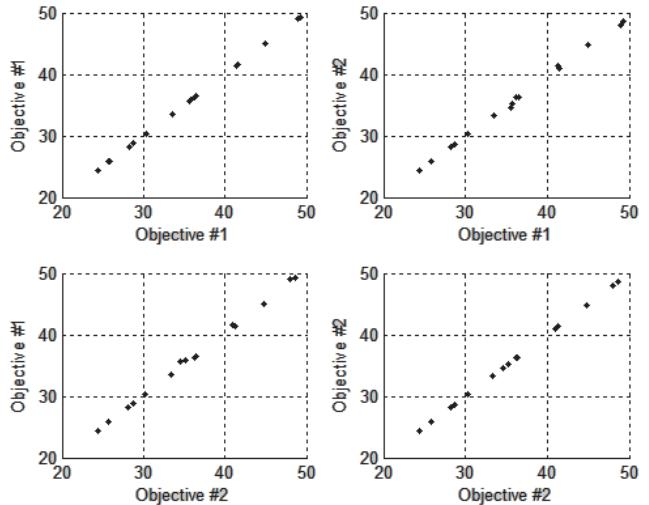


Figura 9. Algoritmo NSGA. Algoritmo con 32 individuos a evaluar.

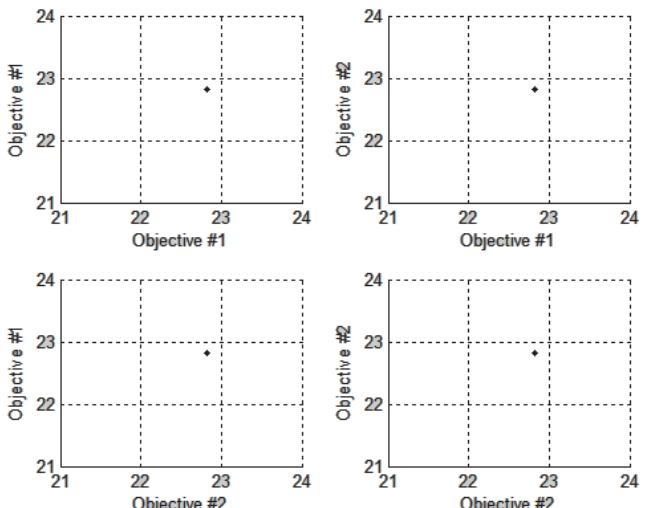


Figura 10. Algoritmo NSGA. Algoritmo con el mejor individuo.

Las magnitudes de fuerza de las funciones minimizadas se muestran en (38) y (39):

$$f_1 = 0.0114 + 0.0114 N.m \quad (38)$$

$$f_2 = 0.0228 N.m \quad (39)$$

Y de acuerdo a los valores de fuerza, el vector de variables de decisión es:

x_1 = Posiciones del dedo 1 en $x = -20mm$,

$y = 86mm$ y $z = 19mm$

x_2 = Posiciones del dedo 2 en $x = 20mm$,

$y = 86mm$ y $z = 0$

x_3 = Posiciones del dedo 3 en $x = -20mm$,

$y = 86mm$ y $z = -19mm$

A partir de estas posiciones se grafican los vectores de fuerza, garantizando el mínimo de fuerza y cierre de fuerza. De estos resultados se observa en la Fig. 11, que la posición es la más cercana a la palma con los dedos enfrentados para evitar la rotación del objeto.

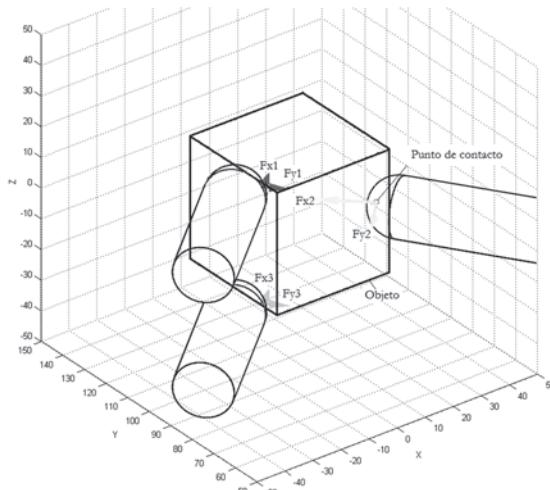


Figura 11. La mejor posición de agarre según el algoritmo de optimización NSGA.

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} 0.0084 \\ 0.0076 \\ 0.0168 \\ 0.0153 \\ 0.0084 \\ 0.0076 \end{bmatrix} \quad (38)$$

4. Conclusiones

El uso de la teoría Screw hizo más fácil el desarrollo matemático y tiempos de ejecución computacional ya que se utiliza el álgebra lineal para la solución.

El algoritmo NSGA mostró grandes ventajas en cuanto a tiempo computacional para la detección del mejor punto de agarre garantizando el mínimo de fuerza, el tiempo de ejecución es alrededor de 2 minutos comparado con un algoritmo combinatorio puede durar hasta 5 horas. El tiempo de ejecución del NSGA depende de los parámetros ingresados, que para el caso se utilizaron tres variables de análisis (fuerza de cada dedo), dos funciones a minimizar ($f_1 + f_3$ y f_2), 32 individuos como población, 30 generaciones y un 90 % de proporción de la población a reemplazar.

Como desarrollo a futuro se utilizaran objetos de forma irregular garantizando la posición de agarre con el mínimo de fuerza. Se profundizará en el cálculo de fuerza de un ensamble y determinando los centros de masa de acuerdo al material y a la geometría. En próximas etapas del proyecto se variara la posición del gripper ya que como posible aplicación, se ensamblará a un brazo robótico.

Referencias

- [1] BBC MUNDO Tecnología, Manos robóticas que sienten lo que tocan. Disponible: http://www.bbc.co.uk/mundo/noticias/2012/06/120620_tecnologia_manos_roboticas_tacto_aa.shtml. [citado 10 de Junio de 2012].
- [2] ROBOTNIK, Manos robóticas. Disponible: <http://www.robotnik.es/es/productos/manos-roboticas>. [citado 18 de septiembre de 2013].
- [3] Baturone, A.O., Robótica. Manipuladores y robots móviles, Marcombo. 2001.
- [4] Salazar, M., Cim-manufactura integrada por computadora, Disponible: <http://msalazar-ingeniero.blogspot.com/> [citado 3 de Julio de 2009].
- [5] Curtis, N. and Xiao, J., Efficient and effective grasping of novel objects through learning and adapting a knowledge base, IEEE - RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2252-2257, 2008.
- [6] Cutkosky, M.R. and Howe, R.D., Human Grasp Choice and Robotic Grasp Analysis, En: ST Venkataraman, T. Iberall, , Dextrous Robot Hands, Springer-Verlag, Chapter 1, pp. 5-31, 1990.
- [7] SHADOW ROBOT COMPANY. Shadow Dexterous Hand Technical Specification, Disponible: http://www.shadowrobot.com/wp-content/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E1_201301.pdf [citado 1 Enero de 2013].
- [8] PRENSILIA. EH1Milano series- Anthropomorphic Human sized hand. Disponible: <http://www.prensilia.com/files/support/doc/DS-EH1-v01.pdf> [citado 19 de Julio de 2010].
- [9] ELUMOTION. ELU-2 Hand. Disponible: <http://www.elumotion.com/Elu2-hand.htm>. [citado 28 de mayo de 2013].
- [10] Keymeulen Assad, D. C., "Investigation of the Harada Robot Hand For Space", Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Dr., Pasadena, CA 91109.
- [11] Bibby, J. and Ryan. National aeronautics and space administration. Hands. Disponible: <http://robonaut.jsc.nasa.gov/R1/sub/hands.asp>. [citado 28 de mayo de 2013].
- [12] Baca, S. D., Manipulación cooperativa robot-robot y humano-robot. Aplicación a sistemas flexibles de desensamblado automático. [PhD thesis], Universidad de Alicante, 2007.
- [13] Shimizu, S., Shimojo, M., Sato, S., Seki, Y., Takahashi, A. Inukai, Y. and Yoshioka, M., The relation between human grip types and force distribution pattern in grasping, IEEE, pp. 286-291, 1996.
- [14] Wu, S.-C. and Hor, M.-K., On the properties of 3d equilibrium grasper forces, IEEE, pp. 3101-3106, 1996.
- [15] Murray, R. M., Li, Z. and Sastry, S. S., A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. 1994.
- [16] Li, S. K. T. Y. F. and Meng, Q., Grasping force measurement for dynamic grasp stability assessment, IEEE, pp. 1294-1299, 1998.
- [17] MADRID. B. Artedinamico, 2009, <http://www.artedinamicocomic.com/php/tutorialesver.php?tutoriales=9>. Medellín – Colombia. [citado jueves, 16 de mayo de 2013].
- [18] Jiménez, V. P., Niño, P. A. and Sánchez, O. F. A., Control Híbrido

- Fuerza-Posición para un manipulador de 2 GDL. Editorial académica española, España, 2013.
- [19] Reyes, F., Robótica, Control de Robots Manipuladores. Alfaomega, Cap. 4, 2011.
- [20] Craig, J. J., Robótica. Prentice Hall, pp. 69-92, 2006.
- [21] David, R., LIDE, CRC Handbook of Chemistry and Physics. National Institute of Standards and Technology. 2003
- [22] Coello, An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques, state of the art and future trends, IEEE, 3–13, 1999.
- [23] Coello, A. C., Lamont, G. B. and Veldhuizen, D. A. V., Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. 2 ed., 2007.
- [24] Deb, K., Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization in engineering design, EURO-GEN 99, 1999.
- [25] Coronel, J. M. P., Santacruz, H. D. M., Rfos, C. G. L. and Cegla, B. B., Algoritmos de optimización multi-objetivos basados en colonias de hormigas, Latin-American Conference on Informatics (CLEI), 10, 2006.
- [26] Stramigioli, S. and Bruyninckx, H., Geometry and Screw Theory for Robotics Stefano. IEEE ICRA 200!. Marzo 15, 2001
- [27] Rodriguez, J., Quiroga, J. E. y Ortiz, N. R., Comparación del desempeño entre un algoritmo clásico de optimización por enjambre de partículas y un algoritmo genético en el diseño de celdas de manufactura, DYNA, 2013.
- [28] MAULEDOUX, M. AND SHKODYREV, V. Multiobjective Evolutionary Algorithm MOEA to Solve Task Allocation Problems in Multi Agents Systems, IEEE Xplore and indexed by both EI (Compendex) and ISI Proceeding (ISTP), Vol. 5, 2010. Mauleoudoux, M. and Shkodyrev, V., Multiobjective Evolutionary Algorithm MOEA an Approach for Solving MAS Multiattribute Allocation Task, IEEE Xplore and indexed by both EI (Compendex) and ISI Proceeding (ISTP), Vol 1, 2010.
- [29] Correa, C., Bolaños, R. and Molina, A., Algoritmo multiobjetivo NSGA-II aplicado al problema de la mochila. Scientia et Technica Año XIV, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.

The measurement of maintenance function efficiency through financial KPIs

La medición de la eficiencia de la función mantenimiento a través de KPIs financieros

Diego Galar ^a, Luis Berges ^b, M^a Pilar Lambán ^c & Bernardo Tormos ^d

^a PhD., Profesor Titular, University of Technology, Luleå, Suecia; diego.galar@ltu.se

^b PhD., Profesor Titular, Universidad de Zaragoza, España, bergesl@unizar.es

^c PhD., Profesor Colaborador, Universidad de Zaragoza, España, plamban@unizar.es

^d PhD., Profesor Titular, Universidad Politécnica de Valencia, España, betormos@mot.upv.es

Received: August 14th, 2013. Received in revised form: October 7th, 2013. Accepted: October 22th, 2013

Abstract

The measurement of the performance in the maintenance function has produced large sets of indicators that due to their nature and disparity in criteria and objectives have been grouped in different subsets lately, emphasizing the set of financial indicators. To generate these indicators properly is necessary to have accurate input data. Hence in this paper we propose a comprehensive model of consensus between the different stakeholders involved in the maintenance function. This will bring about the accurate determination of the maintenance costs of an organization.

Keywords: KPI, maintenance, indicator, cost model, effectiveness, efficiency.

Resumen

La medición del rendimiento en la función mantenimiento ha dado lugar a grandes baterías de indicadores que por su extensión y disparidad en criterios y objetivos han sido agrupados en diferentes bloques en los últimos tiempos, destacando el conjunto de indicadores financieros. Para generar éstos indicadores de manera adecuada es necesario disponer de datos de entrada precisos. De ahí que en este trabajo se propone un modelo global consensuado entre los diferentes grupos de interés implicados de la función mantenimiento. Con ello se conseguirá la determinación precisa de los costes de mantenimiento de una organización.

Palabras Clave: KPI, mantenimiento, indicador, modelo de costes, eficiencia, eficacia.

1. Introducción

Los indicadores de rendimiento de mantenimiento se sustentan en tres pilares, a saber: los parámetros RAMS (Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad y Seguridad), el modelo de costes y el factor humano, [1]. Se debe configurar un modelo de costes de mantenimiento consensuado entre los diferentes stakeholders de la función mantenimiento como base necesaria para componer el corpus de los indicadores financieros, que a su vez constituyen un grupo relevante en el conjunto general de indicadores de rendimiento de una empresa.

Las medidas financieras se suelen considerar la capa superior en la jerarquía del sistema de medición por ser usadas habitualmente por la alta dirección. Estos índices demuestran la capacidad de la organización para lograr un buen retorno de sus activos y para crear valor. La métrica de este nivel se utiliza para la planificación estratégica, de ahí que constituye el pilar de la organización. Este nivel de

medición puede ser utilizado también para comparar el rendimiento de los diferentes departamentos y divisiones dentro de la organización matriz. Algunos autores como en [2] proponen el valor actual neto (VAN) para su uso en mantenimiento como uno de estos indicadores financieros, otros como [3] propugnan el uso de indicadores tales como: la variación porcentual de las ventas, retorno sobre activos, rendimiento de las ventas, el cambio porcentual en el total de activos y el cambio porcentual en el número de empleados.

La incorporación de indicadores financieros a los cuadros de mando de mantenimiento supone para [4] la búsqueda en la unicidad de criterios y tendencias entre mantenimiento y la estrategia corporativa. De igual modo en [5] se expone la necesidad de una integración y correlación de forma armónica de los indicadores de rendimiento financiero de la organización, que trata de la visión estratégica con los referentes a la eficiencia del área de mantenimiento.

En [6] se analiza dentro de las cuatro perspectivas de los KPIs en mantenimiento la perspectiva financiera, para la autora todo sistema de planificación debe mostrar la historia de la estrategia y el posicionamiento de la corporación indicado por los objetivos financieros, vinculándolos luego a la secuencia de acciones que deben realizarse con los clientes, proceso internos y finalmente con los propios empleados. Esta perspectiva está centrada en el rendimiento del capital, el valor añadido a la organización y la reducción de costes unitarios en el caso de empresas de servicios. En el caso de mantenimiento, es allí donde se monitorizan los costes de cada actividad y el indicador de incidencia de costes de mantenimiento por unidad de producción y costes de mantenimiento sobre el valor de los activos, indicadores de posicionamiento utilizados a nivel mundial actualmente. La incorporación de todos estos indicadores exige un modelo de costes consensuado, principal preocupación para realizar un adecuado Benchmarking de estos índices. La necesidad de comparación y búsqueda de puntos de referencia en el cálculo de los KPIs exige una paridad en el cálculo de los mismos, siendo la mayor parte de las veces cociente de dos costes y por tanto atribuibles directamente al modelo financiero implantado.

Esta imposibilidad y falta de consenso en los modelos de costes y por tanto la disparidad de los índices calculados se manifiesta en la existencia de tan solo dos índices de clase mundial, es decir de consenso general, relativos a las finanzas en el ámbito del mantenimiento indicados por [7]:

- Coste de Mantenimiento por Facturación: Relación entre el coste total de mantenimiento y la facturación de la empresa en el periodo considerado.
- Coste de Mantenimiento por el Valor de Reposición: Relación entre el coste total acumulado en el mantenimiento de un determinado equipo y el valor de compra de ese mismo equipo nuevo (valor de reposición).

Incluso los índices de clase mundial requieren un parámetro que no por mucho nombrarlo es simple, esto es, el coste de mantenimiento. El modo de cálculo de este coste exige un consenso absoluto en pro de una adecuada comparación de ulteriores KPIs basados en él. El modelo de costes, por tanto, no se convierte en un fin en sí mismo, sino en un medio para en base a él y mediante los datos que resulten de su aplicación, poder extraer aquellos indicadores de carácter financiero que permitan a los diferentes niveles jerárquicos de la organización valorar de forma cuantitativa la eficiencia de la función mantenimiento en su vertiente monetaria. El objeto que se persigue es la descripción de un modelo claro y sencillo basado en una recogida de datos realista y en un procesado posterior de esos datos para la confección de los indicadores de mantenimiento y en particular de los financieros.

El modelo deberá diferenciar y seleccionar aquellos costes considerados "hard" o "soft" en función del indicador a generar y de la complejidad de la recolección de los mismos. Los "hard" representan aspectos fácilmente medibles y de los que se puede extraer la información necesaria para el procesado requerido, representando los

"soft" un intangible de más compleja medición, [8]. Indicadores "soft" como el coste de no haber realizado determinada acción formativa, o la no disponibilidad de un equipo de monitorizado por condición (CBM) que hubiera detectado un patrón anómalo de estado, son atractivos pero difícilmente mensurables en la recogida de datos tradicional y habrá que buscar aquellos costes "hard" de más fácil explotación y que aporten la información requerida.

2. Los objetivos económicos de la función mantenimiento

La función mantenimiento tiene por misión la conservación de los equipos de la empresa en buen estado de funcionamiento al coste más razonable posible, es decir la tan ansiada eficiencia con la eficacia fijada. Es menester analizar esto desde dos puntos de vista concernientes a los equipos y máquinas:

- El de la Dirección cuando se dispone a decidir la instalación de un nuevo equipo. El criterio de decisión será entonces el del coste total del equipo por unidad de producción, o sea la relación del coste total del equipo, incluyendo su adquisición y mantenimiento, respecto a la cantidad producida en toda la vida útil del mismo.
- El de los responsables de producción y mantenimiento, o sea de los responsables de la gestión del equipo. En este caso, el equipo existe, y sus gastos de posesión son un dato fijo así como el programa de producción. Entonces el criterio de decisión será el coste total de mantenimiento que se compondrá de la pérdida de beneficio que experimentará la empresa como consecuencia del incumplimiento del programa de producción ocasionado por las detenciones del equipo (coste de fallo) y del coste de las operaciones de mantenimiento, que a su vez comprende tres elementos: El coste de funcionamiento de las unidades de la empresa encargadas de las operaciones de reparación (personal de todas categorías, herramientas y equipos), el coste de las piezas y de recambio consumidos además de sus gastos de adquisición y almacenaje (repuestos más costes financieros) y el coste de operaciones subcontratadas con especialidades exteriores.

2.1 El coste global de Mantenimiento

Se define el coste global de mantenimiento como el valor que recoge el resultado económico de la gestión total del mantenimiento de una empresa. Una máquina, instalación, sección, planta o fábrica, que tenga un elevado coste, significa que su gestión de mantenimiento no es buena. Por el contrario, si el coste es bajo, se está ante una buena gestión de mantenimiento siempre y cuando estas premisas presupongan la consecución de la eficacia demandada por la planta.

El Coste Global recoge de forma integral todas las facetas del mantenimiento tanto en beneficios como pérdidas en una empresa. La siguiente Figura 1 ilustra cada uno de los componentes, representando un esquema completo del coste global con los conceptos anteriormente

definidos.

Uno de los objetivos principales de este artículo es la propuesta de un modelo para calcularlo. Lamban en [9] propone un modelo de costes que consiste en una generalización de una estructura de descomposición por niveles más conocida como Work Breakdown Structure (WBS) para ser aplicado en los diferentes procesos de todas las áreas de la Cadena de Suministro, aunque en este trabajo se muestra el modelo planteado en el proceso de mantenimiento. Este modelo comparte con otros modelos la premisa de querer reflejar el proceso y sus actividades en los

costes, análogo a un análisis ABC se analizan las actividades asociadas al proceso de estudio, y siguiendo el modelo de costes basado en procesos, se refleja el proceso con todos sus factores en una expresión en la que se cuantifican sus costes. Este estudio se convertirá en la herramienta para generar los indicadores financieros por la capacidad de recolección de parámetros "hard". A continuación se indican los diferentes bloques de costes a considerar para el cálculo del coste.

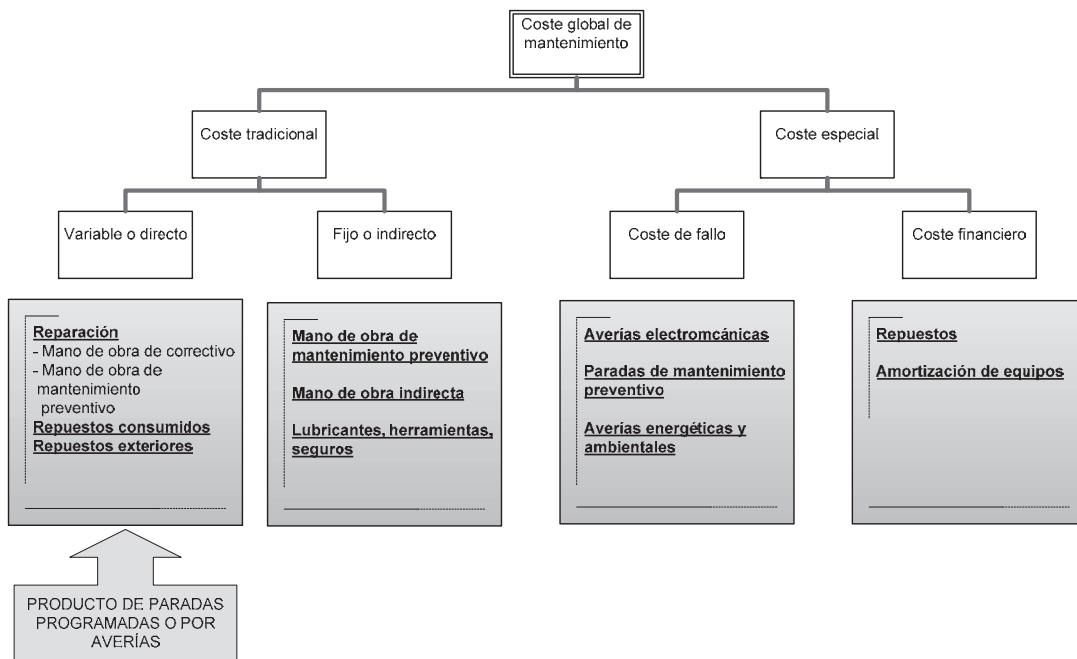


Figura. 1. Desglose del Coste global en sus diferentes conceptos.

3. Cálculo del coste global de mantenimiento

Según AFNOR [10] el coste global de mantenimiento C_g es la suma de cuatro componentes:

- Costes de intervenciones (C_i);
- Costes de fallos (C_f);
- Coste de almacenamiento (C_a);
- Coste de sobre-inversiones (C_{si}).

$$C_g = C_i + C_f + C_a + C_{si} \quad (1)$$

Este coste global puede ser calculado para una máquina concreta, grupo de máquinas o plantas enteras pero políticas como RCM que racionalizan la observancia y aplicación del mantenimiento recomiendan que se realice en aquellos equipos que más afectan al coste dada su criticidad o importe.

3.1. Coste de intervención

El coste de intervención (C_i) incluye los gastos relacionados con el mantenimiento preventivo y correctivo. No incluye costes de inversión, ni aquellos relacionados directamente con la producción: ajustes de parámetros de producción, limpieza, etc.

El coste de intervención puede ser descompuesto en:

- Mano de obra interna o externa,
 - Repuestos en almacén o comprados para una intervención;
 - Material fungible requerido para la intervención;
- Es importante otorgar un valor realista a los dos

componentes del coste de intervención C_i : Por un lado los costes de intervención por unidad de tiempo c_i (\$/hora), y por otro el total de horas-hombre pues ambos influyen directamente en el coste global de mantenimiento, la función objetivo a minimizar.

3.2. Coste de fallos

Estos costes corresponden a las pérdidas de margen de explotación debidas a un problema de mantenimiento que haya producido una reducción en la tasa de producción de productos en buen estado. La pérdida de este margen, puede incluir aumento de los costes de explotación o una pérdida de negocios.

Entre las causas que ocasionan problemas de mantenimiento en este trabajo se destacan:

- Mantenimiento preventivo mal definido;
- Mantenimiento preventivo mal ejecutado;
- Mantenimiento correctivo efectuado en plazos muy largos, mal ejecutado, realizado con repuestos malos o de baja calidad.

Es importante recalcar que el coste de fallo de los equipos corresponde a las pérdidas de margen de explotación cuya causa es un defecto que provoca bajas de producción de calidad aceptable.

El coste de fallo puede ser calculado con la siguiente fórmula:

$$C_f = \text{ingresos no percibidos} + \text{gastos extras de producción} - \text{materia prima no utilizada}$$

Las componentes de este coste son:

- Ingresos no percibidos: Este factor dependerá de la posibilidad de recuperar la producción en horarios diversos, fines de semana etc.... En caso de ser una producción continua, evidentemente no hay posibilidad de recuperación, por lo que la producción de ese segmento temporal y los ingresos asociados a ella hay que imputarlos en este apartado.
- Gastos extra de producción: En caso de que se pueda recuperar parte de la producción en franjas temporales tendrá unos costes adicionales que básicamente son los siguientes:
 - La energía necesaria para la producción;
 - Las materias primas;
 - Los fungibles;
 - Los gastos de servicios tales como calidad, compras, mantenimiento, etc.
- Materia prima no utilizada: Será un factor que en caso de no ser posible recuperar la producción, se deberá restar al coste de fallo, pues por lo menos no se ha incurrido en el consumo de esa materia prima (a no ser que sea producto perecedero que haya que tirar caso de no procesar) que si se consumirá si se recupera el plan productivo, quizás con algún sobrecoste de almacenamiento, transporte o degradación de materias primas.

El modelo más usado en la estimación del cálculo de coste de fallo cuando hay activos productivos que asumen total o parcialmente las tareas del activo en mantenimiento es el método definido por [11].

3.3. Coste de almacenamiento

Los inventarios han representado históricamente cerca de un tercio de los activos de una empresa típica, según afirman en [12] y más recientemente en [13], extendiendo esta praxis a todo tipo de negocio, sea industria o servicio parece ser que es un patrón altamente repetido. De hecho el modelo de costes más extendido y validado es que en mantenimiento, el 70% del presupuesto es mano de obra y el 30% son repuestos. El coste de almacenamiento representa los costes incurridos en financiar y manipular el inventario de piezas de recambio e insumos necesarios para la función mantenimiento.

3.4. Coste de sobre-inversiones

Al diseñar la planta, lo correcto es tomar la decisión de equipos que minimicen el coste global de mantenimiento durante su ciclo de vida. Ello implica en general, que se compren equipos cuyas inversiones iniciales son mayores que las de otros que cumplen los mismos requerimientos, pero cuyos costes de intervención y almacenamiento asociados se estiman menores. A fin de incluir la sobreinversión, se amortiza la diferencia sobre la vida del equipo. Así es posible castigar en el coste global las inversiones extras requeridas para disminuir los demás componentes del coste.

De igual modo la aplicación indiscriminada de costosas tecnologías y metodologías como monitorización de parámetros de estado no necesarios reflejando una inadecuada gestión de mantenimiento, pueden considerar sobreinversiones y gravan enormemente el presupuesto de mantenimiento. En definitiva entrarían en esta categoría todas aquellas inversiones realizadas sobre los activos de las que no se obtenga el retorno esperado.

3.5. Costes evitados: El componente desconocido

Uno de los problemas más frecuentes al modelar financieramente un sistema de mantenimiento radica en que los costes primigenios se han visto modificados varias veces en sucesivas aplicaciones de metodologías o tecnologías que buscaban la reducción del coste global en base a lo que se conoce como costes evitados.

En la implantación indiscriminada de políticas de reducción de costes se ven afectados tres de los cuatro parámetros que constituyen el coste global:

- Costes de intervenciones (C_i): Normalmente estos se reducen en frecuencia y en volumen pues la mayor parte de las tecnologías predictivas consiguen una menor agresividad en las averías con una reducción del correctivo y un aumento del preventivo.
- Costes de fallos (C_f): Reducidos en determinadas políticas predictivas en los que se sustituyen grandes reparaciones por pequeñas inspecciones que suelen ser además sin detener el proceso.
- Coste de inversiones sobredimensionadas (C_{si}): Son quizás los más sensiblemente aumentados por costosos

equipos y planes de inspección que raramente se usan o subcontratas de elevadas tasas con dudoso valor añadido.

En la ecuación siguiente se puede ver reflejado el impacto de los costes evitados (C_{av}), con la doble dimensión de los mismos cuando son asociados a una inversión en una tecnología o metodología concreta. Es decir, se reducirá con la aplicación de la técnica elegida el coste de intervención en un porcentaje (C_{av_i}), del mismo modo que el de fallo (C_{av_f}), y aumentará el coste de sobreinversión como consecuencia de las técnicas que se implanten o adquieran (C_{av_si}) y que no sean de interés para la compañía y por tanto no redunden en un retorno de inversión para la misma.

$$\begin{aligned} C_g &= C_i + C_f + C_a + C_{si} - C_{av} \\ C_g &= (C_i - C_{av_i}) + (C_f - C_{av_f}) + C_a + (C_{si} + C_{av_si}) \end{aligned} \quad (2)$$

4. Modelo de costes propuesto

El modelo propuesto para obtener el coste total de mantenimiento es un full costing, con la diferenciación entre costes directos e indirectos. Conviene desglosar el coste global con sus cuatro componentes en los elementos constitutivos del full costing.

$$C_g = C_i + C_f + C_a + C_{si} \quad (3)$$

De los componentes anteriores, se puede deducir que los tres últimos corresponden inexorablemente a costes directos, siendo el coste de fallo sin duda alguna el de mayor relevancia a la par que el de más difícil cuantificación.

El coste de almacén es un coste directo de la función de mantenimiento, pues la elección de retener volúmenes elevados de caros repuestos implica un coste sobre las reparaciones y de hecho afectará más directamente al centro de coste objeto de los mayores acopios. Por último, el coste de sobreinversión es una elección directa sobre el equipo, una elección de invertir más en un equipo que en otro, con la esperanza de que así los costes de fallo se reducirán más drásticamente que el incremento que supone esa inversión extra.

Queda por lo tanto como único elemento que aglutina parte de costes directos e indirectos el coste de intervención absorbiendo por una parte la parte visible de la intervención y por otra los gastos indirectos soportados por la función de mantenimiento e imputados en su ratio de unidades monetarias por hora de intervención.

$$\begin{aligned} C_g &= C_{Directos} + C_{Indirectos} \\ &= C_i + C_f + C_a + C_{si} \\ &= C_{i_Directos} + C_{i_indirectos} + C_f + C_a + C_{si} \end{aligned} \quad (4)$$

Los costes de intervención indirectos corresponderán a:

$$C_{i_indirectos} = c_{i_indirectos} T \quad (5)$$

Siendo T el número de horas hombre requeridas para la intervención y $c_{i_indirectos}$ el coeficiente de unidades monetarias por hora imputadas de costes indirectos a mantenimiento.

$$c_{i,t} = \frac{\text{Costes indirectos imputados mantenimiento}}{\text{Horas totales de intervención}} \quad (6)$$

Este valor evidentemente debe ser fijado y negociado previamente al inicio del ejercicio, para que no ocasione un gravamen excesivo, pues en plantas productivas normales el factor de más relevancia es con mucha diferencia el coste de fallo y unos costes indirectos muy altos aumentaría la ineficiencia del sistema.

Por tanto y siguiendo con el modelo de [14] se tiene:

$$\begin{aligned} C_g &= C_{Directos} + C_{Indirectos} \\ &= C_{Mat} + C_{Op_proc} + C_{Op_ext} \\ &\quad + C_{Moi} + C_{Gest_proc} + C_{Gen} \end{aligned} \quad (7)$$

Que desglosados resultan en los siguientes componentes identificados

$$\begin{aligned} C_{Directos} &= C_{Mat} + C_{Op_proc} + C_{Op_ext} \\ C_{Indirectos} &= C_{Moi} + C_{Gest_proc} + C_{Gen} \end{aligned} \quad (8)$$

Siendo para el coste global:

$C_{Op_proc} = C_{fallo}$ es decir se imputarán los costes operacionales del propio proceso de mantenimiento, los originados por la ausencia de capacidad productiva, siendo estos los más relevantes habitualmente y cuyo cálculo ha sido ampliamente debatido pero pocos modelos tan sólidos y consolidados en la industria y los servicios como el mostrado en [11].

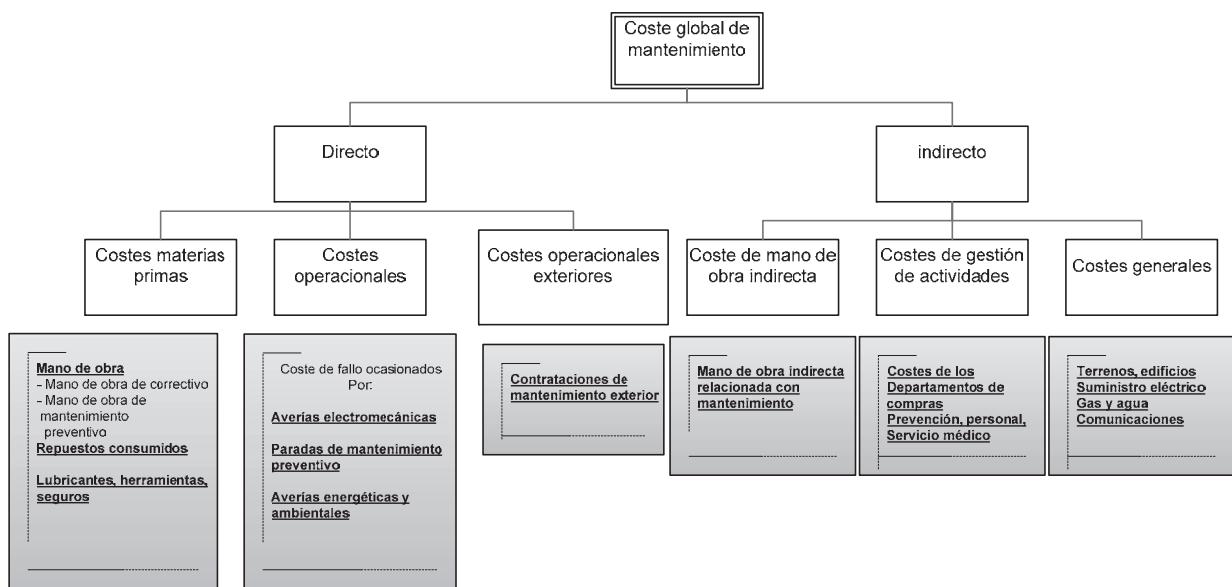


Figura. 2. Costes de mantenimiento según el modelo de Lambán et al. [14].

$$C_{Mat} = C_{si} + C_a + C_{intervención_directos}$$

Es junto con el coste de fallo el parámetro más cuantioso e incluye los aspectos de recursos necesarios para la intervención siendo el más requerido mano de obra (en torno al 70% del coste) y repuestos (en torno al 30%), las inversiones extra realizadas en el equipo y los repuestos acumulados serían materia prima imputable en este apartado por ser recursos físicos adquiridos con el único y directo propósito de reducir los impactos del fallo en ese equipo concreto.

C_{Op_ext} corresponde a los overhauls externalizados, inspecciones de predictivo o ensayos no destructivos son algunos de los costes imputados normalmente en este apartado.

$C_{Indirectos}$ constituye una pequeña parte del coste de intervención en tanto por hora hombre empleada compuesto por coste de mano de obra indirecta (C_{Moi}), gestión del proceso (C_{Gest_proc}) y costes generales (C_{Gen}).

El modelo de costes y el cuadro de mando integral

El modelo de costes mostrado está orientado a sustentar la rápida generación de los indicadores financieros. Pero éstos no son los únicos destinados a la medición del rendimiento de la función mantenimiento, sumándose a esta labor indicadores relacionados con las personas, con los parámetros RAMS etc, por lo que el conjunto ha crecido sensiblemente y se ha impuesto su jerarquización y clasificación según diferentes tipos de ordenaciones.

La más extendida es la que adopta el Balanced Scorecard-BSC de [15]. Adaptaciones del BSC a mantenimiento, como la de [16], promueven la perspectiva financiera entre las cuatro existentes como aquella donde el modelo de costes juega un papel fundamental.

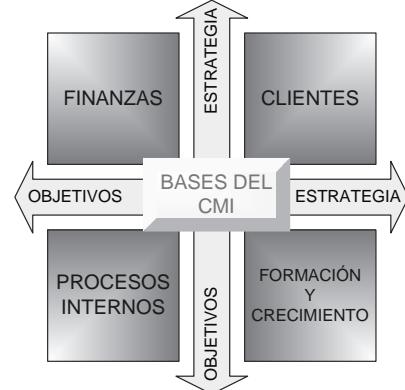


Figura. 3. Interrelación entre objetivos estratégicos y perspectivas del Cuadro de Mando Integral (CMI)

La perspectiva financiera ha sido la que tradicionalmente desarrollaba los cuadros de mando utilizados hasta ahora para la supervisión de la empresa al más alto nivel. Se encuentran ya definidos suficientes índices económicos, de rentabilidad, solvencia y liquidez, que pueden ser aplicados a todo tipo de empresas. Será necesario tener en cuenta, sin embargo, dos aspectos fundamentales de la cuestión. El primero de ellos se refiere a la correcta adecuación de los indicadores a la unidad de negocio de que se trate, y el segundo a la fase en que se encuentre la entidad, dentro del ciclo de vida de la empresa y de sus activos productivos. Se pretende, a veces, aplicar el mismo tipo de métrica financiera a las distintas unidades de negocio, como puede ocurrir al señalar para todas ellas un determinado nivel de rentabilidad sobre el capital invertido o pretender que rindan uniformemente el mismo porcentaje de valor añadido, sin contar con que se les puede haber asignado estrategias diferentes.

5.1. El equilibrio entre costes y disponibilidad

La perspectiva financiera se basa en dos objetivos principales en la función mantenimiento, que se unen para conseguir el equilibrio entre la eficacia demandada y la eficiencia conseguida a tal fin. Ese equilibrio se define a través de la consecución de las siguientes metas, como se puede observar en la figura 4: Mejorar la disponibilidad y los costes asociados.

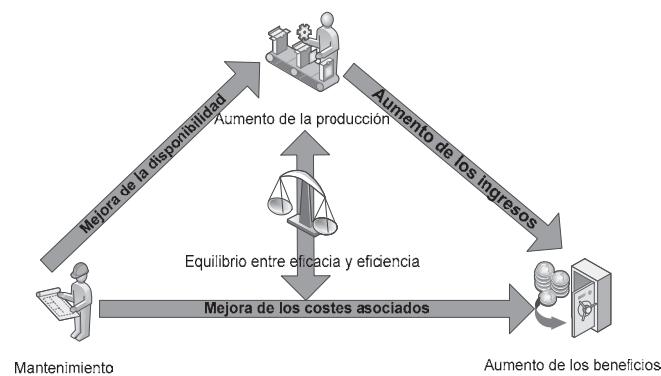


Figura. 4. Equilibrio entre eficacia y eficiencia en la perspectiva financiera

Este artículo se centra en mostrar los indicadores que deben ser observados cuando el objetivo perseguido en la empresa es la mejora de los costes asociados al mantenimiento, es decir las métricas asociadas a la eficiencia de la función mantenimiento. El objetivo es buscar con el menor coste posible el nivel de disponibilidad necesaria. Este índice ha de ser observado en una tendencia temporal. Así, para un periodo i será la siguiente función objetivo:

$$\frac{\text{Costes de mantenimiento}}{\text{Disponibilidad requerida por operaciones}} \quad (9)$$

En definitiva se va a intentar reducir lo que cuesta de mantenimiento cada hora de disponibilidad conseguida condicionado a que sea la demandada según la planificación establecida.

5.2. La necesidad del consenso en los costes de mantenimiento

El modelo de costes y la tradición de ellos en la función mantenimiento ponen de manifiesto lo intangible y oculto de la mayoría de los costes imputables a este departamento, por lo que surgen diferentes interpretaciones de los mismos y se consideran de manera completamente distinta en entornos manufactureros muy similares. Es por ello que la jefatura de mantenimiento debe conocer las reglas de juego, es decir cómo se van a analizar sus costes, bajo qué parámetros, qué se le va a imputar y sobre todo tener control de cambio sobre aquellas cosas que van a ser de su responsabilidad y por las que se le va a juzgar. Los siguientes indicadores marcan la relación de los costes de mantenimiento respecto al producto final manufacturado, a la disponibilidad conseguida o al valor de reemplazo de la

maquinaria. Son los grandes números corporativos que se usan en los niveles más altos para definir los grandes cambios en las políticas de manufactura y por extensión de manutención. Las cifras que debe manejar la alta dirección respecto a mantenimiento son reducidas, pero aportan la información relevante para la toma de decisiones. El presupuesto de mantenimiento respecto al valor de sustitución de los activos es un elemento indispensable en la decisión de renovación de equipos o incluso de deslocalización de plantas. De igual modo, las relaciones de mantenimiento respecto al producto manufacturado o al coste de esa manufactura, presentarán todos los escenarios en los cuales está presente mantenimiento.

$$\begin{aligned} IE1 &= \frac{\text{Costes totales de mantenimiento}}{\text{Valor de sustitución de los activos}} \\ IE3 &= \frac{\text{Costes totales de mantenimiento}}{\text{Cantidad producida}} \\ IE4 &= \frac{\text{Costes totales de mantenimiento}}{\text{Coste de transformación a la producción}} \end{aligned} \quad (10)$$

Para la directores de fábrica u operaciones, los ratios relevantes son los referentes a la disponibilidad respecto a la producción, de cara a cuantificar adecuadamente que cantidad puedo procesar en el tiempo de disponibilidad que mantenimiento consigue.

$$\begin{aligned} IE6 &= \frac{\text{Disponibilidad ligada a mantenimiento}}{\text{Cantidad producida}} \\ IE5 &= \frac{\text{Costes totales de mantenimiento}}{\text{Cantidad producida}} + \\ &+ \frac{\text{Costes de indisponibilidad ligados a mantenimiento}}{\text{Cantidad producida}} \end{aligned} \quad (11)$$

Es en este caso donde se pone de manifiesto la complejidad del coste de fallo siendo este la segunda parte del numerador de IE5- El modelo consensuado de costes se impone como necesidad para la adecuada generación de este indicador en pro de objetivos cuantificables.

Las partidas destinadas a los diferentes tipos de mantenimiento respecto al presupuesto total serán los datos que maneje el director de mantenimiento, en base a los cuales deberá tomar las decisiones de mover fondos de una partida a otra, buscando que esa nueva combinación aporte una mejora en la disponibilidad conseguida para el cliente.

$$\begin{aligned} IE15 &= \frac{\text{Coste del mantenimiento correctivo}}{\text{Costes totales de mantenimiento}} \\ IE16 &= \frac{\text{Coste del mantenimiento preventivo}}{\text{Costes totales de mantenimiento}} \end{aligned} \quad (12)$$

Los indicadores IE15 e IE16 propuestos en [17] son ejemplos de costes donde se precisa un modelo de costes para calcularlos. Es de destacar que en los costes contemplados por la norma se incluyen los indirectos pero se excluyen los derivados de la indisponibilidad en el sistema productivo no solo cuando sea por cambios de

utilaje o producto manufacturado etc. si no en todos los casos por lo que la norma apuesta claramente por unos costes *hard* huyendo de la difícil cuantificación de los costes de fallo que promueve una avería y la indisponibilidad subsiguiente.

A nivel de mantenimiento planificado, los indicadores propuestos por la norma son los enumerados a continuación, destacando todos por el carácter de costes de intervención que tienen con la parte correspondiente de costes indirectos pero pesando más la primera. Incluso el IE20 como indicador de las paradas programadas para mantenimiento no tiene en cuenta el lucro cesante producido por las mismas sino que cuantifica tan solo las intervenciones producidas en ese intervalo temporal.

$$\begin{aligned}
 IE17 &= \frac{\text{Coste del mantenimiento CBM}}{\text{Costes totales de mantenimiento}} \\
 IE18 &= \frac{\text{Coste del mantenimiento sistemático}}{\text{Costes totales de mantenimiento}} \\
 IE19 &= \frac{\text{Coste del mantenimiento de mejora}}{\text{Costes totales de mantenimiento}} \\
 IE20 &= \frac{\text{Coste de paradas programadas para mantenimiento}}{\text{Costes totales de mantenimiento}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

6. Discusiones y reflexiones

Los problemas de medición del rendimiento de mantenimiento son comunes y parecidos en todas las organizaciones. Definida la función de mantenimiento en una organización se pueden marcar objetivos en el cumplimiento de la misma y las medidas necesarias para ser constantemente evaluados y revisados. Estos objetivos van orientados a la mejora de la eficacia y/o eficiencia en un intento por reducir la inversión en mantenimiento asegurando la disponibilidad de la planta. Los indicadores relacionados con la eficiencia pueden ser económicos u organizacionales. Estos últimos tienden a ser difíciles de medir y de carácter subjetivo. El personal de finanzas tiende a concentrarse en los costes provocado por el uso de los recursos, mucho más fáciles de medir con el uso de sistemas GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador), programados para capturar este tipo de información. Por ello los costes de mantenimiento constituyen una métrica fundamental para evaluar la eficiencia de este departamento cuando se colecten según un procedimiento armonizado.

7. Conclusiones

En este trabajo se propone un modelo armonizado de costes de cara a identificar fácilmente sus componentes. De dicho desglose emanarán una serie de indicadores con los que será posible verificar si existe una mejora de la eficiencia del mantenimiento de una empresa. Esta mejora vendrá plasmada en la obtención de mayor disponibilidad siempre y cuando el cálculo de los presupuestos de mantenimiento sea acertado y no introduzca parámetros oscuros, de difícil cálculo o dudosa interpretación. Esta

armonización en el modelo, donde el coste de mantenimiento es omnipresente en los indicadores de desempeño, viene demandada por una creciente normativa cuya errónea interpretación puede dar lugar a comparaciones absurdas y planeamiento estratégico basado en malentendidos derivados de cálculos erróneos.

Referencias

- [1] Galar, D., Berges, L., Lambán, P. y Royo, J., La jerarquía de los KPIs de la función mantenimiento y el nuevo rol de los parámetros RAMS, XII Jornadas de Confiabilidad, Cádiz, 2010.
- [2] Vergara, E., Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del sistema de crudo diluido de petrozuata, Universidad Simón Bolívar Decanato de Estudios de Postgrado, 2007.
- [3] Hansson, J., Total Quality Management - Aspects of Implementation and Performance Investigations with a Focus on Small Organisations. [PhD Thesis]. Luleå, WA: Department of Business Administration and Social Science, Luleå University of Technology, 2003.
- [4] Hendricks, K. and Singhal, V., Does implementing an effective TQM program actually improve operating performance? Empirical evidence from firms that have won quality awards, Management Science, Vol. 43(9), pp. 1258-1274, 1997.
- [5] Coelo, C. y Brito, G., Proposta de modelo para controle de custos de manutenção com enfoque na aplicação de indicadores balanceados. Boletim Técnico Organização & Estratégia, 3 (2), pp. 137-157, 2007.
- [6] Cáceres, B., Cómo Incrementar la Competitividad del Negocio mediante Estrategias para Gerenciar el Mantenimiento. VI Congreso Panamericano de ingeniería de Mantenimiento, México, D.F, 2004.
- [7] Tabares, L., Administración Moderna del Mantenimiento, Río de Janeiro. NovoPolo Publicaciones, pp. 92-93, 1999.
- [8] Arbulu, T. and Vosberg, B., Feasibility Study and Cost Benefit Analysis of Thin-Client Computer System Implementation, Onboard United States Navy Ships, Naval postgraduate school Monterey, California, 2007.
- [9] Lambán, M. P., Determinación de costos de procesos de la Cadena de Suministro e influencia de factores productivos y logísticos [PhD Thesis]. Zaragoza, AR: Universidad de Zaragoza, 2010.
- [10] AFNOR. Recueil des normes françaises X 06, X 50, X 60, AFNOR, 1994.
- [11] Vorster, M.C. and De La Garza, J.M., Consequential equipment costs associated with lack of availability and downtime, Journal of Construction Engineering and Management-ASCE, 116(4), pp. 656-669, 1990.
- [12] Diaz, A. and Fu, M.C., Multi-Echelon Models for Repairable Items: A Review. College Park, MD: University of Maryland, Institute for Systems Research, 1995.
- [13] Galar, D., Métricas y auditorías de mantenimiento: Un modelo jerarquizado de Cuadro Integral. [PhD Thesis]. Zaragoza, AR: Universidad de Zaragoza, 2010
- [14] Lambán, M.P., Royo, J., Valencia, J., Berges, L. and Galar, D., Modelo para el cálculo del costo del almacenamiento de un producto: Caso de estudio en un entorno logístico, Revista DYNA Colombia, 179, pp. 23-32, 2013.
- [15] Kaplan, R. and Norton, D., The Balanced Scorecard: Translating Strategy Into Action. Harvard Business School Press, Boston, MA, 1996.
- [16] Galar, D., Berges, L. y Royo, J., Construcción de KPIs de mantenimiento en base a los parámetros RAMS: La necesidad de un cuadro de mando, II Jornadas internacionales de Asset Management, XI Jornadas de Confiabilidad, Valencia, 2009.

Theoretical and experimental analysis of structural joints of glued laminated pressed bamboo guadua for a housing project

Análisis teórico experimental de conexiones en elementos estructurales de bambú guadua laminado pegado prensado, para un proyecto de vivienda

Patricia Luna ^a, Ana Milena Olarte ^c & Caori Takeuchi ^d

^a MSc. Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, plunat@unal.edu.co

^c MSc. Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, amolartea@unal.edu.co

^d MSc. Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, ccptakeuchit@unal.edu.co

Received: March 12th, 2013. Received in revised form: September 17th, 2013. Accepted: October 10th, 2013

Abstract

The analysis of connections between elements of glued laminated pressed bamboo guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) for a housing project is presented in this article. The analysis was carried out in four stages: design, load test, numerical simulation and finite element modeling. Design connection was developed using the allowable stresses method. In load test, displacements were measured in order to identify the behavior of connections for different load increments. Numerical simulation was performed in the software ETABS® with the loads used in the load test in order to determine the displacements at points experimentally instrumented in the test; each stage of load of test was simulated. Finally, the finite element modeling was performed in the software ANSYS®. Differences between the experimental results and those obtained with the simulations were found, which could be result of the differences between real conditions of the load test and design considerations as behavior completely rigid or pinned of connections.

Keywords: Bamboo-guadua, laminated, joints, structure test, allowable stresses design.

Resumen

El análisis de las conexiones entre elementos fabricados en Bambú guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) laminado pegado prensado para un proyecto de vivienda, es mostrado en este artículo. El análisis se ejecutó en cuatro etapas: diseño, prueba de carga, simulación numérica y modelación por elementos finitos. El diseño se realizó por el método de los esfuerzos de trabajo. En la prueba de carga fueron medidos desplazamientos para conocer el comportamiento de las conexiones para diferentes incrementos de carga. La simulación numérica fue realizada en el programa ETABS® con la carga real impuesta en cada etapa de la prueba de carga. Finalmente, la modelación por elementos finitos se realizó en el programa ANSYS®. Se encontró que existen diferencias entre los resultados experimentales y los numéricos, las cuales pueden ser consecuencia de que las condiciones reales de la prueba de carga no corresponden exactamente a las consideraciones supuestas de diseño como nudos completamente rígidos o articulados.

Palabras Clave: Bambú-guadua, laminado, conexiones, prueba de carga, diseño por esfuerzos admisibles.

1. Introducción

En el sector de la construcción a nivel nacional e internacional, se ha venido fomentando la búsqueda de materiales renovables y sustentables que presenten un comportamiento estructural adecuado; en medio de esta búsqueda ha surgido el bambú guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) laminado pegado prensado (BGLPP).

Recientemente, se desarrollaron dos proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, que tenían como objetivo, entre otros, estudiar el comportamiento mecánico de este material; el primero “Validación tecnológica de los

laminados de guadua para la industria de la construcción”, desarrollado por la Universidad de Los Andes (Colombia), dentro del cual se pueden destacar investigaciones sobre el tipo y cantidad de adhesivo con el que se obtiene un mejor comportamiento mecánico del material [1], la determinación de propiedades físicas y mecánicas [2], así como el comportamiento de elementos estructurales [3] y conexiones [4]. El segundo, “Diseño y Construcción de vivienda con elementos estructurales en guadua laminada pegada prensada” desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, en el cual pueden resaltarse los trabajos realizados para establecer la influencia del adhesivo en el comportamiento mecánico del material [5], y otros



encaminados a determinar el comportamiento de elementos estructurales como vigas [6], columnas [7], paneles y tableros de piso [8] y pórticos [9], con el objetivo de diseñar arquitectónicamente y estructuralmente un prototipo de vivienda.

El segundo proyecto, es el punto de partida de esta investigación, ya que al buscar un diseño estructural completamente funcional, las uniones entre los diferentes elementos deben diseñarse para que trabajen adecuadamente ante las solicitudes a las que estarán expuestas durante la vida útil de la estructura. Así, una vez dimensionados todos los elementos estructurales del sistema de resistencia sísmica del prototipo de vivienda, se procedió al diseño de sus conexiones, con las mismas cargas y restricciones de diseño impuestas en la etapa de dimensionamiento de secciones.

El diseño de las conexiones, se llevó a cabo siguiendo los lineamientos del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino [10] en lo correspondiente al número y ubicación de los pernos conectores, y en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 [11] para lo concerniente al dimensionamiento de las platinas de acero, por ser el reglamento vigente al comienzo de la investigación. Posteriormente, se realizó una prueba de carga para evaluar el comportamiento real de algunas de las conexiones diseñadas.

Adicionalmente, con el objetivo de encontrar el estado límite de algunas de las conexiones diseñadas, se realizaron modelaciones por elementos finitos.

2. Metodología

De acuerdo con los lineamientos establecidos en el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, el diseño de las conexiones se realizó por el método de los esfuerzos de trabajo.

2.1. Clasificación del material

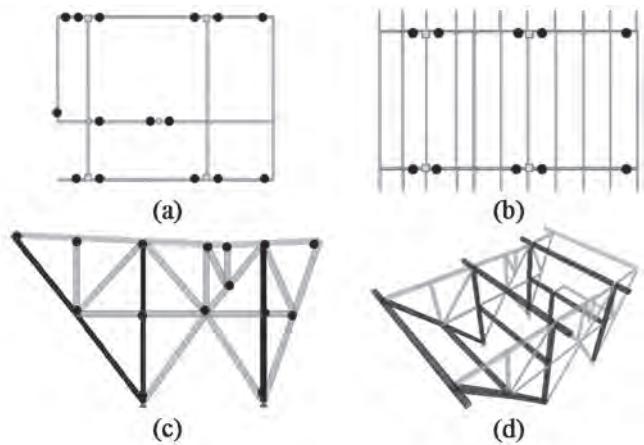
Teniendo en cuenta que el bambú guadua laminado pegado prensado no hace parte de los materiales normalizados por los códigos usados en la presente investigación, se trabajó como una madera estructural tipo B, normalizada por la NSR-98, teniendo en cuenta los esfuerzos admisibles determinados experimentalmente en investigaciones previas para corte paralelo y compresión perpendicular [5], flexión longitudinal [6], compresión paralela [7].

2.2. Evaluación de solicitudes

La Figura 1 presenta la distribución de los elementos estructurales que conforman el prototipo de vivienda; los elementos resaltados en la Figura 1 (c) y (d) corresponden a los pórticos principales con conexiones viga – columna resistentes a momento. Las demás conexiones, resaltadas con puntos, corresponden a conexiones articuladas (no resistentes a momento).

A partir de los resultados obtenidos en la simulación numérica realizada para el dimensionamiento de los

elementos estructurales, se determinaron las solicitudes actuantes en cada elemento.



(a): planta de entrepiso, (b): planta de cubierta, (c): fachada lateral, (d): vista 3D

Figura 1. Prototipo de vivienda modelado

2.3. Diseño de las conexiones

La metodología usada para el diseño de los dos tipos de conexiones estudiadas, resistentes a momento o no, es similar, existiendo diferencia únicamente en las solicitudes actuantes en la conexión.

El procedimiento general inicia con la identificación de las dimensiones de la sección transversal de los elementos a conectar, de las solicitudes actuantes y su orientación, y la selección del diámetro de pernos a usar. Con base en esta información es determinada la carga admisible para cada una de las secciones a unir, haciendo uso de la tabla 12.7 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino. Debido a que la tabla mencionada solo contiene valores de cargas admisibles para elementos con espesores menores o iguales a 10 cm, y a que, en algunos casos, los espesores de los elementos a conectar superan este valor, fue necesario realizar una extrapolación lineal a partir de los valores iniciales.

En función de la carga admisible determinada para cada conexión, se define el número de pernos necesarios, espaciamiento entre los mismos, distancias al borde y con ello las dimensiones de las platinas metálicas, teniendo en cuenta los factores de reducción de resistencia por efecto de grupo.

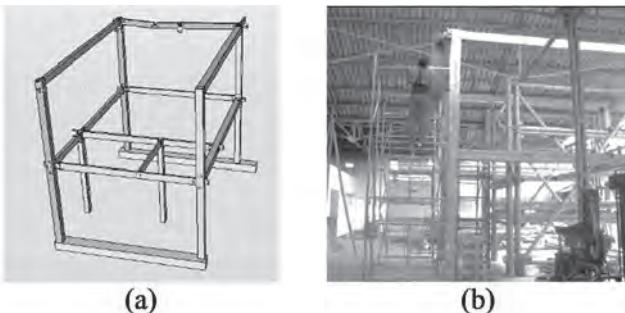
Una vez dimensionada la platina, se procede a su diseño bajo la misma metodología usada para el dimensionamiento de la conexión, verificando los parámetros de resistencia, aplastamiento y bloque cortante de acuerdo con los lineamientos establecidos en la NSR-98.

2.4. Montaje y prueba de carga

Con el objetivo de evaluar el comportamiento real de algunas de las conexiones diseñadas, fue realizada una prueba de carga vertical, para los elementos estructurales que conforman el módulo central del prototipo de vivienda, mostrados en la Figura 2.

Para la colocación de la carga fueron dispuestos culmos de guadua apoyados sobre algunas vigas del entrepiso, simulando el sistema de viguetería; las vigas corresponden a las vigas de carga establecidas en el diseño estructural.

La carga vertical fue aplicada al colocar vigas de concreto y sacos de arena en tres etapas, obteniendo una carga final de 179 kgf/m², aproximándose de esta manera a la carga viva para la cual fueron diseñados los elementos estructurales (180 kgf/cm²).



(a): módulo central ensayado, (b): montaje módulo central
Figura 2. Montaje de la prueba de carga

Para la determinación del comportamiento estructural real de algunas conexiones, fueron medidos los desplazamientos en el centro de la luz de las vigas y en puntos de unión viga – columna, con ayuda de seis (6) comparadores de carátula (sensibilidad 0.01 cm) posicionados como se muestra en la Figura 3, en donde los sentidos de las flechas indican el sentido del desplazamiento medido por cada uno; las conexiones 1 y 2, instrumentadas con los conjuntos de comparadores de carátula 3-4 y 2-5-6, corresponden a conexiones resistentes a momento; la conexión 3 corresponde a una conexión no resistente a momento.

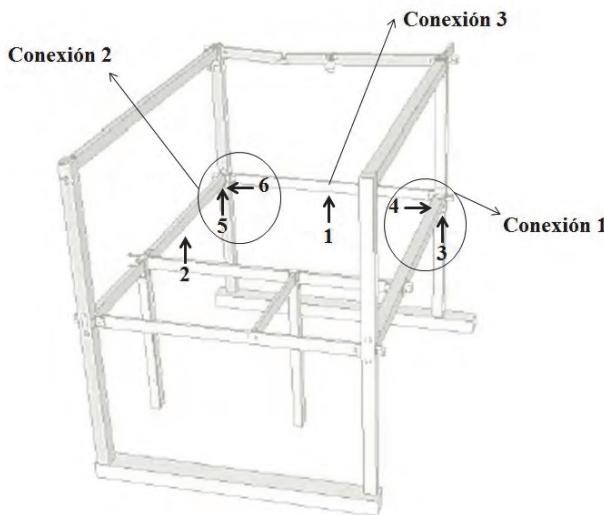


Figura 3. Instrumentación para medición de desplazamientos

2.5. Simulación numérica de la prueba de carga

Los desplazamientos registrados en la prueba de carga fueron comparados con desplazamientos obtenidos a través

de una simulación numérica en el programa ETABS® del módulo del prototipo de vivienda ensayado. En el programa fue simulada la carga real impuesta siguiendo las mismas etapas de la prueba, determinando para cada una los desplazamientos en los puntos instrumentados experimentalmente.

2.6. Simulación en elementos finitos de conexiones

Adicionalmente, fue realizada una simulación en elementos finitos usando el programa ANSYS® para encontrar los estados límites o carga máxima soportada por las conexiones instrumentadas, que se alcanza cuando la platina metálica entra en fluencia (utilizando el criterio de Von Mises) o cuando se supera el valor de esfuerzo admisible para el BGLPP en dirección perpendicular a las fibras; la Tabla 1 muestra los valores máximos soportados por los dos materiales. Además, esta simulación también fue usada para determinar los desplazamientos teóricos, con la imposición del valor de carga alcanzado en la prueba de carga.

Tabla 1. Estado límite de los materiales simulados

MATERIAL	ESTADO LÍMITE (kgf/m ²)
Platina metálica	2,549,250
BGLPP	1,352,122

En la Figura 4, se observa la discretización de elementos finitos realizada a una de las conexiones modeladas (resistente a momento). Las propiedades asignadas a los materiales corresponden a valores del módulo de elasticidad longitudinal (E) y al coeficiente de Poisson (μ), que para el caso del BGLPP fueron de $E = 2.04 \times 10^9$ kgf/m² y $\mu = 0.20$, y para el acero (platinas y pernos) de $E = 2.04 \times 10^{10}$ kgf /m², $\mu = 0.30$; los valores asignados para el BGLPP corresponden a los mismos usados en el diseño estructural.

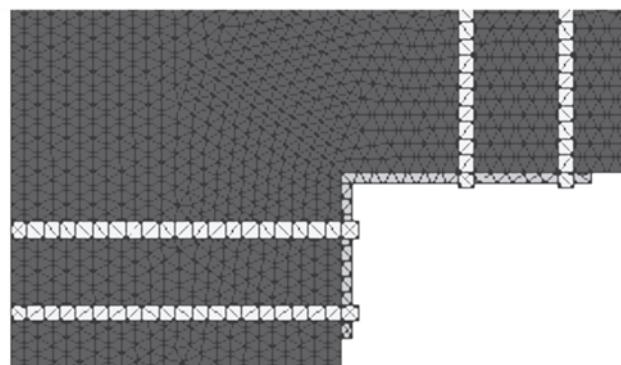


Figura 4. Discretización usada para la conexión resistente a momento 1

3. Resultados

3.1. Desplazamientos

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para el desplazamiento vertical, es decir para la viga, medido experimentalmente con la prueba de carga (Δv_{PC}), usando simulación numérica (Δv_{SN}) y por elementos finitos (Δv_{EF}) para las conexiones instrumentadas.

Tabla 2.

Desplazamientos verticales conexiones instrumentadas

CONEXIÓN	Δ_{vPC} (cm)	Δ_{vSN} (cm)	Δ_{vEF} (cm)
1	0.023	0.072	0.053
2	0.214	0.500	0.303
3	0.175	1.289	0.625

De forma similar, la Tabla 3 presenta los resultados obtenidos para el desplazamiento horizontal, es decir para la columna, medido experimentalmente con la prueba de carga (Δ_{hPC}), usando simulación numérica (Δ_{hSN}) y por elementos finitos (Δ_{hEF}) para las conexiones instrumentadas. Debido a que la conexión 3 no es resistente a momento, no fueron determinados desplazamientos horizontales.

Tabla 3.

Desplazamientos horizontales conexiones instrumentadas

CONEXIÓN	Δ_{hPC} (cm)	Δ_{hSN} (cm)	Δ_{hEF} (cm)
1	0.001	0.180	0.107
2	0.096	0.598	0.391

En el caso del desplazamiento vertical (Tabla 2), se observa que para la conexión 1 se obtienen resultados del mismo orden de magnitud al comparar los obtenidos en la prueba de carga y la simulación numérica; este mismo comportamiento se observa en la conexión 2. Al comparar los desplazamientos verticales para la conexión 3, se observó que los obtenidos experimentalmente son del mismo orden de magnitud a los determinados con la modelación por elementos finitos, y son muy inferiores cuando se comparan con los arrojados por la simulación numérica.

En el caso del desplazamiento horizontal (Tabla 3), se observa que el resultado experimental para la conexión 1 es inferior cuando se compara con los valores obtenidos en la simulación numérica, debido a que al momento de la prueba de carga el comparador de carátula asignado a este elemento arrojó siempre la misma lectura; los desplazamientos arrojados por la simulación numérica son del mismo orden de magnitud. Al comparar los desplazamientos horizontales para la conexión 3, se observa que los obtenidos experimentalmente son inferiores a los de la simulación numérica.

Comparando los resultados de desplazamiento vertical y horizontal para las conexiones resistentes a momento 1 y 2, se observa que en ninguno de los casos (experimental o simulación numérica) los valores para viga y columna son iguales. Los resultados obtenidos con la prueba de carga muestran que aun cuando durante la etapa de diseño se asuma la conexión completamente rígida, constructivamente no es posible garantizar esta condición debido a que las perforaciones tanto en las platinas como en los elementos de BGLPP son de un diámetro mayor a las de los pernos utilizados (diámetro perforación = diámetro perno + 1.59 mm) o debido a efectos de acomodamiento del material.

3.1. Estado límite de las conexiones

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos a partir de la simulación por elementos finitos para los estados límite

de cada conexión, en donde w corresponde a la carga para la que se obtiene la falla, σ_{BGLPP} corresponde al esfuerzo en dirección perpendicular a la fibra para el BGLPP obtenido para la carga w , σ_{PL} al esfuerzo de la platina para la carga w y CV a la carga viva por metro cuadrado que debe ser aplicada para generar la falla de la conexión.

Tabla 4.

Estado límite para las conexiones instrumentadas

CONEXIÓN	w (kgf)	σ_{BGLPP} (kgf/m ²)	σ_{PL} (kgf/m ²)	CV (kgf/m ²)
1	1,555	571,032	2,549,250	423
2	2,675	438,471	2,549,250	729
3	21,569	234,531	2,549,250	1,152

En los tres casos se observa que se alcanza primero el estado límite de la platina metálica, debido a que su sección es muy pequeña en comparación con las secciones de BGLPP que conectan, generándose así grandes concentraciones de esfuerzos. Igualmente para los tres casos, la carga para la cual se alcanza el estado límite de la conexión supera la carga viva de diseño.

4. Conclusiones

Se realizó el diseño de todas las conexiones de los elementos de bambú guadua laminado pegado prensado que conforman la estructura de la vivienda, encontrando que éstas son funcionales, tal como lo demostró la prueba de carga y las modelaciones numéricas que lo respaldaron.

Se puede considerar el procedimiento de diseño como adecuado, ya que las conexiones se comportaron apropiadamente durante la prueba de carga, sin presentar fallas. Sin embargo cabe resaltar que estas no se sometieron a cargas dinámicas como las producidas por un sismo, pero sí fueron una consideración del diseño de las conexiones.

Se encontraron diferencias en algunos casos entre los resultados experimentales y los obtenidos con las simulaciones numéricas, diferencias que pudieron deberse a las condiciones reales de la prueba de carga y de las consideraciones de diseño como empotramientos o articulaciones absolutas, cuando en la realidad esto no sucede. Adicionalmente se pudieron presentar otros procesos no considerados al inicio como acomodamiento del material o el efecto de las perforaciones en el comportamiento de la conexión.

Referencias

- [1] Correal, J. F. and Ramirez, F., Adhesive bond performance in glue line shear and bending for glued laminated guadua bamboo. *J. Tropical Forest Science*, 22, pp. 433-439, 2010.
- [2] Correal, J. F., Ramirez, F. and Gonzalez, S., Structural behavior of Glued Laminated Guadua Bamboo as construction material. *Memorias World Conference on Timber Engineering*, Italia, 2010.
- [3] Varela, S., Correal, J. and Ramírez, F., Preliminary study of sheathing-to-framing connections whit Glued Laminated Guadua Bamboo panels. *Memorias World Conference on Timber Engineering*, Italia, 2010.

- [4] Ramírez, F., Correal, J., Yamin, L., Atoche, J. and Piscal, C., Dowel-bearing strength behaviour of Glued Laminated Guadua Bamboo. *J. Materials in Civil Engineering*, 24, pp. 1378-1387, 2012.
- [5] Cortés, J., Lozano, J., Rusinque, M. and Takeuchi, C., Assessment of the influence of glue type in the mechanical behavior of glued laminated guadua (bamboo). *Memorias 12th International Conference on Non-Conventional materials and Technologies “Material & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems” IC-NOCMAT 2010*, Egipto, 2010.
- [6] Hackmayer, L., Rodriguez, N. and Takeuchi, C., Flexion behavior of solid section beams of glued laminated guadua. *Memorias 12th International Conference on Non-Conventional materials and Technologies “Material & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems” IC-NOCMAT 2010*, Egipto, 2010.
- [7] Alvarado, C., Moreno, I. and Takeuchi, C., Glued laminated guadua columns. *Memorias 12th International Conference on Non-Conventional materials and Technologies “Material & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems” IC-NOCMAT 2010*, Egipto, 2010.
- [8] Pinilla, J. and Takeuchi, C., The structural behaviour of laminated-guadua panels under parallel plane loads. *J. Ingeniería e Investigación*, 32, pp. 18-22, 2012.
- [9] Luna, P. and Takeuchi, C., Experimental analysis of frames made with glued laminated pressed bamboo guadua. *J. Key Engineering Materials*, 517, pp. 184-188, 2012.
- [10] JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. *Manual de diseño para maderas del grupo andino*, 1987.
- [11] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS). *NSR-98: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*, Bogotá, 1998.

Determination of the mechanical properties of anterior column units and functional spinal units of the L3-L4 lumbar porcine segment

Determinación de las propiedades mecánicas de unidades de columna anterior y unidades funcionales del segmento lumbar porcino L3-L4

Ricardo Gustavo Rodríguez-Cañizo ^a, Ariel Fuerte-Hernández ^b, Guillermo Uriolagoitia-Sosa ^c, Emmanuel Alejandro Merchán-Cruz ^d, Paola Andrea Niño-Suárez ^e & Alejandro González-Rebattu ^f

^a Doctor., Instituto Politécnico Nacional, México, rgrodriguez@ipn.mx

^b Maestro en Ingeniería de Manufactura, Instituto Politécnico Nacional, México, afuerteh0900@ipn.mx

^c PhD. en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, México, guirri@hotmail.com

^d PhD en Ingeniería de Sistemas y Control Automático, Instituto Politécnico Nacional, México, eamerchan@ipn.mx

^e Dra. en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, paola.nino.suarez@gmail.com

^f Médico Ortopedista y Cirujano de columna, Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado, alexrebattu@hotmail.com

Received: April 5th, 2013. Received in revised form: October 7th, 2013. Accepted: October 15th, 2013

Abstract

Porcine specimens have proven to be an excellent option for experimental studies of the spine, due to the anatomically and biomechanically similarities with that of the human; however, there are differences that should be taken into account when comparing both specimens. The objective of this study is to determine the stiffness coefficient of the L3-L4 lumbar porcine segment by means of axial compression tests performed on Anterior Column Units (ACU's) and Functional Spinal Units (FSU's), in order to compare the results obtained with the information found in the literature for the human case. The results showed that the FSU's support approximately 22% more load compared to ACU's, which approximates to the 18% found for the human case. It can be concluded that characteristics such as the vertebrae morphometry has a direct impact on the mechanical properties of the ACU's and the FSU's.

Keywords: Functional Spinal Unit, Anterior Column Unit, Axial Compression, Stiffness Coefficient.

Resumen

Los especímenes porcinos han demostrado ser una excelente opción para la experimentación de la columna vertebral, ya que tanto anatómica como biomecánicamente tienen similitudes con los humanos. No obstante, existen diferencias que deben ser tomadas en cuenta cuando se comparan ambos especímenes. El objetivo de este estudio es realizar pruebas de compresión axial a Unidades de Columna Anterior (UCA's) y a Unidades Funcionales (UF's) del segmento lumbar porcino L3-L4, para determinar el coeficiente de rigidez y comparar los resultados obtenidos con la información encontrada en la literatura para el caso humano. Los resultados mostraron que las UF's soportan aproximadamente un 22% más de carga en comparación con las UCA's, lo cual se aproxima al 18% encontrado para el caso humano. Se concluye por lo tanto, que principalmente características como la morfometría vertebral, influye de manera directa en las propiedades mecánicas de las UCA's y las UF's.

Palabras Clave: Unidad Funcional, Unidad de Columna Anterior, Compresión Axial, Coeficiente de Rigidez.

1. Introducción

En la actualidad no existen normas para la experimentación biomecánica de ningún tipo de especímenes, incluyendo los seres humanos. Sin embargo, se comienza a desarrollar una serie de normas de carácter no obligatorio, que se encuentran en la fase de piloto [1]. Esto es importante en la medida en que contribuyan a estandarizar los ensayos biomecánicos, con la finalidad de garantizar la repetibilidad y reproducibilidad de manera sistemática [2]. Dentro de los factores importantes a

considerar para lograr tal fin, se encuentra la metodología empleada, el tipo de máquina, la interfaz de fijación del espécimen, la morfometría del espécimen, el montaje final del espécimen sobre la máquina, la velocidad de carga y las condiciones generales inherentes al espécimen (conservación de los tejidos, temperatura, peso, humedad, etc.) [3].

Los modelos animales han sido de gran valor para la investigación biomédica a lo largo de la historia, de este modo se tienen, por ejemplo, roedores, primates, bovinos, ovinos, caninos, porcinos, entre otros, los cuales han contribuido a

solucionar diversos problemas relacionados con el ser humano [4-5]. Es importante que los modelos animales sujetos a investigación, sean seleccionados tomando en consideración aspectos científicos, que estén lo más apegado posible a las características que desean ser estudiadas para el caso humano, del mismo modo es necesario tomar en cuenta aspectos éticos relacionados con el manejo de estos [6]. A este respecto, los especímenes porcinos han demostrado ser una excelente alternativa en la investigación biomédica aplicada al ser humano, como los xenotrasplantes, el estudio del sistema coronario, etc. [7]. Otras consideraciones que facilitan el uso de especímenes porcinos, son la reducción en el riesgo de transmisión de enfermedades sanguíneas, la disponibilidad y el relativo bajo costo [8].

Para el caso de la columna vertebral, existen estudios en la literatura sobre anatomía comparada entre diferentes especies animales, así como entre estas y el ser humano [8-14]. Biomecánicamente la comparación de la arquitectura ósea trabecular entre cuadrúpedos y bípedos fue investigada por Smith (2002), se encontró mediante un estudio de densitometría que las trabéculas del cuerpo vertebral de cabra corren en dirección horizontal entre las placas terminales anterior y posterior, lo que indica que la carga principal dentro del cuerpo vertebral es de hecho una fuerza de compresión axial, tal como sucede en los cuerpos vertebrales humanos. Sin embargo, la densidad de las vértebras de la mayoría de los cuadrúpedos es mayor que la de las vértebras humanas, lo cual sugiere que los cuadrúpedos soportan esfuerzos de compresión más altos, por lo que estas observaciones se tienen que tomar en cuenta cuando se realicen analogías biomecánicas entre ambas especies [15]. Según la ley de Wolff, la arquitectura ósea está íntimamente relacionada con su función mecánica, y cuenta con un arreglo de forma tal, que soporta óptimamente las cargas fisiológicas a las que se ve sometida [16-18]. Estas consideraciones justifican biomecánicamente el uso de especímenes cuadrúpedos como los porcinos, para el desarrollo de pruebas de compresión axial en vértebras.

Una Unidad Funcional (UF) se define como el segmento comprendido entre dos vértebras adyacentes y su tejido blando, es la unidad funcional básica y más elemental de la columna vertebral. Está constituida por el disco intervertebral, con sus placas terminales, las articulaciones vertebrales posteriores, los ligamentos longitudinales anterior y posterior, y los ligamentos interarticulares, interespinoso y supraespinoso [19]. La Unidad de Columna Anterior (UCA) se define como el segmento comprendido por dos vértebras adyacentes unidas por una articulación (disco intervertebral) "vértebra-disco intervertebral-vértebra", pero desprovista de sus elementos posteriores (apófisis y ligamentos correspondientes) [1]. Es importante considerar el hecho de que las apófisis articulares humanas en posición erecta, soportan un 18% de las fuerzas de compresión, contribuyendo a disminuir la presión intradiscal [19], por lo que en las UCA's al estar desprovistas de dichas articulaciones, las cargas se distribuyen únicamente en el disco intervertebral, soportando mayor carga en esta zona, lo cual resulta en la

falla de la placa terminal bajo cargas menores.

Según Smith (2002), los cuadrúpedos no pueden soportar momentos de flexión significativos, por lo que fuerzas de tensión adicional de músculos y ligamentos son necesarias para mantener la estabilidad de la columna vertebral. Como consecuencia de esto la columna es cargada principalmente por compresión axial, justo como en los humanos [15].

Otro aspecto importante a considerar, es la comparación morfométrica entre vértebras de especímenes cuadrúpedos y bípedos [20-21]. El objetivo de un análisis morfométrico comparativo, es encontrar las relaciones entre la morfometría y las cargas de compresión axial, de UF's y UCA's en especímenes porcinos y humanos. Por lo que al respecto, Rodríguez et. al., (2010) publicó un trabajo sobre las relaciones morfométricas entre ambos especímenes, encontrándose que en general los cuerpos vertebrales humanos son más anchos y cortos que los porcinos, mientras que las vértebras lumbares aumentan de tamaño en dirección craneocaudal [22]. Mientras que Urrutia et. al., (2009) realizó un estudio morfométrico de una muestra de la población mexicana en vértebras lumbares, esto es muy importante ya que se pueden resolver problemas específicos para los mexicanos, por ejemplo, el diseño de prótesis e instrumentación quirúrgica, etc. [23].

Una clara evidencia de que la mayor parte de las cargas que soporta el cuerpo humano recaen sobre la columna lumbar, es el hecho de que las dimensiones morfométricas de los cuerpos vertebrales lumbares son mayores que en la zona torácica y cervical, lo que concuerda con lo dicho en la ley de Wolff, en cuanto que la estructura y tamaño del tejido óseo dependen de las cargas a las cuales esté sometido [17]. Por lo tanto, si las cargas son grandes, la densidad ósea aumenta de acuerdo con las direcciones de estas cargas, cambiando su forma y tamaño, tal como se observa en la columna lumbar humana, la cual aumenta de tamaño en dirección cráneo-caudal de L1 a L5 [22]. Partiendo de estos hechos, es evidente que un gran porcentaje de las lesiones ocurran en esta zona al estar sometidas a mayores cargas. Esta es la principal razón de enfocar la investigación en esta zona de la columna vertebral, ya que es aquí junto con la columna cervical en donde se presentan gran parte de los traumatismos y patologías, y en donde la instrumentación y las prótesis están más desarrolladas.

Por lo tanto, el objetivo es determinar las características mecánicas tanto de UF's como de UCA's en especímenes porcinos mediante ensayos de compresión axial, con el fin de establecer correlaciones y analogías existentes entre la columna lumbar humana y la porcina desde el punto de vista de la Ingeniería Mecánica.

2. Materiales y métodos

Biomecánicamente, las curvaturas de la columna vertebral son de gran importancia para una eficaz transmisión y distribución de las cargas a las que se ve sometida. Aunque la columna lumbar humana presenta una lordosis con 5 vértebras, y la porcina exhibe una cifosis que varía de 5 a 7 vértebras dependiendo de la raza [22], la distribución de las fuerzas en

los cuerpos vertebrales es similar en cuadrúpedos y bípedos [15]. Es importante que estas curvaturas estén presentes en los modelos animales utilizados para la experimentación, con el objetivo de establecer correlaciones mecánicas más certeras entre ambas especies.

Se eligieron especímenes porcinos de la raza Duroc-Jersey, la cual tiene 6 vértebras lumbares. Se analizaron las UF's y UCA's del segmento vertebral L3-L4, de cerdos machos jóvenes con un promedio de 6 meses de edad, un peso aproximado de 120 kg, y con no más de 48 h post mortem, con la finalidad de evitar así la descomposición de los tejidos y garantizar la integridad de sus propiedades mecánicas [24]. Debido a que en la literatura abierta la información respecto a las UCA's es escasa, se decidió realizar 20 pruebas, de las cuales debido a valores atípicos, solo se tomaron como válidos los resultados de 10 pruebas. Para el caso de las UF's, como la información disponible en la literatura es más amplia, se decidió realizar 10 pruebas. Cabe mencionar que, por las mismas razones anteriores (valores atípicos) solo se tomaron como válidas 4 pruebas.

En un estudio realizado por Van Dieën (2001), a 12 especímenes bovinos, se describe que el patrón de distribución de esfuerzos se encuentra justo detrás de las placas terminales, y se realizaron pruebas de compresión axial para cada espécimen con una fuerza de compresión sostenida del 50% de su resistencia a la compresión estimada. Los resultados obtenidos demuestran que la distribución de esfuerzos sobre las placas terminales es uniforme, mientras que en las fuerzas de compresión bajas, los valores máximos de los esfuerzos se concentran en el centro de las placas terminales. Por lo que plantea la hipótesis de que las fuerzas de compresión inducen fracturas en las placas terminales de las vértebras lumbares, lo que constituye un factor importante para la generación de dolores de espalda a la altura de la zona lumbar [25].

Por esta razón, las pruebas de compresión axial se realizaron bajo el criterio de falla de las placas terminales, es decir, tomando en consideración que el primer elemento de la UF que falla bajo este tipo de cargas, es la placa terminal, la cual se fisura generalmente por el centro, y el núcleo pulposo protruye en forma de hernia intraesponjosa [19].

Después de que el experimento se ha completado, las estadísticas ayudan a extraer la máxima cantidad de información útil a partir de los experimentos [26]. Por lo tanto, se realizó un análisis estadístico con la finalidad de eliminar los valores atípicos y no afectar los resultados finales.

2.1. Preparación de los especímenes de prueba

Los especímenes porcinos se obtuvieron de un rastro de la ciudad de México, cuidando las características mencionadas. El procedimiento general de corte y limpieza fue similar tanto para UF's como para UCA's, con la única diferencia de que en las UCA's se removieron los elementos posteriores (Figura 1).

El segmento L2-L6 (Figura 2a), fue cuidadosamente cortado y limpiado hasta dejar únicamente la Unidad Funcional L3-L4 (Figura 2b). El corte del segmento se realizó con una sierra eléctrica para hueso, cuidando el paralelismo de las caras.

La limpieza del segmento fue realizada por médicos ortopedistas del Hospital regional 1º de Octubre del ISSSTE con ayuda de instrumental quirúrgico.

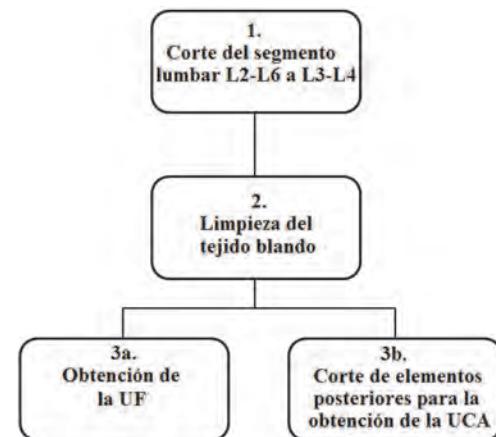


Figura 1. Procedimiento para preparación de especímenes.

Se retiraron los tejidos blandos (músculos, tendones, carne), conservando los ligamentos longitudinales anterior y posterior, interarticulares, interespinoso y supraespinoso para el caso de las UF's y los ligamentos longitudinales común anterior y posterior para las UCA's (Figura 2c).

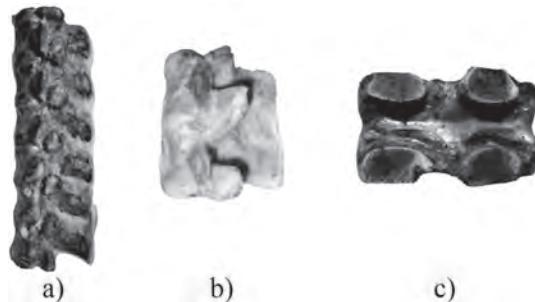


Figura 2. a) Segmento lumbar L2-L6. b) Unidad Funcional. c) Unidad de Columna Anterior.

2.2. Preparación del dispositivo de sujeción

El dispositivo de sujeción fue diseñado con la finalidad de transmitir de forma axial las cargas para las pruebas de compresión. Este dispositivo se acopla a una máquina universal marca INSTRON, sin embargo, está equipado con un adaptador con tornillo métrico M12 X 1.25 que le permite ser empleado en una máquina universal marca MTS.

Posee un perno con clips con el objetivo de ensamblar las copas de sujeción, las cuales tienen la función de alojar a los especímenes para fijarlos mediante espárragos. Finalmente, los espárragos tienen la tarea de ubicar a los especímenes dentro de las copas de sujeción y fijarlos firmemente. Todos los componentes del dispositivo de sujeción están hechos de acero inoxidable (Figura 3a).

2.3. Preparación de la máquina de ensayos

Se utilizó una máquina universal marca MTS modelo 858 Table Top System, con capacidad 1.5 Ton, el índice de

velocidad al cual se realizó la prueba fue de 5 mm/min, se aplicó una precarga de 300N. La máquina cuenta con un programa computacional para la adquisición de los datos, el cual tomó una lectura cada segundo, estos datos fueron analizados mediante el programa Microsoft EXCEL® calculando la media y la desviación estándar. Los especímenes fueron montados en la máquina de ensayos manteniendo el paralelismo entre las caras mediante los tornillos de ajuste de posición del dispositivo de sujeción y un nivel de alineación digital marca Mitutoyo® modelo pro 360 con una precisión de 0.1°. Con esto, y el uso del dispositivo de sujeción se asegura la correcta transmisión de la carga axial de compresión (Figura 3).



Figura 3. a) Máquina universal MTS. b) Espécimen montado sobre la máquina.

El arreglo experimental para la prueba de compresión axial se muestra en la Figura 4, la carga aplicada está alineada con el eje longitudinal de los cuerpos vertebrales, mientras que las guías junto con los espárragos aseguran que la carga sea aplicada de forma axial.

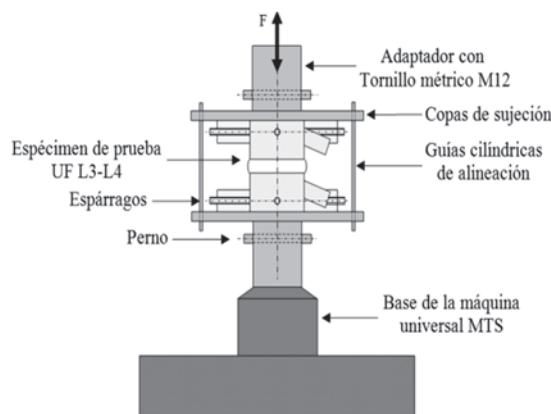


Figura 4. Arreglo experimental para la prueba de axial.

3. Resultados

El coeficiente de rigidez es la propiedad de una estructura definida por la relación de fuerza aplicada a la deformación producida. Esta cuantifica la resistencia que una estructura ofrece a la deformación. Para una estructura particular, la pendiente de su curva fuerza-desplazamiento es el coeficiente de rigidez. Cuando la curva es lineal, la pendiente y por lo tanto el coeficiente de rigidez es una constante. Para un espécimen con un comportamiento de rigidez no lineal, este varía con la magnitud de la carga. La unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es el Newton por metro (N/m), pero para fines de comparación con los datos encontrados en la literatura se utilizó el kilo Newton por milímetro (kN/mm) [27]. Matemáticamente, el coeficiente de rigidez k es dado por (1):

$$k = F/D \quad (1)$$

Donde F = carga aplicada (fuerza o momento) y D = desplazamiento producido (translación o rotación).

El coeficiente de flexibilidad es definido como la relación de cantidad de desplazamiento producido mediante una carga aplicada. Es una cantidad que caracteriza a la capacidad de respuesta de una estructura a la carga aplicada. La unidad de medida en el SI son metros por Newton (m/N), pero como para fines de comparación con los datos obtenidos de la literatura, se utilizó el milímetro por kilo Newton (mm/kN) [27]. Hablando matemáticamente, el coeficiente de flexibilidad f está relacionado con la carga aplicada y el desplazamiento como se observa en (2):

$$f = D/F \quad (2)$$

Donde F = carga aplicada (fuerza o momento) y D = desplazamiento producido (translación o rotación).

Tabla 1. Resultados para UCA's L3-L4.

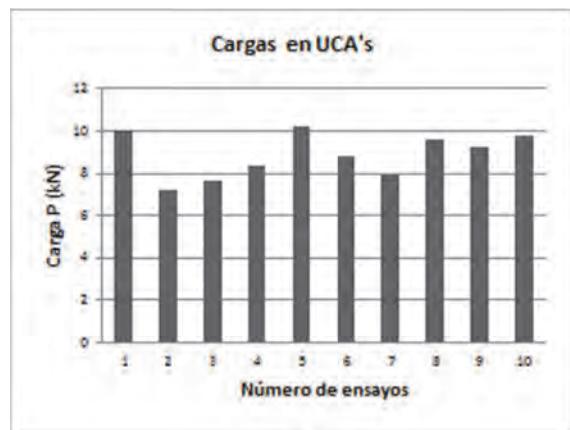
Espécimen	Máxima carga (kN)	Coeficiente de rigidez (kN/mm)	Coeficiente de flexibilidad (mm/kN)
1	3	10.08	1.451
2		7.228	0.961
3		7.637	1.014
4		8.328	1.208
5	9	10.25	1.628
6		8.833	0.958
7		7.885	0.718
8		9.634	1.224
9		9.280	0.904
10		9.784	1.824
Media		8.895	1.189
Desviación Estándar		1.078	0.350
			0.906
			0.257

Los resultados obtenidos para las 10 pruebas de compresión axial en UCA's, están resumidos en la Tabla 1. Mientras que los resultados obtenidos para las 4 pruebas de compresión axial en UF's, se encuentran resumidos en la

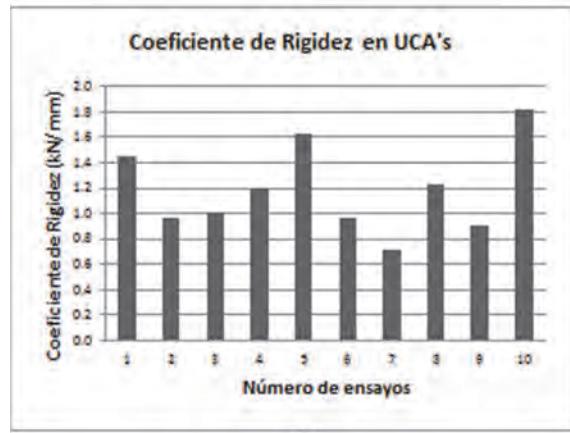
Tabla 2. Todos los resultados fueron analizados estadísticamente con la finalidad de descartar los datos no significativos, como se observa en las Tablas 1 y 2 y en las Figuras 5 y 6. Los parámetros que se estudiaron fueron; la carga máxima que soportaron las placas terminales, el coeficiente de rigidez, y el coeficiente de flexibilidad. Por lo tanto, los valores medios para las UCA's son: carga máxima de 8.895 kN, coeficiente de rigidez de 1.189 kN/mm, y coeficiente de flexibilidad de 0.906 mm/kN.

Tabla 2.
Resultados para UF's L3-L4.

Espécimen	Máxima carga (kN)	Coeficiente de rigidez (kN/mm)	Coeficiente de flexibilidad (mm/kN)
1	10.702	2.492	0.401
2	11.201	3.271	0.306
3	11.028	2.128	0.470
4	12.342	3.127	0.320
Media	11.318	2.755	0.374
Desviación Estándar	0.713	0.537	0.076



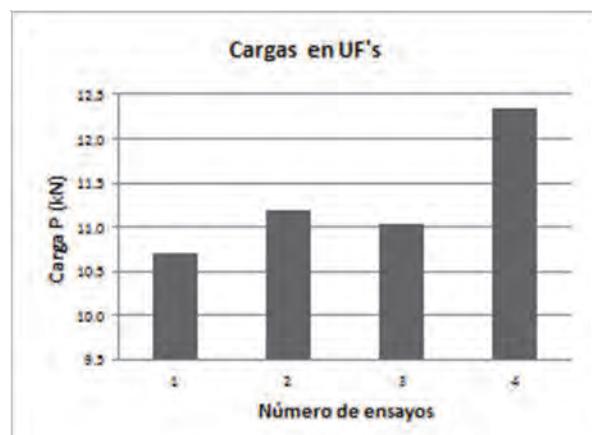
a)



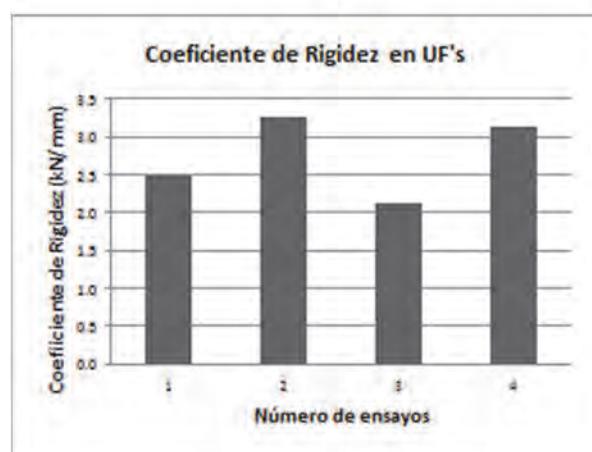
b)

Figura 5. Compresión axial en UCA's. a) Carga máxima. b) Coeficiente de rigidez.

Mientras que los valores medios para las UF's son: carga máxima de 11.318 kN, coeficiente de rigidez de 2.755 kN/mm, y coeficiente de flexibilidad de 0.374 mm/kN.



a)



b)

Figura 6. Compresión axial en UF's. a) Carga máxima. b) Coeficiente de rigidez.

4. Discusión y conclusiones.

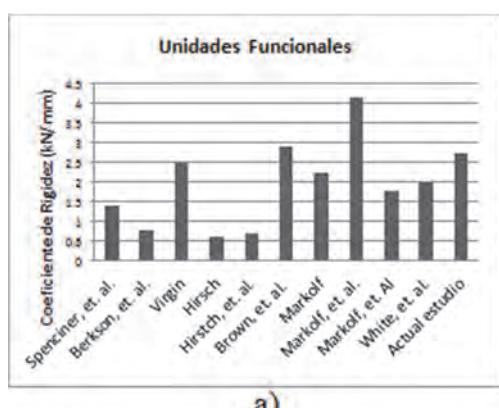
Los resultados obtenidos para las UF's y las UCA's de especímenes porcinos, fueron comparados con lo encontrado en la literatura para el caso humano, estos se encuentran resumidos en la Tabla 3 y en las Figuras 7 y 8 con sus respectivos autores [1]. Los datos encontrados en la literatura respecto a pruebas de compresión axial en UCA's humanas son muy escasos, como se observa.

Los hallazgos encontrados contribuyen a enriquecer los estudios disponibles en la literatura mediante pruebas de compresión axial en especímenes porcinos, cuando estos son comparados. Mientras que, los resultados exhibidos por los diversos autores en UF's humanas, varían unos con respecto de otros, debido a factores tales como, la metodología de ensayo empleada, la geometría y tamaño del espécimen, la velocidad de carga, la raza del espécimen utilizado, el peso, el género, la edad, etc. Esto sugiere la

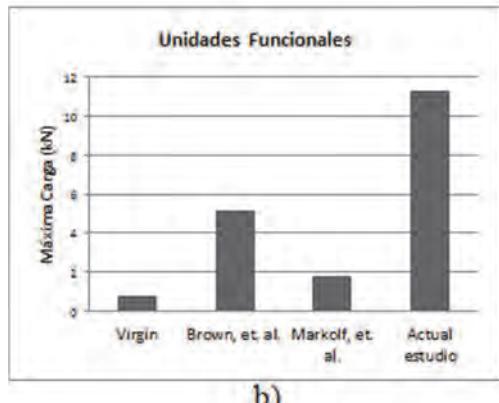
necesidad de estudios biomecánicos más profundos en la columna lumbar, que aporten datos significativos y que conlleven a la estandarización de las pruebas, con la finalidad de unificar criterios para su evaluación.

Tabla 3. Datos de compresión axial comparativos entre especímenes humanos y porcinos.

Datos encontrados en la literatura para compresión axial en humanos.					
Adaptado de Spencier et. al. (2003) [1].					
Autores	Región	UF		UCA	
		Coeficiente de Rígidez (N/mm)	Máxima carga (N)	Coeficiente de Rígidez (N/mm)	Máxima carga (N)
Spenciner, et. al.	T12-L5	1403±266.5	...	1287.5±271.3	3952±1067
Berkson, et. al.	Lumbar	800	...		
Virgin	Lumbar	2500	778±170		
Hirsch	Lumbar	609	...		
Hirsch, et. al.	Lumbar	700	...		
Brown, et. al.	Lumbo-sacral	2900±500	5207±534		
Markolf	T12-L1	1230-3320	...		
Markolf, et. al.	Torácico-lumbar	4160	...		
Markolf, et. al.	T12-L1	1800	1800		
White, et. al.	Lumbar	2000
Resultados obtenidos en este trabajo para compresión axial en especímenes porcinos					
Autor	Región	UF		UCA	
		Coeficiente de Rígidez (N/mm)	Máxima carga (N)	Coeficiente de Rígidez (N/mm)	Máxima carga (N)
Actual estudio	Lumbar L3-L4	2754±537	11318±713	1255±559	8608±1184

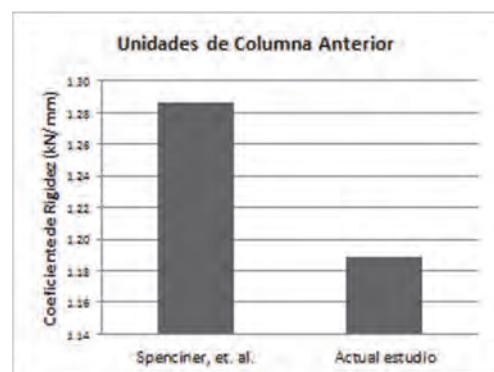


a)

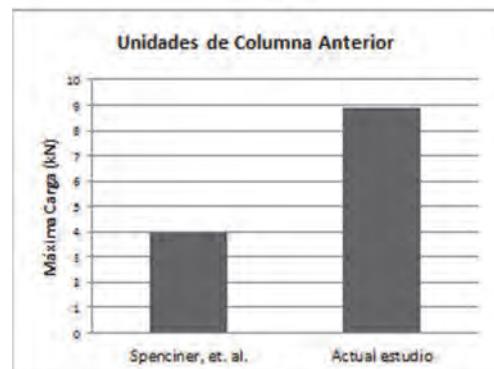


b)

Figura 7. Gráfica comparativa entre especímenes humanos y porcinos en UF's. a) Coeficiente de rigidez. b) Máxima carga.



a)



b)

Figura 8. Gráfica comparativa entre especímenes humanos y porcinos en UCA's. a) Coeficiente de rigidez. b) Máxima carga.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de las UF's para la carga máxima, estos demuestran ser aproximadamente un 22% más resistentes que los obtenidos en las UCA's, lo que se acerca mucho al valor de 18% mostrado en humanos. Esto es debido principalmente a la diferencia morfométrica entre ambos especímenes, considerando la ley de Wolff.

Por otro lado, se puede observar claramente que el coeficiente de rigidez en las UF's aumenta un poco más del doble con respecto a las UCA's. Mientras que, el valor del coeficiente de flexibilidad en las UF's disminuye un poco menos de la mitad con respecto a las UCA's, lo cual muestra proporcionalidad y concuerda con la teoría, que dice que el coeficiente de flexibilidad es inversamente proporcional al coeficiente de rigidez. En general los valores de carga máxima y el coeficiente de rigidez son mayores en especímenes porcinos que en humanos, a excepción del coeficiente de rigidez en UCA's, el cual tiene una media similar en humanos y porcinos.

Las dimensiones morfométricas de las vértebras porcinas son en general más grandes que las humanas. De acuerdo con la ley de Wolff, esto sugiere que las cargas a las que está sometida la columna vertebral porcina deben ser mayores en porcinos que en humanos. Respecto a esto, se puede decir que los resultados obtenidos para la carga máxima y coeficiente de rigidez en especímenes porcinos valida dicha ley, ya que son mayores a los encontrados en la literatura para el caso humano. Según Smith (2002), las

cargas en los cuadrúpedos se distribuyen de manera muy similar a como sucede en los humanos [15]. Por lo que, los resultados obtenidos son una opción confiable, siempre y cuando sean tomadas en cuenta las diferencias morfométricas correspondientes entre ambas especies.

Un problema relacionado con el uso de especímenes humanos en la experimentación mecánica, es la variación de la morfometría y por lo tanto, las propiedades mecánicas. Así como, la dificultad de obtención por cuestiones legales y éticas, especialmente de la población más joven. Por lo que, la mayoría de los experimentos *in vitro* han sido desarrollados en modelos animales, los cuales están más disponibles y tienen un mayor control sobre las características deseadas.

La relación entre dimensiones, geometría, estructura ósea y propiedades mecánicas, está íntimamente relacionada. Por lo que, para correlacionar biomecánicamente ambas especies, es necesario analizar mediante diversos estudios sus analogías, con el objetivo de extrapolar los resultados obtenidos al caso humano y utilizarlos en diversas aplicaciones, como el diseño de prótesis e instrumentación quirúrgica, entre otros.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen los apoyos brindados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), y el Instituto Politécnico Nacional (IPN), así como al Hospital Regional 1º de Octubre del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales para los Trabajadores del Estado (ISSSTE).

Referencias

- [1] Spenciner, D. B., Paiva, J. A. and Crisco, J. J., Testing of human cadaveric functional spinal units to the ASTM draft standard, -Standard test methods for static and dynamic characterization of spinal artificial discs, En: Spinal Implants: Are We Evaluating Them Appropriately?, ASTM STP 1431, Melkerson, M. N., Griffith, L. and Kirkpatrick, J. S., Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 114-126, 2003.
- [2] Evans, F. G., Factors affecting the mechanical properties of bone, Bulletin of the New York Academy of Medicine, 49, pp. 751-762, 1973.
- [3] An Yuehuei, H. and Draughn, R. H., Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface, CRC Press LLC, Washington, D.C., 2000.
- [4] Garzón, A. D. A., Modelado de la osificación de las epífisis de huesos largos, Dyna, 160, pp. 27-37, 2009.
- [5] Granados, Z. J., Uso de animales de experimentación en la investigación biomédica en Costa Rica, Acta Médica Costarricense, 52, pp. 134-136, 2010.
- [6] Casey, L. K. and Dubner, R., Animal models of chronic pain: scientific and ethical issues, J. Pain, 38, pp. 249-252, 1989.
- [7] Ramírez, P., Ríos, A., Yelamos, J., Muñoz, A. y Parrillae, P., Estado actual del xenotrasplante de órganos, J. Cir. Esp., 72, pp. 222-231, 2002.
- [8] Kumar, N., Kukreti, S., Ishaque, M. and Mulholland, R., Anatomy of deer spine and its comparison to the human spine, J. Anat. Rec., 260, pp. 189-203, 2000.
- [9] Bozkus, H., Crawford, N. R., Chamberlain, R. H., Valenzuela, T. D., Espinoza, A., Yüksel, Z. and Dickman, C. A., Comparative anatomy of the porcine and human thoracic spines with reference to thoracoscopic surgical techniques, J. Surg. Endosc., 19, pp. 1652-1665, 2005.
- [10] Boszczyk, B. M., Boszczyk, A. A. and Putz, R., Comparative and functional anatomy of the mammalian lumbar spine, J. Anat. Rec., 264, pp. 157-168, 2001.
- [11] Cotterill, P. C., Kostuik, J. P., D'angelo, G., Fernie, G. R. and Maki, B. E., An anatomical comparison of the human and bovine thoracolumbar spine, J. Orthop. Res., 4, pp. 298-303, 1986.
- [12] McLain, R. F., Yerby, S. A. and Mosely, T. A., Comparative morphometry of L4 vertebrae: comparison of large animal models for the human lumbar spine, J. Spine, 27, E200-E206, 2002.
- [13] Wilke, H. J., Kettler, A., Wenger, K. H. and Claes, L. E., Anatomy of the sheep spine and its comparison to the human spine, J. Anat. Rec., 247, pp. 542-555, 1997.
- [14] Yingling, V. R., Callaghan, J. P. and McGill, S. M., The porcine cervical spine as a model of the human lumbar spine: an anatomical, geometric, and functional comparison, J. Spinal Disord., 12, pp. 415-423, 1999.
- [15] Smith, T. H., The use of a quadruped as an in vivo model for the study of the spine – biomechanical considerations, J. Eur. Spine, 11, pp. 137-144, 2002.
- [16] Nigg, B. M. and Herzog, W., Biomechanics of the Musculo-Skeletal System, John Wiley & Son Ltd, Inglaterra, 1999.
- [17] Bertram, J. E. A. and Swartz, S. M., The law of bone transformation: A case of crying Wolff?, J. Biological Reviews, 66, pp. 245-273, 1991.
- [18] Solano, U., Las leyes de la ortopedia, Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología, 20, pp. 115-118, 2006.
- [19] Roca, B. J., Tratamiento quirúrgico del dolor lumbar, Jims, Barcelona, 1987.
- [20] Dath, R., Ebinesan, A. D., Porter, K. M. and Miles, A. W., Anatomical measurements of porcine lumbar vertebrae, J. Clin. Biomech., 22, pp. 607-613, 2007.
- [21] Zindrick, M. R., Wiltse, L. L., Doornik, A., Widell, E. H., Knight, G. W., Patwardhan, A. G., Thomas, J. C., Rothman, S. L. and Fields, B. T., Analysis of the morphometric characteristics of the thoracic and lumbar pedicles, J. Spine, 12, pp. 160-166, 1987.
- [22] Rodríguez, C. R. G., Fuerte, H. A., Urriolagoitia, S. G., Merchán, C. E. A. y González, R. A., Análisis morfométrico de vértebras porcinas para establecer su correlación biomecánica con vértebras humanas en estudios experimentales, Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, 31, pp. 80-85, 2010.
- [23] Urrutia, V. E., Elizondo, O. R. E., De la Garza, C. O. and Guzmán, L. S., Morphometry of Pedicle and Vertebral Body in a Mexican Population by CT and Fluoroscopy, Int. J. Morphol., 27, pp. 1299-1303, 2009.
- [24] Rodríguez, C. R. G., Análisis biomecánico del disco intervertebral para establecer su contribución en la inestabilidad de las fracturas, [PhD Thesis]. México D. F.: Instituto Politécnico Nacional, 2007.
- [25] Van Dieën, J. H., Kingma, I., Meijer, R., Hänsel, L. and Huiskes, R., Stress distribution changes in bovine vertebrae just below the endplate after sustained loading, J. Clin. Biomech., 61, pp. S135-S142, 2001.
- [26] Ratner, B. D., Biomaterials science: An introduction to materials in medicine, Elsevier Academic Press, Boston, 2004.
- [27] White III, A. A. and Panjabi, M. M., Clinical biomechanics of the spine, Lippincott, Philadelphia, pp. 46, 656, 1990.



Ionic liquids (IL) corrosion on A285 carbon steel Corrosión de líquidos iónicos (LI) sobre acero al carbón A285

Rogério F. Dos Santos ^a, Tiago Falcade ^b, Leonardo M. Antonini ^c, Maria R. Ortega V. ^d, Silvana Mattedi ^e
Miguel Iglesias ^f & Célia F. Malfatti ^g

^a Ingeniero Químico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. cooperenge@gmail.com

^b MSc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. tiago.falcade@ufrgs.br

^c MSc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. leomantonini@gmail.com

^d Ingeniera Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. mortegavega811@gmail.com

^e Dra. Universidade Federal da Bahia. Salvador, Brasil. silvana@ufba.br

^f Dr. Universidad Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España. miguel.iglesias@ufba.br

^g Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil. celia.malfatti@ufrgs.br

Received: August 14th, 2013. Received in revised form: October 28th, 2013. Accepted: November 20th, 2013

Abstract

In this work, corrosion caused by different ionic liquids on Grade A – A285 carbon steel plates at room temperature (25°C) is studied. Ionic liquids were prepared via acid – base neutralization. The ionic liquid hydrophilic or hydrophobic character was determined by the wettability technique. Corrosion behavior for each system was analyzed by electrochemical measurements (open circuit potential monitoring and potentiodynamic polarization). Substrate morphology was analyzed by scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectroscopy before and after the electrochemical measurements. The results obtained showed that Grade A – A285 carbon steel in contact with the ionic liquids presented low corrosion rates, being the highest one the corresponding for the 2-hydroxyethylammonium lactate system and the lowest corrosion rate for 2-hydroxyethylammonium acetate system.

Keywords: Ionic liquids; corrosion; Grade A - A285 carbon steel.

Resumen

En el presente trabajo, se llevó a cabo un estudio de corrosión causada por distintos líquidos iónicos sobre placas de acero al carbón A285 grado A, a temperatura ambiente. Se prepararon los líquidos iónicos por neutralización de monoetanolamina con ácidos carboxílicos. El carácter hidrofílico o hidrofóbico de los líquidos se determinó a través de la técnica de humectabilidad. El análisis de corrosión se llevó a cabo por técnicas electroquímicas (potencial de circuito abierto y polarización potenciodinámica). Se realizó un análisis de la morfología del sustrato, antes y después de los análisis electroquímicos, por microscopía electrónica de barrido acoplada con espectroscopía de rayos X por dispersión de energía. Los resultados muestran pequeñas tasas de corrosión para el acero al carbono A285 grado A en contacto con los líquidos iónicos, de las cuales la superior se mostró con lactato de 2-hidroxietanolamina y la más baja con acetato de 2-hidroxietanolamina.

Palabra Clave: Líquidos iónicos; corrosión; acero al carbono A285 – grado A.

1. Introducción

Los líquidos iónicos poseen baja presión de vapor, poca volatilidad, son líquidos dentro de un amplio intervalo de temperaturas, excelente estabilidad química y térmica, y no son inflamables. Además, presentan afinidad de propiedades termofísicas por sustitución de cationes y/o aniones [1], capacidad de disolución selectiva de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos y buen desempeño en reacciones de superficie. El control de la acidez y la basicidad de los líquidos iónicos es bastante sencillo. Estos líquidos no son potencialmente tóxicos y pueden ser reutilizados [2, 3].

Tal diversidad de propiedades hacen que estos líquidos iónicos tengan también diversas aplicaciones en procesos de refinamiento de petróleo, producción de combustibles y

energía, tratamiento biológico, electrólito en procesos electroquímicos, procesos de separación, entre otras [1 – 5].

Debido a tales propiedades, los líquidos iónicos son susceptibles de ser utilizados en la absorción de CO₂ y H₂S de diferentes medios orgánicos. La presencia de un anión con un fuerte carácter básico los convierte en una alternativa interesante para esta aplicación [1 – 4], donde tradicionalmente se utiliza una solución de NaOH, con buenos resultados.

Para tal aplicación, es necesario considerar el comportamiento de los líquidos iónicos en contacto con los materiales de los sistemas de absorción. Este artículo versa sobre los efectos de corrosión sobre la estructura metálica de los equipos, cuando entra en contacto con los diferentes líquidos iónicos. El estudio se realizó sobre placas de acero al carbón A285 – grado A, de uso extendido en operaciones de absorción.

2. Metodología experimental

2.1. Preparación del sustrato

Se utilizaron placas de acero al carbón A285 – grado A, cuya composición química, según los análisis de espectrometría de emisión óptica por chispa, aparece en la Tabla 1. Los valores se encuentran dentro de los criterios especificados en la norma ASTM A285 [6].

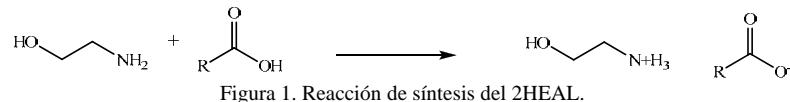
Tabla 1.
Composición química del acero al carbón A285(A).

% en peso	0,04	0,023	0,29	0,012	0,015	0,06	99,5
Elemento	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe

Las placas tienen 20 mm de alto y 20 mm de ancho. Se lijaron las muestras con papel de SiC # 120, 400 y 600, sin posterior pulimento. Antes de cada ensayo, se limpian con alcohol, se enjuagaron con agua destilada y, finalmente, fueron secadas.

2.2. Síntesis de los líquidos iónicos

La tabla 2 muestra una descripción de los líquidos iónicos (LI) utilizados. Estos LI fueron sintetizados en la Universidade Federal da Bahía.



Los LI se sintetizaron por reacción directa, en proporción estequiométrica, de amina con ácido. La figura 1 muestra la reacción de síntesis de la sal de Brønsted para aniones ramificados (lactato).

Lentamente, el ácido se adiciona al balón que contiene la amina y se mantiene frío (10°C) para evitar reacciones paralelas. La figura presenta una imagen del montaje de la síntesis. Es necesario un control adecuado de la temperatura, debido a que las reacciones químicas son exotérmicas. El líquido que se encuentra dentro del balón presentó un aumento gradual de la viscosidad. Posteriormente, se elimina el reactivo en exceso y el agua absorbida, mediante calentamiento y agitación durante 48 h.

Finalmente, se obtiene un líquido amarillo oscuro al concluir el proceso de reacción y purificación. Con el fin de reducir el contenido de agua, cada líquido fue sometido a secado por más de 48 horas, a 50°C, a una presión de vacío de 20 kPa con agitación antes de cada utilización experimental [14].

2.3. Caracterización electroquímica

La caracterización electroquímica se realizó a través de curvas de polarización potenciodinámicas obtenidas en un potenciómetro Omnimetra PG39A con velocidad de barrido de 1 mV.s⁻¹, en un intervalo de potencial de -250 y 1600 mV por debajo y por encima del potencial de circuito abierto (PCA). Para los ensayos, se utilizaron celdas electroquímicas de tres electrodos: placas de acero al carbón

Tabla 2.
Líquidos iónicos utilizados en los ensayos.

IL	Descripción
2 HEAA	Acetato de 2-hidroxietilamina
2 MHEAA	Acetato de metil-2-hidroxietilamina
2 HEAL	Lactato de 2-hidroxietilamina

A través de la variación del anión o de la cadena alquílica catiónica, se puede obtener una vasta gama de propiedades (viscosidad, densidad, poder de solvatación, hidrofobicidad) para los LI, de acuerdo con sus futuras aplicaciones [7].

Bicak [8] sintetizó LI a partir de la neutralización de monoetanolamina con ácido fórmico. Greaves et al. [9] propusieron diferentes LI prócticos obtenidos a partir de aminas primarias y ácidos orgánicos e inorgánicos.

Iglesias y colaboradores [10 - 13] sintetizaron una familia de LI al modificar la cadena alifática del ácido orgánico, con hidroxilaminas secundarias y terciarias. Esta nueva familia de LI cuenta con bajo costo, sencilla vía de síntesis y diferentes aplicaciones, además de su posible baja toxicidad y degradabilidad.

Los LI se forman por la reacción ácido – base de Brønsted. Su principal característica es la presencia de un protón, que puede crear puentes de hidrógeno [2].

A285 – grado A de 20 mm x 20 mm como electrodo de trabajo, Ag/AgCl como electrodo de referencia y Pt como contraelectrodo. La figura 3 muestra una representación de la celda electroquímica utilizada. Se utilizó cada uno de los LI como electrolito y NaCl 1M como electrolito para efectos comparativos. Se llevó a cabo un monitoreo del potencial de circuito abierto durante una hora.

2.4. Caracterización morfológica

La evaluación morfológica del sustrato, luego de los ensayos de polarización potenciodinámica, se realizó por microscopía electrónica de barrido (JEOL 6060, 20 kV).



Figura 1. Síntesis de los líquidos iónicos [14].

2.5. Ensayos de humectabilidad de los LI

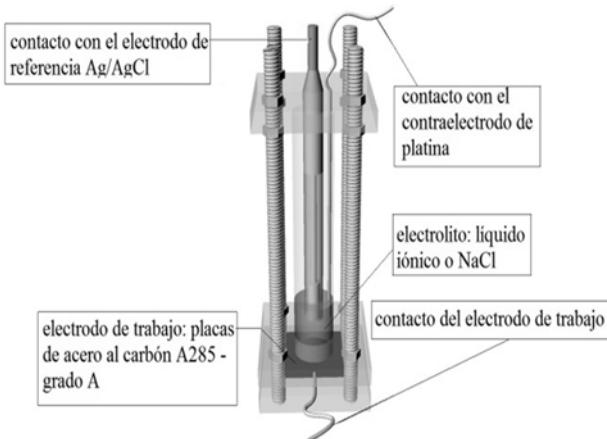


Figura 2. Representación de la célula utilizada para los ensayos electroquímicos.

3. Resultados y discusión

3.1. Variación del potencial de circuito abierto (PCA)

Se realizaron medidas de PCA, con el objetivo de evaluar la variación de potencial con el tiempo de contacto con la solución de LI. Los resultados obtenidos se encuentran en la figura 4. Los valores de PCA indican que el 2HEAL (con los menores valores de PCA) es el LI más activo; mientras tanto, que el 2HEAA es el líquido menos activo, con los mayores valores de PCA. Esto significa que el sustrato será más susceptible a corrosión cuando se encuentra en contacto con 2HEAL, en comparación con los otros líquidos estudiados.

3.2. Curvas de polarización potenciodinámicas

Las curvas de polarización potenciodinámicas (figura 5) muestran un comportamiento semejante entre los diferentes LI. Esto puede estar relacionado con sus estructuras químicas semejantes. En comparación con el anión del 2HEAA, 2MHEAA incluye un grupo metilo y el HEAL tiene un grupo hidroxilo más.

Se puede observar que las curvas de polarización de los LI presentaron una región de pasividad, entre 0.1 y 0.7 V, donde el potencial aumenta sin aumentar la densidad de corriente.

Este efecto fue reportado por Arenas [15], con altos potenciales anódicos, donde se observa la reducción del ataque corrosivo, especialmente cuando se compara con medios agresivos, como soluciones de cloruros, en este caso, NaCl.

Las extrapolaciones de las rectas de Tafel de cada sistema estudiado (Tabla 3) muestran poca variación de la tasa de corrosión entre cada LI. Al aplicar tal extrapolación a las curvas de polarización de la figura 5, se determinaron el potencial de corrosión E_{corr} , la densidad de corriente i_{corr} y la tasa de corrosión para los sistemas estudiados.

Con base en los valores de i_{corr} , la tasa de corrosión del acero en los IL se calculó con la ecuación (1):

$$r = \frac{3,27 \times 10^{-3} i_{corr} W}{\rho} \quad (1)$$

En la que r corresponde a la tasa de corrosión en milímetros por año, W es el peso equivalente en gramos, ρ es la densidad del metal o aleación en g/cm^3 e i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión en $\mu A/cm^2$. Para el acero al carbón, el peso equivalente es de 27,92 y la densidad corresponde a $7,87 g/cm^3$ [15].

Los resultados de los cálculos de la tasa de corrosión uniforme aparecen en la tabla 3. Las tasas de corrosión de los sistemas que utilizaron LI como electrólito demuestran poco grado de corrosión, consiguiendo un orden de magnitud menos que para el NaCl, que es un medio agresivo.

Los materiales con tasas de corrosión inferiores a 0,02 mm/año se consideran excelentes en resistencia a la corrosión relativa [15]. Todos los sistemas estudiados presentan tasas de corrosión al menos tres órdenes inferiores a este valor de referencia, lo que indica una baja corrosividad de los líquidos iónicos para el acero estudiado.

Tabla 3. Tasas de corrosión para acero A285 en contacto con IL y NaCl 1M.

Líquido Iónico	Potencial de Corrosión (mV)	Corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$)	Tasa de Corrosión (mm/año)
NaCl	-558	$6,50 \times 10^{-6}$	$7,54 \times 10^{-5}$
2 HEAA	-297	$2,40 \times 10^{-7}$	$2,78 \times 10^{-6}$
2 MHEAA	-281	$1,70 \times 10^{-7}$	$1,97 \times 10^{-6}$
2 HEAL	-482	$1,50 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-6}$

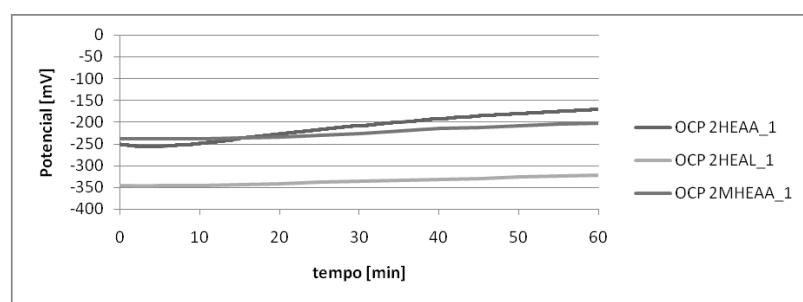


Figura 4. Variación de PCA con el tiempo para acero A285 en contacto con los IL.

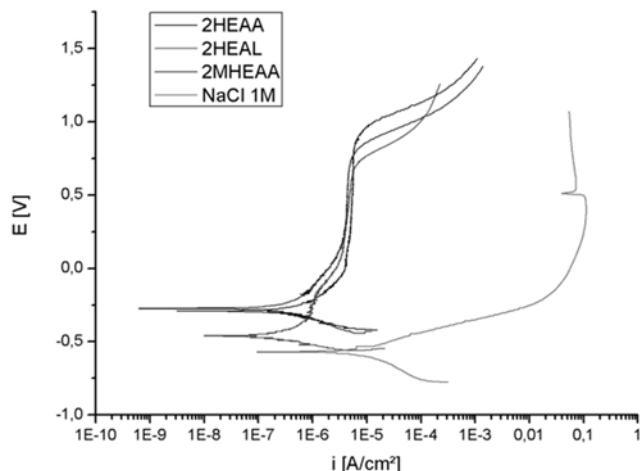


Figura 5. Curvas de polarización para acero A285 en contacto con IL y NaCl 1M. Potenciales medidos con electrodo de referencia de Ag/AgCl.

3.3. Caracterización morfológica

La figura 6 presenta una microfotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido de la muestra de acero antes de los ensayos electroquímicos. Es posible observar una superficie homogénea, con marcas de lija, como resultado de la preparación de la muestra. Tales discontinuidades pueden actuar como núcleos de los procesos corrosivos, comportamiento que no se observó después de los ensayos electroquímicos.

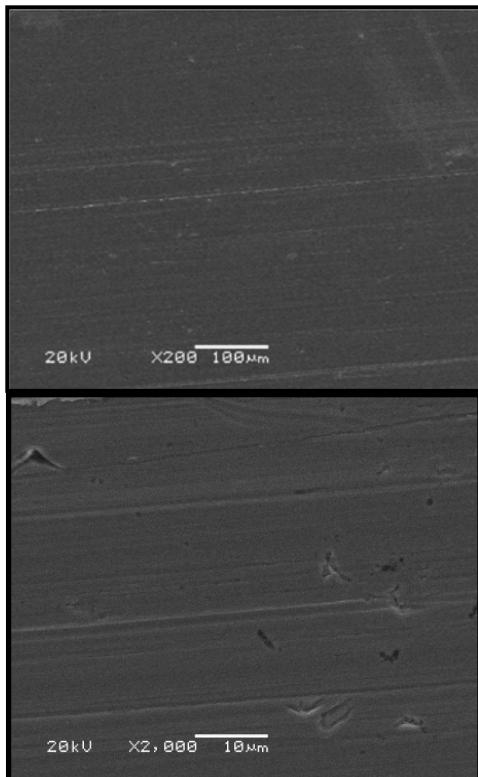


Figura 6. Microfotografía obtenida para acero A285 antes de los ensayos electroquímicos.

La figura 7 muestra la morfología del acero A285 luego de los ensayos electroquímicos, utilizando NaCl como

electrólito. Se esperaba un aspecto de corrosión general, en virtud de la solución salina, agresiva para aceros con bajo contenido de carbono.

A partir de la microfotografía mostrada en la figura 8, se observa la formación de una región atacada por el 2HEAA, con aspecto de alvéolos.

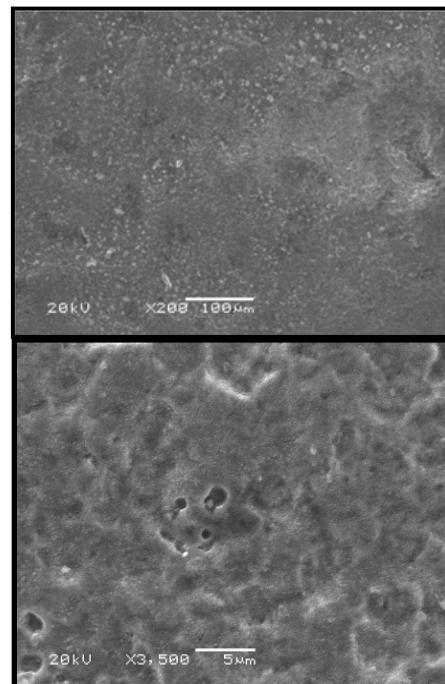


Figura 7. Microfotografía obtenida para acero A285 después de los ensayos electroquímicos. Electrólito: NaCl 1M.

Los resultados de rayos X por dispersión de energía (EDS) (figuras 9 y 10) muestran la presencia de hierro y oxígeno, lo que sugiere la formación de óxido de hierro como producto de corrosión. Se esperaba la formación de esta región pasiva en el sustrato, a partir de los resultados de las curvas de polarización. Se puede observar un comportamiento semejante en las microfotografías de la figura 11. El electrólito de 2MHEAA produjo una región de acero atacada. Los resultados de EDS para esta muestra aparecen en las figuras 12 y 13.

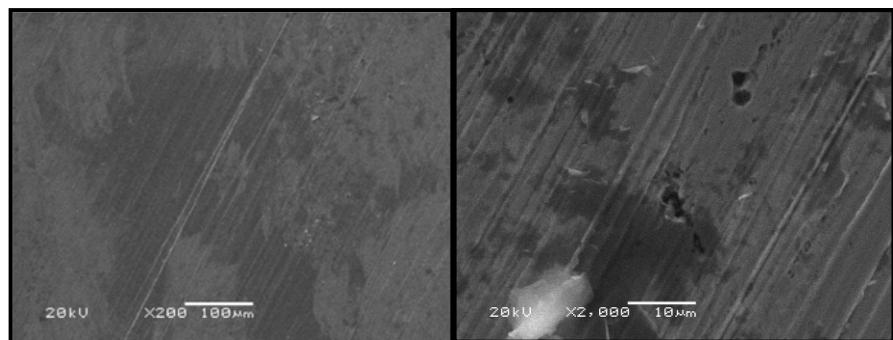


Figura 8. Microfotografía obtenida para acero A285 después de los ensayos electroquímicos. Electrólito: 2HEAA.

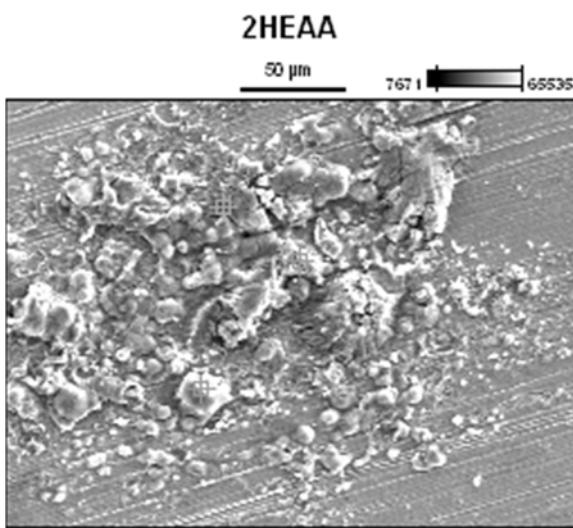


Figura 9. EDS de la región atacada del sustrato después de los ensayos electroquímicos con 2HEAA.

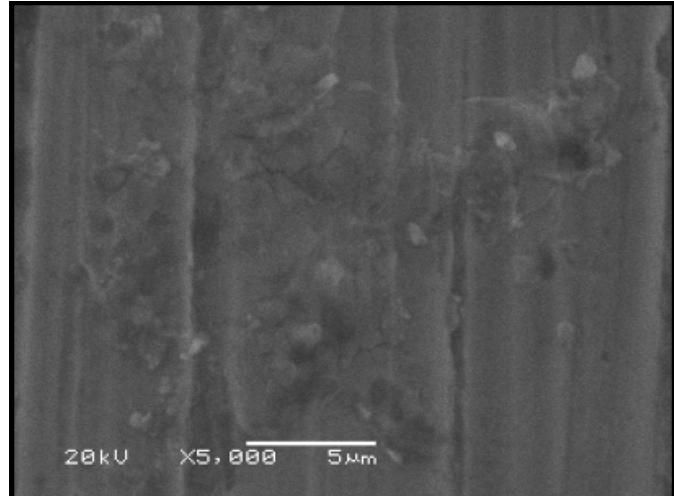


Figura 11. Microfotografía obtenida para acero A285 luego de los ensayos electroquímicos. Electrólito 2MHEAA.

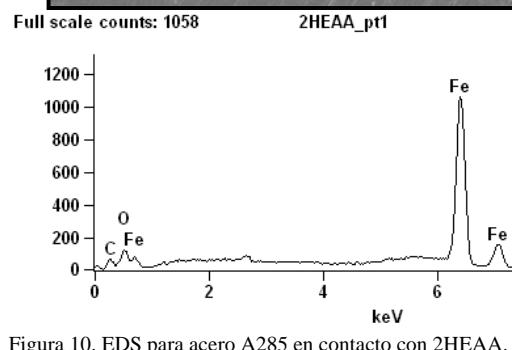
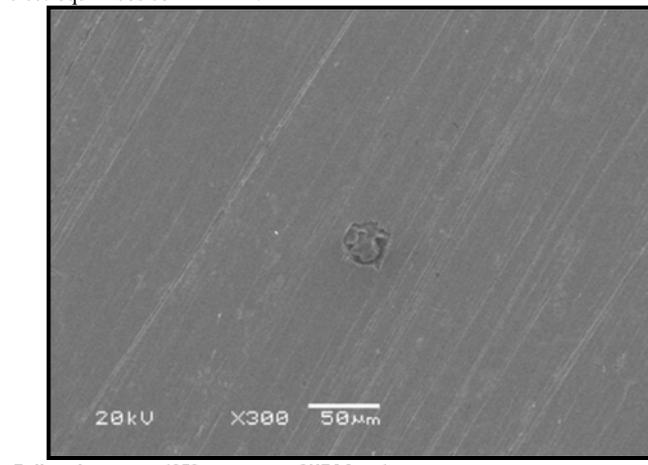


Figura 10. EDS para acero A285 en contacto con 2HEAA.

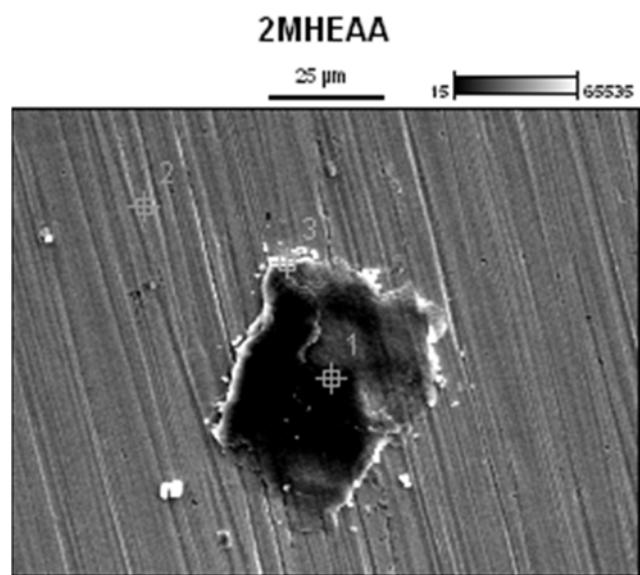


Figura 12. EDS de la región atacada del sustrato después de los ensayos electroquímicos con 2MHEAA.

Las microfotografías de la superficie de acero A285 y 2HEAL como electrólito presentaron una región corroída más importante, con formación de placas de óxido de hierro (figuras 14 – 16). Por lo tanto, hay mayor corrosión para este líquido. Cuando se compara con los demás electrólitos,

se puede asociar este comportamiento al carácter más activo de este sistema, en concordancia con los valores de potencial de corrosión (Tabla 3 y Figura 5).

Los resultados indican una tendencia de menor humectabilidad del sustrato para los líquidos 2MHEAA y 2HEAL, los cuales, posiblemente, quedaron absorbidos en la superficie del acero y la tornaron hidrofóbica. El 2HEAA presentó un valor de humectabilidad intermedia, mientras que el NaCl 1M se mostró hidrofílico.

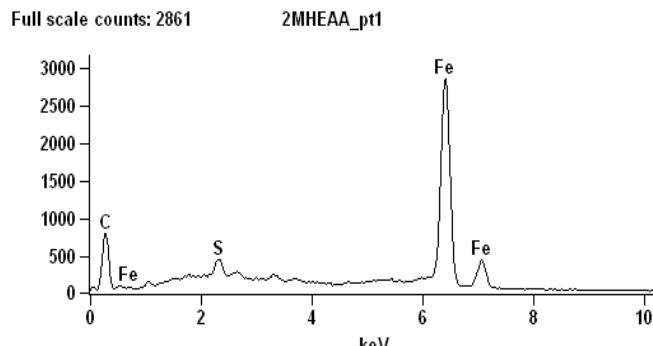


Figura 13. EDS para acero A285 en contacto con 2MHEAA.

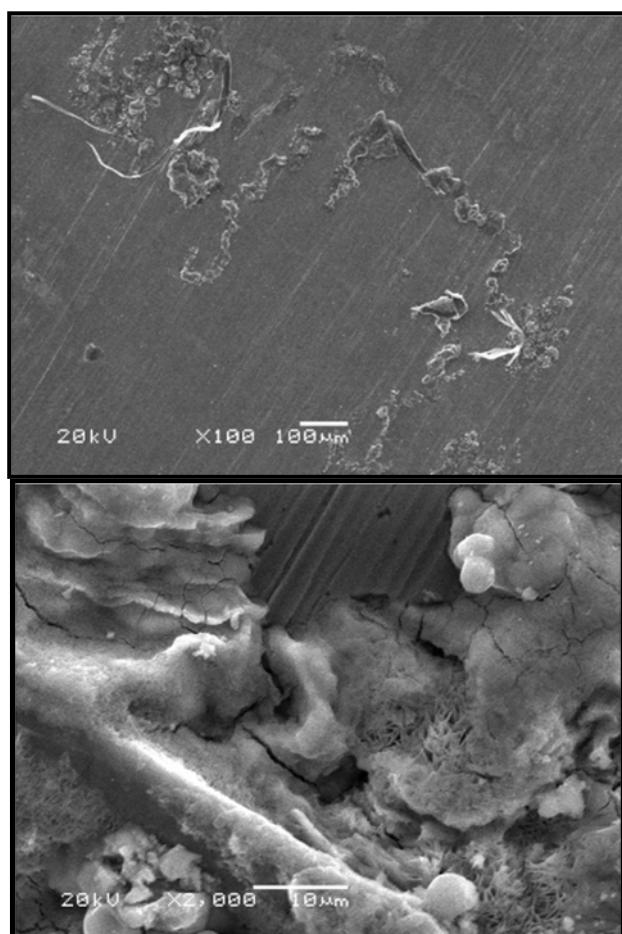


Figura 14. Microfotografía obtenida para acero A285 luego de los ensayos electroquímicos. Electrólito: 2HEAL.

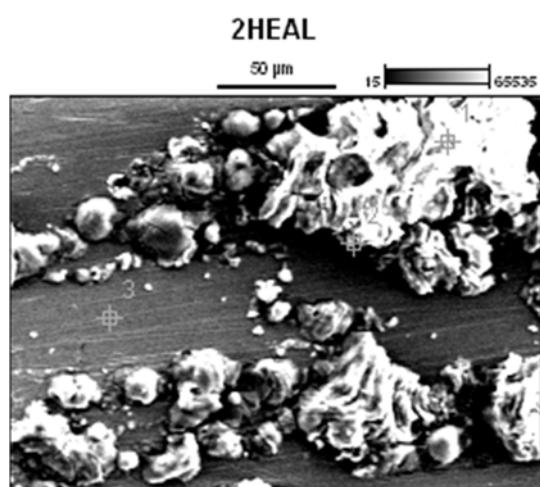


Figura 15. EDS para acero A285 en contacto con 2HEAL.

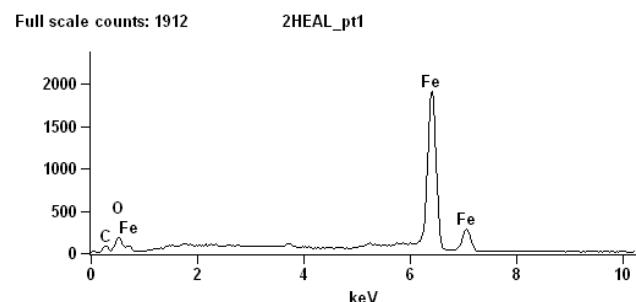


Figura 16. EDS para acero A285 en contacto con 2HEAL.

3.4. Humectabilidad

La figura 17 muestra las imágenes obtenidas para la determinación del ángulo de contacto luego de los ensayos electroquímicos, cuyos valores se encuentran en la tabla 4.

Se puede observar que el 2MHEAA (figura 17-a) y el 2HEAL

(figura 17-b) presentan los valores más altos para el ángulo de contacto; por lo tanto, su humectabilidad es menor. Por el contrario, el 2HEAA (figura 17-c) mostró un ángulo de contacto menor que los anteriores IL. El ángulo de contacto para la solución de NaCl (figura 17-d) presentó un bajo valor.

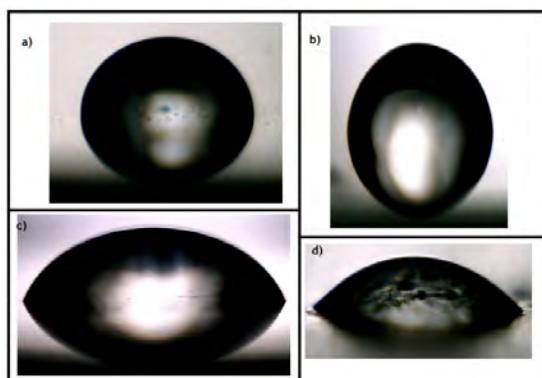


Figura 17. Humectabilidad de los electrólitos sobre una placa de acero A285. a) 2MHEAA. b) 2HEAL. c) 2HEAA. d) NaCl 1M.

4. Conclusión

Las tasas de corrosión presentadas por una muestra de acero inoxidable A285 – grado A, en contacto con los LI estudiados, a temperatura ambiente, fueron bastante bajas. Los ensayos de polarización potenciodinámica mostraron la formación de una región pasiva en la superficie del acero. De los líquidos estudiados, el 2HEAL fue el más corrosivo, como indican el potencial de corrosión y las microfotografías. El líquido que generó menor corrosión fue el 2HEAA.

Tabla 4. Ángulos de humectabilidad.

Electrólito	Valor
<u>2MHEAA</u>	$85,75 \pm 0,84$
<u>2HEAL</u>	$83,53 \pm 0,97$
<u>2HEAA</u>	$68,05 \pm 0,20$
<u>NaCl</u>	$45,22 \pm 1,03$

Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado con el apoyo de la CAPES y CNPq, entidades del Gobierno Brasileño.

Referencias

- [1] Mattedi, S., Carvalho, P. J., Coutinho, J. A. P., Alvarez, V. H. and Iglesias, M., High pressure CO_2 solubility in N-methyl-2-hydroxyethylammonium protic ionic liquids, *J. Supercrit. Fluids*, 56, pp. 224–230, 2011.
- [2] Oliveira, L., José, N. M., Boaventura, J., Iglesias, M. and Mattedi, S., Proton Conducting Polymer Membrane Using The Ionic Liquid 2-Hydroxyethylammonium Lactate For Ethanol Fuel Cells. *Memorias International Congress on Advances in Applied Physics and Materials Science*. Antalya, Turquía AIP Conf. Proc., 1400, pp. 149-153, 2011.
- [3] Anouti, M., Jacquemin, J. and Porion, P., Transport Properties Investigation of Aqueous Protic Ionic Liquid Solutions through Conductivity, Viscosity, and NMR Self-Diffusion Measurements. *J. Phys. Chem. B* 116, pp. 4228–4238, 2012.
- [4] Muldoon, M. J., Aki, S. N. V., Anderson, J. K., Dixon, J. K. and Brennecke, J. F., Improving Carbon Dioxide Solubility in Ionic Liquids. *J. Phys. Chem. B*, 111, 30, pp. 9001-9009, 2007.
- [5] Pérez-De Los Ríos, A., Hernández-Fernández, F., Ginesta-Anzola, A., Sánchez-Segado, S., Lozano-Blanco, L. J. y Godínez-Seoane, C., Nuevos procesos de separación basados en membranas líquidas iónicas soportadas. *DYNA*, 86-6, pp. 686-692, 2011.
- [6] Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, Low - and Intermediate – Tensile Strength. ASTM – American Society for Testing and Material. A 285/A 285M - 03 (2007).
- [7] Kato, R. and Gmehling, J., Activity coefficients at infinite dilution of various solutes in the ionic liquids $[\text{MMIM}]^+[\text{CH}_3\text{SO}_4^-]$, $[\text{MMIM}]^+[\text{CH}_3\text{OC}_2\text{H}_5\text{SO}_4^-]$, $[\text{MMIM}]^+[(\text{CH}_3)_2\text{PO}_4^-]$, $[\text{C}_5\text{H}_5\text{NC}_2\text{H}_5]^+[(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-]$ and $[\text{C}_5\text{H}_5\text{NH}]^+[\text{C}_2\text{H}_5\text{OC}_2\text{H}_4\text{OSO}_3^-]$. *Fluid Phase Equilib.*, 226, 37–44, 2004.
- [8] Bicak, N., A new ionic liquid: 2-hydroxyethylammonium formate. *J. Mol. Liq.*, 116, pp. 15–18, 2005.
- [9] Greaves, T. L., Weerawardena, A., Fong, C., Krodkiewska, I. and Drummond, C., Protic ionic liquids: solvents with tunable phase behavior and physicochemical properties. *J. Phys. Chem. B*, 110, pp. 22479–22487, 2006.
- [10] Iglesias, M., Torres, A., Gonzalez-Olmos, R. and Salvatierra, D., Effect of temperature on mixing thermodynamics of a new ionic liquid: {2-Hydroxyethylammonium formate (2-HEAF) + short hydroxylic solvents}. *J. Chem. Thermodyn.*, 40, pp. 119–133, 2006.
- [11] Cota, I., Gonzalez-Olmos, R., Iglesias, M. and Medina, F., New short aliphatic chain ionic liquids: synthesis, physical properties, and catalytic activity in aldol condensations. *J. Phys. Chem. B*, 111, pp. 12468–12477, 2007.
- [12] Iglesias, M., Garcia, R., Gonzalez-Olmos, R., Salvatierra, D. and Mattedi, S., Synthesis and influence of temperature on thermodynamic properties of new ionic liquids. *Memorias 1st International Congress on Green Process Engineering (GPE 2007)*, Toulouse, Francia, Abril, pp. 24-26, 2007.
- [13] Alvarez, V. H., Dosil, N., Gonzalez-Cabaleiro, R., Mattedi, S., Martin-Pastor, M., Iglesias, M. and Navaza, J. M.. Brønsted Ionic Liquids for Sustainable Processes: Synthesis and Physical Properties. *J. Chem. Eng.*, 55, pp. 625 – 632, 2010.
- [14] Oliveira, L. M. C., Iglesias, M., Mattedi, S. and Boaventura, J. S., Síntese e caracterização de novos líquidos iônicos. CBECIMat, 2010.
- [15] Arenas, M. F. and Reddy, R. G., Corrosion of steel in ionic liquids. *J. Min. Metal.*, 39 (1-2) B, pp. 81-91, 2003.

Effects of human-structure interaction in slabs

Efectos de interacción humano-estructura en losas

Sandra Villamizar ^a, Daniel Gómez ^b & Peter Thomson ^c

^a M.Sc., Universidad del Valle, Colombia. Grupo de Investigación G-7. sandra.villamizar@correounalvalle.edu.co

^b M.Sc., Profesor Asociado, Universidad del Valle, Colombia. Grupo G-7. daniel.gomez@correounalvalle.edu.co

^c Ph.D., Aeroespacial, Profesor Titular, Universidad del Valle, Colombia. Grupo G-7. peter.thomson@correounalvalle.edu.co

Received: August 23th, 2013. Received in revised form: December 20th, 2013. Accepted: January 21th, 2014

Abstract

During the last several decades, stronger and lighter materials have been developed with the aim of optimizing performance and building costs. These technological advances have given rise to thin flexible flooring systems with natural frequencies that lie within the frequency range of vibrations produced by human activity. Human occupants can cause changes in the dynamic properties of the structure and structural vibrations can cause discomfort to the occupants, who not only perceive the vibrations but also interact dynamically with the structure. This paper presents the results of the characterization of the effect of human-structure interaction (HSI) in three flooring systems commonly used in the Colombian building industry. The methodology consisted in the characterization of the dynamic response of the flooring systems due to different coordinated human activities. Based on the results, the authors recommend that future building codes account for human-structure interaction effects in flooring systems.

Keywords: Human-Structure Interaction, vibrations, dynamic response, slabs.

Resumen

Los avances tecnológicos de las últimas décadas han tendido al desarrollo de materiales más livianos y resistentes con el fin de optimizar costos y rendimientos en la construcción de losas. Estos avances han permitido el diseño y construcción de sistemas de piso más esbeltos y ligeros cuyas frecuencias naturales son cercanas al rango de frecuencias de excitación producidas por las personas en movimiento. Está demostrado que los humanos pueden provocar cambios en las propiedades dinámicas de las losas, y las vibraciones pueden producir sensación de inseguridad en las personas. Esta investigación presenta los resultados de la caracterización experimental del efecto de Interacción Humano-Estructura (IHE) en tres sistemas de entrepisos de común uso en el sector de la construcción colombiana. La metodología empleada consistió en la determinación de la respuesta mediante registros experimentales en las plataformas sometidas a diferentes actividades antrópicas. Al final del artículo se hace una recomendación para tener en cuenta los efectos de IHE en las losas en futuras normas de diseño.

Palabras Clave: Interacción Humano-Estructura, vibraciones, respuesta dinámica, losas.

1. Introducción

La tendencia hacia el uso de materiales más resistentes y livianos ha permitido el diseño y construcción de losas con largas luces, más esbeltas y ligeras. Esto hace que muchos sistemas de entrepiso tengan baja capacidad de disipación de energía y frecuencias naturales muy cercanas al rango de las frecuencias de excitación producidas por las personas en movimiento. En consecuencia, estos sistemas de entrepiso son susceptibles a vibraciones que frecuentemente causan incomodidad a los ocupantes y, en algunos casos, han generado daños estructurales y colapso. Muchos ejemplos han sido documentados sobre casos de vibraciones extremas producidas por personas al bailar, saltar o caminar en diferentes tipos de sistemas de piso [1-4]. En Colombia, el Reglamento de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10 [5] es muy limitado en cuanto a las recomendaciones para efectos dinámicos locales en estructuras (numeral B.4.7) e insuficiente para

garantizar el diseño adecuado de losas, puentes peatonales y graderías para cargas de servicio [1].

Los efectos de interacción en losas han sido ampliamente estudiados por diferentes autores. Allen et al. [6] y Ellis et al. [7,8], caracterizaron la carga dinámica producida por actividades rítmicas de una o más personas, formularon criterios de servicio y determinaron valores de coeficientes de Fourier en función del tiempo de contacto con la estructura y el periodo de salto [9]. Ebrahimpour et al. [10,11] y Yao et al. [12] cuantificaron la carga dinámica debida al salto de grupos de personas en función de las propiedades dinámicas de la estructura y la sincronización de las personas [13]. Recientemente, las investigaciones se han enfocado en determinar las frecuencias producidas por las personas y la forma como éstas afectan a la estructura, determinando factores de seguridad que varían según las normas de cada país [2]. Los resultados obtenidos demuestran que las actividades antrópicas generan cambios en las propiedades dinámicas de las estructuras

y además pueden llegar a provocar vibraciones que causan incomodidad y sensación de inseguridad en los usuarios. Esto se debe porque las personas no sólo perciben las oscilaciones, sino que simultáneamente interactúan con el entrepiso, actuando como un sistema dinámico adicional [3]. Pese a que el tema ha causado preocupación desde la década de los 80's, su impacto en los diferentes códigos internacionales de diseño y construcción no ha sido el esperado. Particularmente, la norma colombiana se limita a restringir la frecuencia natural vertical a un rango mayor a 5 Hz y emplea el enfoque tradicional en el que se involucra a los ocupantes humanos como una carga estática adicional.

Un ejemplo claro de las consecuencias que puede generar la excitación antrópica en una estructura ocurrió el 25 de abril de 2008 en el Estadio Guillermo Plazas Alcid en Neiva, Colombia, donde parte de la tribuna occidental se desplomó en pleno concierto musical dejando a una persona muerta y tres heridas [4]. Lo anterior demuestra que aun para entrepisos y otros elementos estructurales que no forman parte del sistema de resistencia sísmica, el comportamiento dinámico ante efectos de Interacción Humano-Estructura (IHE) debe ser verificado y tenido en cuenta en el análisis y diseño estructural. La IHE representa un campo relevante que debe ser considerado explícitamente en el reglamento de diseño colombiano mediante la disposición de valores límites de aceleraciones y frecuencias naturales en función del desempeño según niveles de seguridad y comodidad percibida. En este artículo se presentan los resultados de la caracterización de los efectos de IHE obtenidos a partir de ensayos experimentales realizados en tres sistemas de entrepiso sometidos a diferentes actividades antrópicas.

2. Plataformas experimentales

Para la determinación experimental de los efectos de IHE en los parámetros dinámicos de las losas, se construyeron tres sistemas de entrepiso diferentes cuadrados de 4 m de lado. Estas losas fueron apoyadas sobre cuatro celdas de carga ubicadas en la parte superior de cuatro columnas de sección transversal cuadrada de 0.36 m de lado y 1 m de altura, tal como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Descripción general de las plataformas experimentales

El diseño de las losas se realizó de manera que su configuración geométrica permitiera la realización segura de

ensayos con grupos de hasta 45 personas. La resistencia del concreto utilizada en cada entrepiso fue de 21 MPa. El entrepiso Tipo 1 (T1) mostrado en la Figura 2, corresponde a una losa en concreto reforzado armada en una dirección y aligerada con casetón en esterilla de guadua. Esta losa tiene una altura total de 0.40 m, un peso aproximado de 65 kN, y está compuesta por una loseta de 0.08 m de espesor, reforzada con malla electrosoldada de 4 mm, fundida sobre una cuadrícula de dos vigas y cinco viguetas cada una con altura de 0.32 m. La estructura se diseñó para que la frecuencia natural fuera superior a los cuartos y quintos armónicos producidos por las cargas humanas cuando están en movimiento [14].



Figura 2. Plataforma experimental T1: losa aligerada con casetón en esterilla de guadua [14]



Figura 3. Plataforma experimental T2: losa en Placa Fácil

El entrepiso Tipo 2 (T2) corresponde a una losa aligerada con ladrillo de arcilla cocida, comúnmente denominado como sistema *Placa fácil*, tal como se muestra en la Figura 3. El peso de esta losa es de aproximadamente 60 kN y consiste en una loseta de 0.06 m de espesor en concreto reforzado con malla electrosoldada de 6 mm (0.15 m x 0.15 m). Se utilizaron tres perfiles de acero estructural abiertos formados en frío, cuyas dimensiones finales fueron 130 mm de base, 90 mm de altura y 1.5 mm de espesor. Las vigas perimetrales en concreto reforzado tienen sección rectangular con un ancho de 0.25 m y una altura de 0.30 m.

El entrepiso Tipo 3 (T3), mostrado en la Figura 4, corresponde a un sistema de losa en *Steel Deck*. Este entrepiso está compuesto por una lámina estructural galvanizada calibre 22, con altura de nervadura de 0.05 m y

doble armado de malla electrosoldada de 4 mm. La losa está apoyada sobre perfiles metálicos en lámina delgada PHR C 220x80 con espesor de 2.5 mm formando una sección tipo cajón, los cuales transmiten las cargas a las cuatro columnas. El espesor total de esta losa es de 0.10 m incluyendo la altura del concreto y tiene un peso aproximado de 60 kN. Para garantizar que el conjunto de losa-viguetas se pueda considerar como sección compuesta, se utilizaron pernos industriales de 3/4" separados cada 0.61 m como conectores de cortante.



Figura 4. Plataforma experimental T3: losa en Steel Deck

3. Ensayos experimentales

Los ensayos de las losas se clasificaron siguiendo la propuesta de Alves et al. [15] quienes consideran dos tipos de carga: cargas sin pérdida de contacto y cargas con pérdida de contacto. Para el primer tipo de carga, se analizó la respuesta de los entrepisos con personas de pie y sin movimiento. Las actividades de las personas que forman parte de la segunda clasificación fueron: saltos, bailes en pareja y aeróbicos. La respuesta de las losas fue registrada mediante acelerómetros Endevco modelo 752A con ancho de banda $\pm 5\%$ de 1 a 8000 Hz ubicados en su parte inferior, en el centro, en las vigas perimetrales y en algunas viguetas. Además, las cuatro celdas de carga ubicadas en la parte superior de las columnas fueron usadas para registrar las fuerzas.

3.1. Cargas sin pérdida de contacto

Las cargas sin pérdida de contacto corresponden a las posturas estacionarias de las personas, bien sea sentadas o de pie, sobre una estructura. Para observar la variación de las propiedades dinámicas (razones de amortiguamiento y frecuencias naturales) de las losas ante este tipo de cargas, se realizaron ensayos de vibración forzada de las losas vacías, con sacos de arena y con grupos de personas hasta un máximo de 46 individuos. Las pruebas tuvieron una duración entre 300 y 600 s. Un actuador dinámico con una masa activa de 30.6 kg, ubicado en el centro de la losa (Ver Figuras 4, 5 y 6), fue empleado para generar fuerzas verticales sobre las losas. Se realizaron barridos frecuenciales lineales de excitación, entre 10 y 30 Hz, para garantizar que cada plataforma entrara en resonancia en su modo fundamental.

3.1.1. Ensayos sin carga adicional

Las propiedades dinámicas de los tres tipos de losas fueron determinados mediante ensayos de vibración forzada en cada una de ellas, sin carga adicional (Ver Figura 5).



Figura 5. Ensayo de vibración forzada en losa vacía

3.1.2. Ensayos con sacos de arena y personas

En los tres tipos de losas se realizaron ensayos de vibración forzada en los que se adicionó peso muerto, tanto por medio de sacos como con personas. Se realizó un aumento paulatino de esta carga con el fin de comparar la variación de la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento de cada una de las losas. Para el caso de los sacos de arena, se colocaron sobre las losas tal como se muestra en la Figura 4. El peso total de los sacos de arena se aumentó hasta llegar a valores de 6331 N, 4792 N y 6272 N para las plataformas experimentales Tipo 1, 2 y 3, respectivamente.

De manera similar, se aumentó el número de personas en postura erguida estacionaria sobre los tres tipos de losas hasta alcanzar una sobrecarga de 6600 N en la losa T1, 7070 N en la tipo T2 y 6760 N en la T3 (Ver Figura 6).



Figura 6. Ubicación del actuador dinámico y personas durante ensayos experimentales

3.2. Cargas con pérdida de contacto

Las cargas con pérdida de contacto son producidas por las personas cuando realizan actividades en las cuales temporalmente pierden contacto con la estructura. Algunos ejemplos de este tipo de carga son aquellas producidas por saltar, caminar, trotar, correr, bailar y hacer aeróbicos.

3.2.1. Ensayos con personas saltando

Se tomaron registros de vibraciones para obtener funciones de carga cuando las personas de manera individual y grupal realizaron saltos coordinados. Cada ensayo tuvo una duración de 40 segundos y consistió en la participación de 1 a 45 voluntarios, a los cuales se les pidió saltar siguiendo un metrónomo sonoro. Las pruebas se realizaron para cinco frecuencias de salto: 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 y 2.50 Hz, para abarcar el rango típico de frecuencias correspondientes a los saltos producidos por multitudes.

3.2.2. Ensayos con personas realizando aeróbicos y bailes

Las actividades rítmicas realizadas por personas en gimnasios, discotecas y salones de baile fueron reproducidas sobre las losas mediante ensayos de aeróbicos y bailes en pareja. La duración de las pruebas experimentales fue de 900 s, en los cuales los participantes bailaron según el género musical. Los géneros considerados fueron: salsa, merengue, bachata y reggaetón. Las rutinas de baile sincronizado (aeróbicos) fueron ejecutadas para diferentes números de individuos, alcanzando un máximo de 9 personas.

La Figura 7 muestra una de las rutinas de aeróbicos realizada para un total de 6 personas. Los ensayos de baile libre en parejas, contaron con la participación de un máximo de 5 parejas.

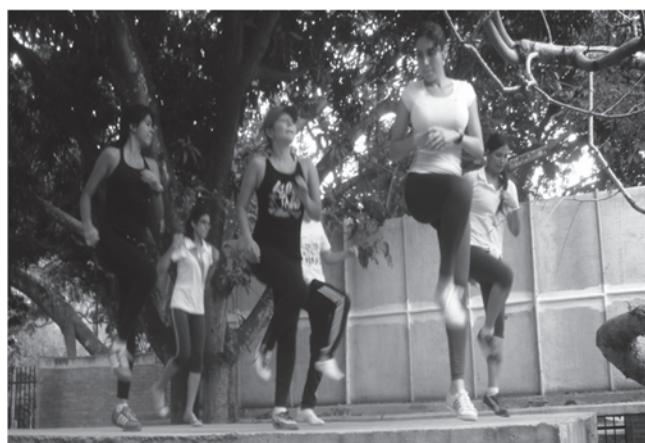


Figura 7. Ensayo con personas realizando aeróbicos

4. Resultados

Las propiedades dinámicas de las losas fueron obtenidas a partir de los registros de vibraciones utilizando algoritmos de identificación de sistemas dinámicos en el dominio de

frecuencias. El método empleado consiste en determinar la función de respuesta en frecuencia (FRF) y en realizar un ajuste de curva por medio de mínimos cuadrados para obtener una ecuación en el dominio de frecuencia. Esta ecuación se denomina modelo analítico y relaciona, a través de un cociente en el dominio complejo, la respuesta $Y(s)$ del sistema con la señal de entrada o excitación $U(s)$ [16]. En la Tabla 1 se especifican los valores experimentales de las frecuencias naturales y las razones de amortiguamiento del primer modo para cada uno de los tres sistemas de entrepiso.

Tabla 1.
Propiedades dinámicas de las losas vacías

Sistema Estructural	f_n [Hz]	ξ [%]
Losa con casetón de esterilla, (T1)	19.64	2.07
Losa Placa Fácil, (T2)	15.69	1.91
Losa Steel Deck, (T3)	14.51	1.70

En la Figura 8 se presenta la variación de la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento de cada uno de los sistemas de entrepiso en función de la masa adicional proporcionada por las personas y los sacos de arena. En esta figura se puede observar como la variación en la masa total de las personas y sacos de arena produce tendencias opuestas en el cambio de la frecuencia natural. Villamizar *et al.* en [17] demostraron de manera analítica y experimental que esta variación ocurre en sistemas donde la rigidez de la estructura es mayor a la de las personas y el segundo modo es predominante. Esta diferencia en las propiedades dinámicas de ambos sistemas (losa-personas) ocasiona la separación de frecuencias a medida en que se incrementa la razón de masas entre ellos. Como resultado, la frecuencia predominante asociada al segundo modo del sistema losa-personas aumenta y la frecuencia fundamental disminuye [18].

Los resultados de los ensayos con pérdida de contacto en los cuales la excitación es producida por los saltos de personas fueron clasificados en función del número de personas que realizaron los saltos y en términos de la representación de la carga. Esta representación puede ser estática, a través de la determinación del Factor de Impacto (K_p) el cual es la relación de la carga producida por la persona al momento de saltar y la producida sin estar en movimiento, o dinámica, por medio de la obtención de los coeficientes de Fourier [14].

Tabla 2.
Factor de impacto máximo para salto individual

K_p máx	Peso [N]	Frecuencia de Excitación [Hz]				
		1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
Losa 1	568.4	3.96	2.83	3.63	3.96	4.10
Losa 2	588.0	3.16	3.45	3.10	3.21	3.63
Losa 3	509.6	3.55	4.79	4.70	5.10	5.11

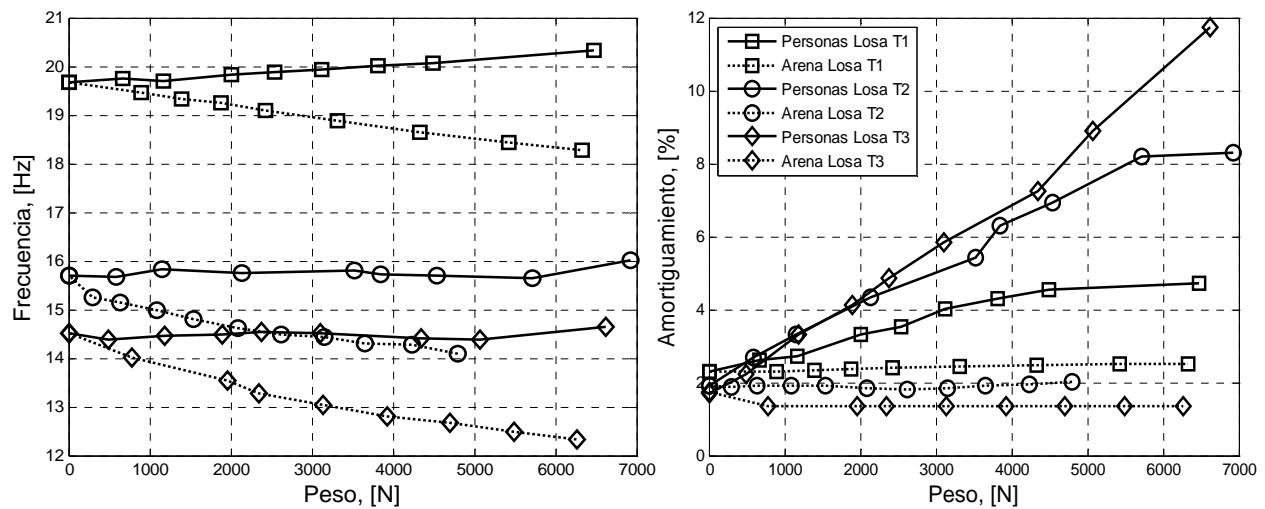


Figura 8. Variación de las propiedades dinámicas de las losas

Las Tablas 2 y 3 contienen los valores máximos y promedios de los factores de impacto (K_p), obtenidos para saltos individuales en los tres sistemas de entrepiso. En la caracterización dinámica de la fuerza generada por saltos de personas, la determinación de los coeficientes de Fourier constituye un elemento importante. Los valores obtenidos para los coeficientes de Fourier están influenciados por factores tales como la edad, sexo, la habilidad y forma como cada persona realiza el salto [19]. También, el tipo de calzado empleado durante la prueba, aspectos de personalidad, la sincronización y hasta la motivación del individuo en el momento de los ensayos.

Tabla 3.
Factor de impacto promedio para salto individual

K_p prom	Peso [N]	Frecuencia de Excitación [Hz]				
		1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
Losa 1	568.4	2.73	2.21	2.92	3.35	3.43
Losa 2	588.0	1.65	1.49	1.31	1.29	1.32
Losa 3	509.6	2.81	3.21	3.67	4.68	4.56

La Tabla 4 muestra los valores de los coeficientes de Fourier para la carga producida por personas al saltar recomendados por el Comité Euro-International du Béton (CEB) en 1991 [19] y los valores obtenidos en esta investigación para los tres sistemas de entrepiso.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos en otras investigaciones tales como las desarrolladas por la Universidad Federal de Río de Janeiro [19], las recomendaciones propuestas por Bachmann *et al.* [20],

las deducciones de Rainer *et al.* [21], la revisión de la literatura realizada por investigadores de la Universidad de Sheffield [22] y los trabajos de caracterización de efectos IHE en la Universidad del Valle [14,23].

Tabla 4.
Coeficientes de Fourier para sistemas de entrepiso

Saltos sobre losas	Coeficiente de Fourier		
	A_1	A_2	A_3
Valores del CEB [10]	1.80	1.30	0.70
Losa aligerada con casetón [6]	1.60	0.90	0.40
Losa Placa Fácil	1.30	0.62	0.45
Losa Steel Deck	1.50	0.85	0.54

La caracterización de cargas producidas por el salto de grupos de personas incluye los valores máximo y promedio de los Factores de Impacto K_p en función del peso de los participantes para cada una de las frecuencias de salto. La Figura 9 muestra los valores máximos de Factores de Impacto obtenidos para saltos con grupos de personas en los tres sistemas de entrepiso y las diferentes frecuencias de vibración que se pudieron identificar. Cabe resaltar que estas frecuencias están relacionadas al segundo modo.

La Figura 10 representa los Coeficientes de Fourier obtenidos para los tres primeros armónicos de cada sistema de entrepiso en función del peso de las personas para una frecuencia de excitación de 2 Hz.

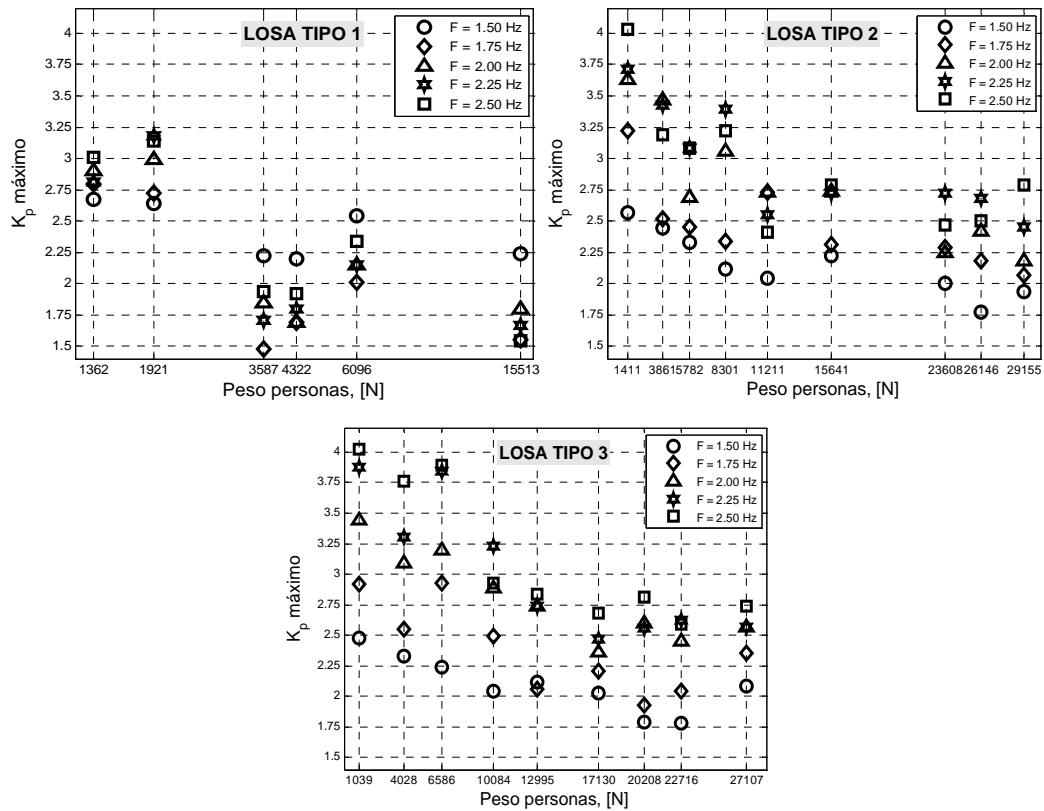


Figura 9. Factores de impacto máximos para saltos de grupos de personas

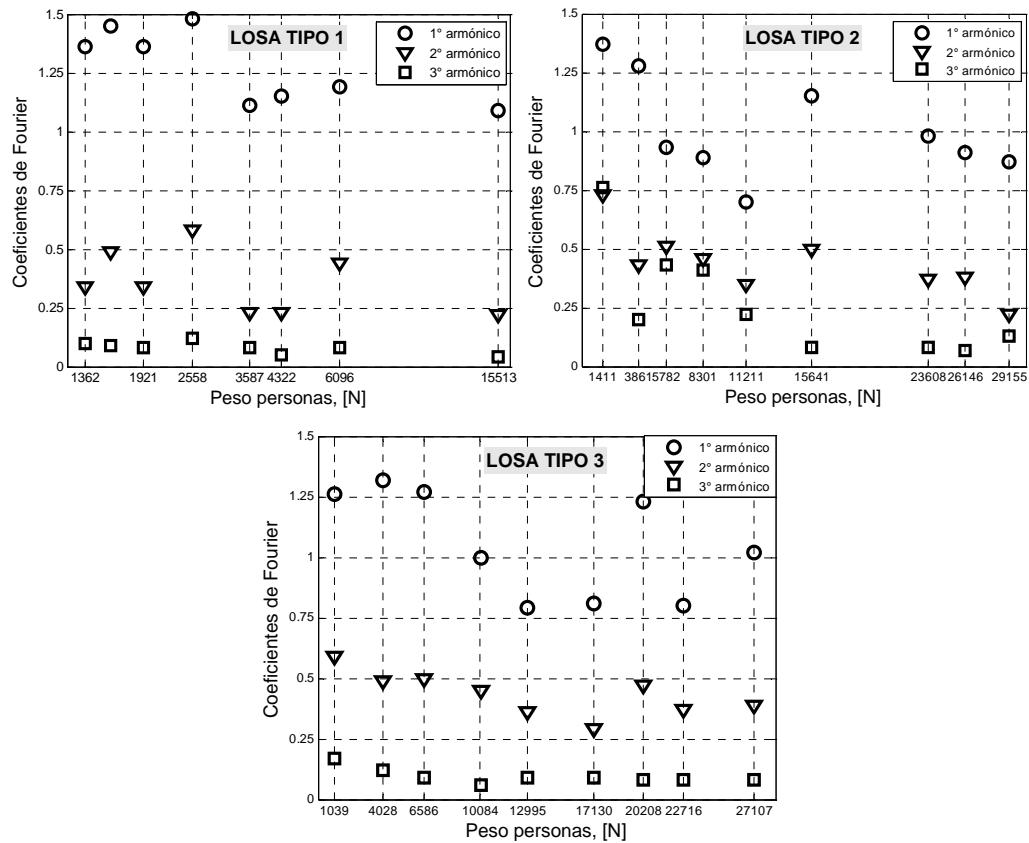


Figura 10. Coeficientes de Fourier en función del peso de las personas

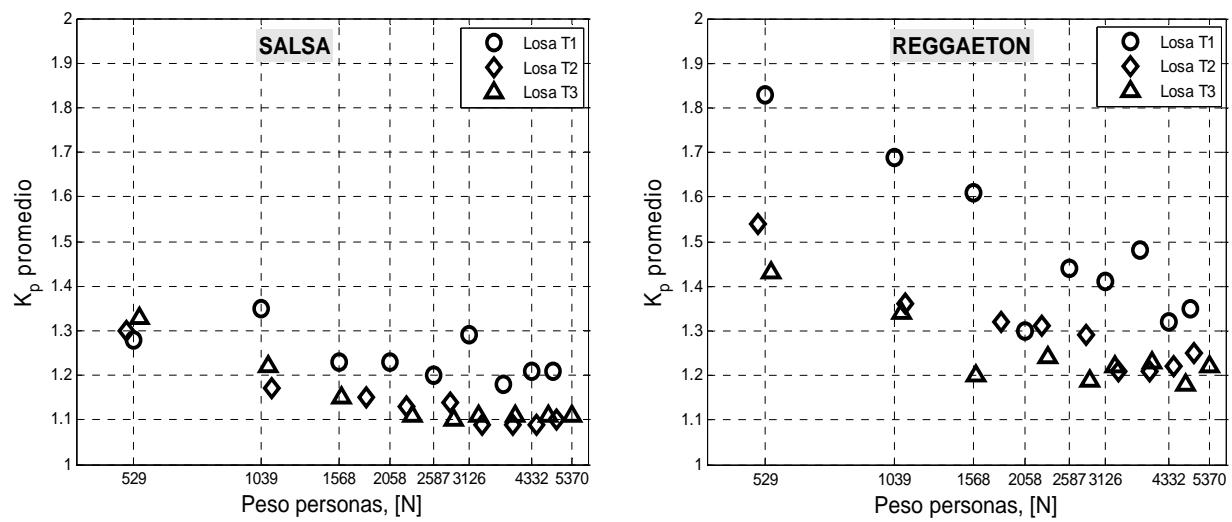


Figura 11. Factor de impacto máximo para baile sincronizado

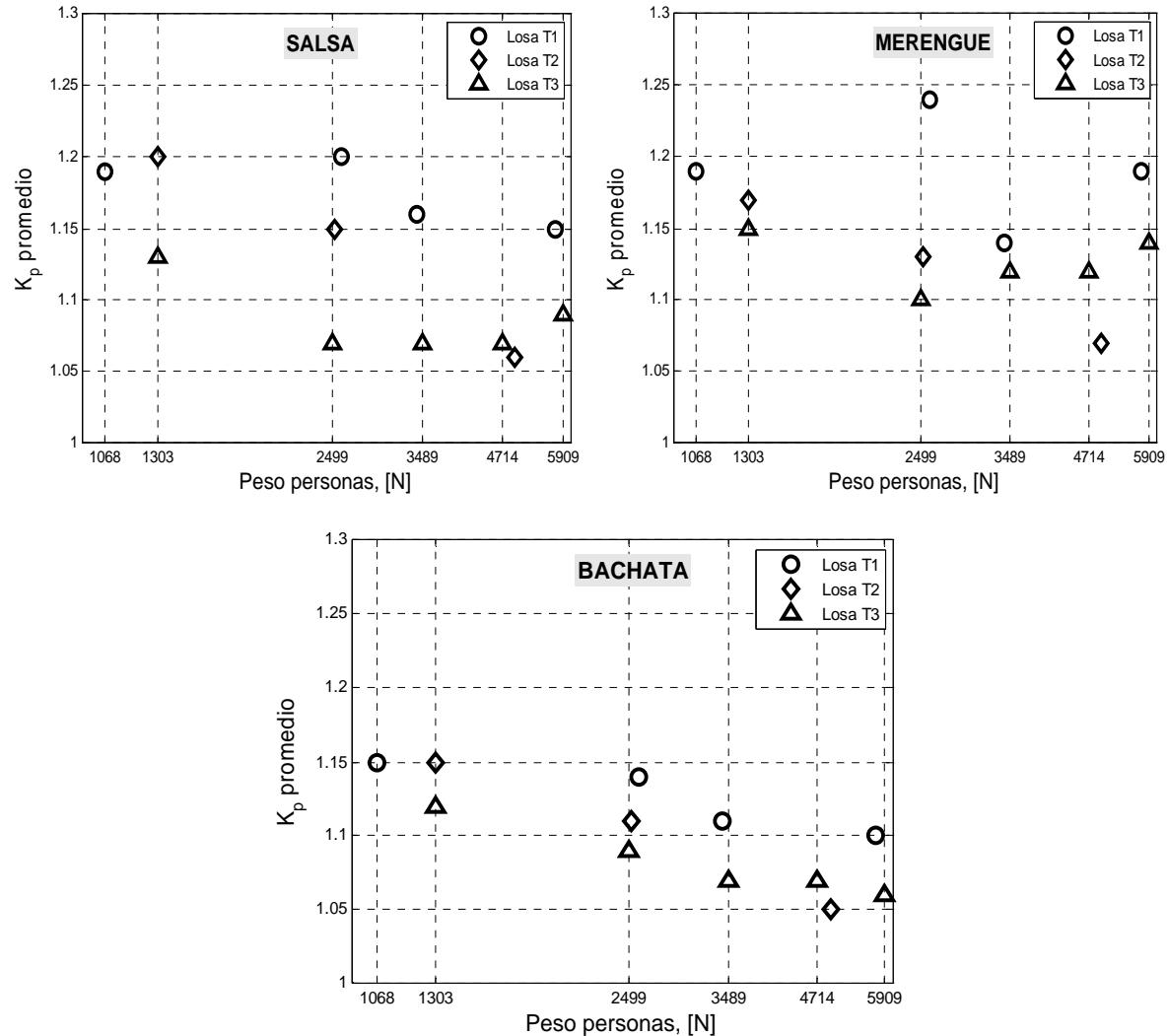


Figura 12. Factor de impacto para baile en pareja

La Figura 11 presenta los Factores de Impacto obtenidos experimentalmente para baile sincronizado (aeróbicos) correspondiente a los géneros salsa y reggaeton, sobre los tipos de losas construidos. Se puede observar que a medida que se incrementa el número de participantes en cada ensayo el factor de impacto disminuye hasta alcanzar un valor constante. La Figura 12 muestra los Factores de Impacto para los géneros musicales de salsa, merengue y bachata, obtenidos experimentalmente en cada sistema de entrepiso para bailes en pareja.

4. Conclusiones

La caracterización experimental de efectos producidos por las personas sobre las estructuras es compleja porque depende de factores físicos y psicológicos propios de cada persona (estatura, peso, edad, sexo, personalidad, sincronización, entre otros). Pese a la influencia de estos factores en las propiedades dinámicas de las losas, se logró establecer valores de frecuencias naturales y razones de amortiguamiento viscoso en el sistema losa-personas para cargas sin pérdida de contacto. Para las cargas con pérdida de contacto se obtuvo experimentalmente los valores de K_p y de los Coeficientes de Fourier.

Al analizar la respuesta en los tres tipos de plataformas de pruebas ante cargas sin pérdida de contacto, los efectos de IHE se hacen evidentes al comparar la respuesta dinámica del sistema losa-masa muerta con la respuesta del sistema losa-personas. Un aumento progresivo de la carga muerta mediante sacos de arena generó una disminución en la frecuencia natural, como es de esperarse. Por otro lado, un aumento paulatino en el número de personas en postura erguida estacionaria sobre la losa, generó la interacción con el sistema de entrepiso. Esto se evidenció en que el segundo modo del sistema acoplado se vuelve el predominante y el primer modo no fue identificable en los registros. Por lo tanto, contrario a la intuición, la frecuencia del modo predominante junto con su razón de amortiguamiento aumenta.

Para el caso cargas con pérdida de contacto, se evaluó la respuesta dinámica en los tres sistemas de entrepiso para actividades tales como, saltar y bailar. Las frecuencias asociadas a los segundos armónicos de estas actividades pueden llegar a ser igual o superior al criterio establecido por la norma NSR-10 en el numeral B.4.7. Por lo tanto, se recomienda que este límite en frecuencia sea reevaluado y que, además, en la normas de diseño se incluya un criterio de aceleración en función del tipo de uso que va a tener el sistema de entrepiso. Es importante recalcar que las pruebas experimentales se realizaron en losas sin muros, ya que los muros y otros elementos no estructurales tienden a aumentar el amortiguamiento y disminuir la respuesta dinámica en una estructura convencional.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle y COLCIENCIAS por la financiación del proyecto

"Desarrollo de una guía de diseño estructural para disminuir el efecto de la interacción humano-estructura en estructuras civiles" contrato No. 382-2009.

Referencias

- [1] Sánchez, J. A., Gómez, D. y Thomson, P., Análisis de la interacción humano-estructura en puentes peatonales de Santiago de Cali, Revista Dyna, No. 177, pp. 86-94, 2013.
- [2] Ortiz, A. R., Gómez, D. y Thomson, P., Caracterización del efecto de interacción humano-estructura en el estadio olímpico de Cali, Colombia, Revista Ingeniería e Investigación, No. 29, pp. 13-23, 2009.
- [3] Ortiz, A. R., Gómez, D., Thomson, P., Efecto de la interacción humano-estructura en las propiedades dinámicas de una tribuna, Revista Ingeniería y Competitividad, Vol. 14 (1), pp. 63-73, 2012.
- [4] Hernández, D., Gómez, D. y Thomson, P., Implementación de un sistema de control activo para disminuir las vibraciones producidas por personas en una tribuna, Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, No. 61, pp. 83-92, 2011.
- [5] AIS., Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, 2011.
- [6] Allen, D. E., Rainer, J.H. and Pernica, G., Vibration criteria for assembly occupancies, Canadian Journal of Civil Engineering, No. 12(3), pp. 617-623, 1985.
- [7] Ellis, B. R. and Ji, T., Floor vibration induced by danced-type loads: theory, The Structural Engineer, No. 72(3), pp. 37-44, 1994.
- [8] Ellis, B. R. and Ji, T., Floor vibration induced by danced-type loads: verification, The Structural Engineer, No. 72(3), pp. 45-50, 1994.
- [9] Li, W. W., Wong, C.T., Leung, M. K. and Fung, S. C., Floor vibration due to human rhythmic activities: Tin Shui Wai Public Library Cum Indoor Recreation Centre, Procedia Engineering, No. 14, pp. 3285-3292, 2011.
- [10] Ebrahimpour, A., Hamam, A., Sack, R.L. and Patten, W.N., Measuring and modeling dynamic loads imposed by moving crowds, Journal of Structural Engineering, No. 122(12), pp. 1468-1474, 1996.
- [11] Ebrahimpour, A. and Sack, R.L., A review of vibration serviceability criteria for floor structures, Computers and Structures, No. 83(28), pp. 2488-2494, 2005.
- [12] Yao, S., Wright, J., Pavic, A. and Reynolds, P., Experimental study of human-induced dynamic forces due to jumping on a perceptibly moving structure, Journal of Sound and Vibration, No. 296(1), pp. 150-165, 2006.
- [13] Sachse, R., Pavic, A. and Reynolds, P., Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: A literature review, The Shock and Vibration Digest, No. 35(1), pp. 3-18, 2003.
- [14] Ortiz, A., Caracterización de efectos de interacción humano-estructura, [Proyecto de grado Maestría en Ingeniería], Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- [15] Alves, N. K. C., Roitman, N. and Magluta, C., Dynamic response under human movements, Materials and Structures, No. 32, pp. 31-37, 1999.
- [16] Gómez, D., Comparison of the identification of a structural system with active control using frequency response and neural networks, Revista Dyna, No. 170, pp. 79-89, 2011.
- [17] Villamizar, S., Riascos, C. y Thomson, P., Validación teórica de un modelo experimental de Interacción Humano-Estructura, VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Bucaramanga, 2013.
- [18] Brownjohn, J.M.W., Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction, Shock and Vibration, No. 8, pp. 315-323, 2001.

- [19]González, R., Caracterización de cargas dinámicas generadas por actividades rítmicas, [Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Civil], Universidad Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, Brasil, 2003.
- [20]Bachmann, H., Pretlove, A. and Rainer, H., Vibrations problems in structures: Practical guidelines, dynamic forces from rhythmical human body motions (Appendix G), Basel: Birkhäuser, 1995.
- [21]Rainer, J., Pernica, G. and Allen, D., Dynamic loading and response of footbridges, Canadian Journal of Civil Engineering, No. 15, pp. 66-71, 1988.
- [22]Zivanoc, S., Pavic, A. and Reynolds, P., Human-structure dynamic interaction in footbridges, Proceedings of the ICE-Bridge engineering, No. 158, pp. 165-177, 2005.
- [23]Villamizar, S., Efecto de interacción humano-estructura en losas, [Proyecto de grado Maestría en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Civil], Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2013.

Thermal insulation produced from rice husk agglomerated using starch produced by *Saccharomyces cerevisiae*

Aislamiento térmico producido a partir de cascarilla de arroz aglomerada utilizando almidón producido con *Saccharomyces cerevisiae*

Jaime Gutiérrez M.D. ^a, Carolina Cadena ^b & Antonio Bula ^c

^a M.Sc CORE Biotechnology-Bioengineering Barranquilla, Colombia jgutierrez@bybcore.com

^b Ing. CORE Biotechnology-Bioengineering Barranquilla, Colombia

^c Ph.D., Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad del Norte, Colombia. abula@uninorte.edu.co

Received: February 22th, 2013. Received in revised form: November 08th, 2013. Accepted: December 02th, 2013

Abstract

Rice husk was agglomerated using different starch in order to obtain a required physical stability, with no effect in the thermal insulation properties. A process was developed using *Saccharomyces Cerevisiae* to produce the interior cavities in the agglomerate. The material was subjected to heating, loading, and to the ASTM C 177 test to evaluate the thermal conductivity. The tests showed that the material supports direct fire without producing any flame, it has an ultimate strength of 80 – 120 kPa when tested at temperatures ranging between 150 – 200 C. The thermal conductivity was found close to 0.09 W/m.K. At outdoor conditions (Dry bulb temperature: 30°C ± 5°C, Relative humidity: 80% ± 15%) the material was not attacked by natural fungus. The material can be recycled easily by nature, dissolving in the presence of water. These properties showed that the rice husk base agglomerated is an efficient thermal insulation, with an acceptable physical and chemical stability, suitable for engineering applications and environmental friendly.

Keywords: thermal insulation, natural resources, ecological materials, industrial bioprocesses, *S. Cerevisiae*.

Resumen

Se aglomeró cascarilla de arroz usando almidones con el fin de obtener un material con estabilidad física adecuada, sin afectar su capacidad aislante. Para esto, se desarrolló un proceso que integró *Saccharomyces Cerevisiae* (SC) como elemento productor de porosidades en el material. Posteriormente se sometieron las probetas a pruebas de resistencia al calor, flexión y finalmente a la norma ASTM C 177, para evaluar su conductividad térmica. De esta forma, se encontró que el aglomerado al ser sometido a fuego directo no produce llama (ignífugo), tiene una resistencia a la rotura entre 80 – 120 kPa al ser sometido a temperaturas entre 150 y 200 °C, la conductividad térmica del aglomerado se encuentra alrededor de 0,09 W/m.K. El aglomerado se dejó a la intemperie (Temperatura de bulbo seco: 30°C ± 5°C, Humedad relativa: 80% ± 15%), donde su estabilidad química se aprecia al no ser atacado por hongos, y su biodegradabilidad se manifiesta al ser disuelto por agua. Estos valores muestran que el aglomerado a base de cascarilla de arroz es un aislante térmico eficiente, con una estabilidad física y química adecuada para aplicaciones civiles.

Palabras Claves: aislamientos térmicos, recursos naturales, materiales ecológicos, bioprocessos industriales, *S. Cerevisiae*.

1. Introducción

Las propiedades termoaislantes de la cascarilla de arroz han venido siendo utilizadas de manera artesanal desde hace mucho tiempo [1-3]. Debido a ello, se han generado iniciativas encaminadas a aprovechar ésta propiedad natural en el desarrollo de nuevos materiales con aplicaciones industriales, que sin embargo han buscado aligerar el peso de los materiales de construcción antes de convertirse en materiales aislantes. Este trabajo presenta los resultados obtenidos al incorporar elementos biometabólicos al proceso de fabricación de un aglomerado a base de

cascarilla de arroz para ser usado como aislamiento térmico.

Por medio de pruebas de laboratorio, fue demostrado [4] que era factible aglomerar la cascarilla de arroz con elementos naturales y subproductos agrícolas obteniendo valores competitivos de conductividad térmica, y se determinaron tres puntos de trabajo principales: (1) mejorar el desempeño de estos materiales aumentando la porosidad en su estructura, ya que los aglomerados que presentan menor densidad (mayor presencia de porosidades) fueron los de mejor desempeño en su conductividad térmica, (2) mejorar la estabilidad física de los aglomerados, ya que a pesar de ser efectivos como aislantes, tenían una limitada

estabilidad física, desintegrándose con relativa facilidad, dejando escapar cascarilla en el proceso, (3) usar almidón como adherente, ya que es adecuado para la aglomeración de fibras naturales y es biodegradable.

Con estas recomendaciones, se exploraron maneras de generar una matriz para la aglomeración de la cascarilla, que brindara mayor estabilidad física, sin perder capacidad termoaislante, y adicionalmente, buscar un método para generar porosidades en este aglomerado, manteniendo el carácter ecológico, y de bajo costo del material y su proceso de producción. Se diseñó un proceso en el que se somete una mezcla de almidones naturales y cascarilla de arroz, a la acción de una cepa de la levadura, *Saccharomyces Cerevisiae*, para aprovechar su capacidad metabólica productora de gas, con el fin de generar múltiples y diminutas burbujas (porosidades) dentro del material, que luego se lleva a secado para lograr estabilidad física.

2. Componentes del proceso

Se utilizó almidón a base de harina de trigo, el cual es un polisacárido de origen vegetal, altamente polimérico, que usualmente está compuesto por unidades lineales (Amilosa) y otras ramificadas (Amilopectina), orientadas y asociadas en una estructura reticular cristalina, insoluble en agua fría y resistente a las enzimas hidrolíticas naturales.

La Figura 1 muestra la levadura industrial (*Saccharomyces Cerevisiae*), la cual es un hongo unicelular de la clase de los *Hemiascomycetes*, parte del grupo de los Mohos, el mayor y más importante para la biotecnología. Representantes de esta clase de organismos se encuentran corrientemente en el suelo, y en este medio, puede utilizar un gran número de compuestos orgánicos diferentes para sus procesos celulares. Las levaduras son células individuales estiradas que van de 3 a 5 μm de longitud. Los hongos descomponen materia orgánica para obtener energía, y en este proceso, las levaduras especialmente, producen gas.

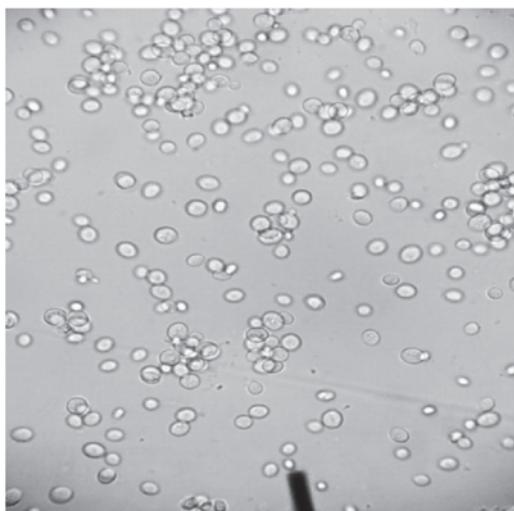


Figura 1. *Saccharomyces Cerevisiae*. Dilución 1:100 (Tomado de [5])

A pesar de que los mohos son agobios, las levaduras han desarrollado la habilidad de ser facultativas, y en ausencia

de oxígeno obtienen energía por fermentación, convirtiendo el azúcar en alcohol. Los hongos, y en especial las levaduras, pueden tolerar condiciones ambientales extremas, pudiendo vivir en climas relativamente secos, pues obtienen agua del aire. El pH óptimo para su crecimiento es generalmente 5.5, pero toleran un intervalo de 2 a 9. La temperatura óptima de crecimiento para la mayoría de los hongos es el intervalo mesóflico de 22 a 30 °C, pero existen cepas que resisten los 0 °C, y otras que crecen cómodamente a 60°C [6].

La cascarilla de arroz es el recubrimiento del grano de arroz, su tamaño oscila entre los 5 y 11 mm. Su apariencia superficial es irregular con un patrón de ranuras longitudinales (superficie 'dentada') que le confieren propiedades altamente abrasivas. La Figura 2 muestra cascarilla de arroz aglomerada para producción de bioaislantes térmicos. Esta se obtiene a través del proceso de procesamiento del grano para consumo humano, en la que es considerada un desecho. La composición química aparece en la Tabla 1.



Figura 2. Cascarilla de arroz. (Tomado de [4])

Tabla 1.
Composición química de la cascarilla de arroz [7]

Elemento	% en peso
Carbono	39 - 42
Oxígeno	32 - 34
Minerales	14 - 24
Hidrógeno	4 - 5
Nitrógeno	0.3 - 2

Tiene gran cantidad de poros en su interior, los cuales representan un 54% de su volumen, lo que le confiere gran capacidad termoaislante. Su coeficiente de conductividad térmica k es comparable a la del corcho granulado o lana mineral, convirtiéndola en candidata para usarla como componente de sistemas de aislamiento térmico [8]. La Tabla 2 presenta valores de conductividad térmica de aislamientos térmicos y el de la cascarilla de arroz para propósitos de comparación.

Tabla 2.

Conductividad térmica de diferentes aislantes comúnmente [9]

Material	Temperatura (°C)	K (W/m.K)
Corcho Corrugado	32	0.064
Corcho Aglomerado	32	0.045
Fibra de Vidrio	20	0.038
Poliestireno expandido – 20	30	0.033
Fieltró semi rígido	147	0.063
Oxido de magnesio	147	0.061
Cascarilla de arroz (authors)	50	0.036
Lana mineral	50	0.030

Tabla 3.

Análisis químico de la ceniza de cascarilla de arroz [7]

Compuesto	% en peso	
SiO ₂	90 - 97	
K ₂ O	0.6 - 2.5	
Na ₂ O	0.6 - 1.8	
CaO	0.1	1.9
MgO	0.2	1.5
Fe ₂ O ₃	0.3	
P ₂ O ₅	0.1	1.1
SO ₃	0.1 - 1.1	
Cl	0.1 - 0.4	

La cascarilla presenta un contenido de humedad del 9.08 %, con una densidad de 92 kg/m³, y un poder calorífico

mínimo de 14.22 MJ/kg. Presenta propiedades ignífugas, es decir que no inicia la combustión fácilmente, hecho que responde a la composición química de la cascarilla de arroz en la que predomina el dióxido de Silicio (SiO₂) conformando el esqueleto de la cascarilla. Esto se puede verificar al analizar la ceniza de cascarilla. El análisis químico se presenta en la Tabla 3.

3. Preparación de aglomerados a base de cascarilla de arroz y almidones, procesados con *Saccharomyces cerevisiae*

Se aglomera la cascarilla de arroz con la mezcla de almidones, a la cual se agrega el *Saccharomyces Cerevisiae* previamente hidratado y activado. El SC durante su proceso metabólico produce CO₂, el cual es atrapado en el aglomerado generándose con ello espacios vacíos que teóricamente deben mejorar las condiciones de aislamiento del material producido.

Para probar la mezcla, se fabricaron dos tipos probetas de sección transversal cuadrada de 200 mm x 200 mm, espesor de 10 mm, para realizar la prueba de conductividad térmica, según la norma ASTM C 177 – 97 (Standard Test Method for Steady – State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties By Jeans of the Guarded – Hot – Plate Apparatus).

Las características de cada una de las probetas se presentan en la Tabla 4. Para activar la levadura, se disuelven 15 gramos de SC en 600 ml de agua. Para realizar la prueba de flexión bajo condiciones de alta temperatura, se fabricaron 15 probetas de sección transversal de 36 mm x 10 mm, y longitud de 250 mm, con la receta de la probeta 1

Tabla 4.

Características de las probetas construidas.

Probetas	Agua, gr	Harina de trigo, gr	Saccharomyces Cerevisiae diluida en agua, ml	Cascarilla de arroz, gr	Fermentación, min	Temperatura del horno, °C	Tiempo, min	Azúcar, gr
1	196	250	10	60	120	200	45	0
2	196	250	10	60	120	200	45	5

4. Resultados y análisis

Las probetas fueron construidas de manera idéntica, sin embargo al ser sometidas a calentamiento sus dimensiones cambian y por ello es necesario medir el área efectiva al final de dicha prueba, de tal forma de poder obtener resultados confiables sobre el esfuerzo corte final.

4.1. Prueba de resistencia al calor

Consistió en someter cinco probetas a temperaturas de 150, 175 y 200 °C respectivamente, para observar si se producía pérdida de la estabilidad física, o si en algún momento se producía ignición del material. El calentamiento del material fue llevado a cabo en un horno de temperatura controlada y las probetas permanecieron 2

horas a la temperatura establecida contados a partir del momento en que se alcanzaba este valor en el horno.

4.1.1. Prueba a 150 °C

Se colocaron diez probetas en el horno hasta alcanzar 150°C de temperatura. Luego de este procedimiento, se midieron las probetas, observándose que no se presentaron cambios en su estabilidad física. El único cambio macroscópico perceptible fue la aparición de coloración amarillenta, probablemente generado por la degradación del almidón. El estado final de la probeta se observa en la Figura 3.



Figura 3. Probetas ensayadas a 150 °C.

4.1.2. Prueba a 175 °C

Se colocaron diez probetas en el horno hasta alcanzar 175°C de temperatura. Durante este procedimiento, se observó que las probetas se curvaron aproximadamente a los 30 minutos de iniciada la prueba. No se presentó otro cambio físico en las probetas. El estado final de la probeta se observa en la Figura 4.



Figura 4. Probetas ensayadas a 175 °C.

4.1.3. Prueba a 200 °C.

Se colocaron diez probetas en el horno hasta alcanzar 200°C de temperatura. Esta prueba fue necesaria suspenderla a los 60 minutos por la abundante producción de humo. Se verificó que no se presentó producción de llama, pero si apareció carbonización sobre la superficie del material. El estado final de la probeta se observa en la Figura 5.



Figura 5. Probetas ensayadas a 200 °C.

4.2. Prueba de flexión

Se tomaron cinco probetas de cada ensayo de resistencia al calor, se ubicaron sobre dos soportes y se les sometió a un incremento progresivo de carga en su punto medio, midiendo el desplazamiento producido por cada incremento en la carga, hasta romperlas. En la tabla 5 se listan las características geométricas definitivas de las probetas procesadas una vez han sido sometidas al proceso de calentamiento.

Para el cálculo del momento de inercia se tuvo en cuenta que la sección transversal de las probetas es rectangular, con lo que se tiene:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

Tabla 5.
Probetas sometidas a flexión

Temp. °C	Base (b) m	Altura (h) m	Área m ² (x10 ³)	Momento de inercia (I), m ⁴ (x10 ⁹)
200	3,66E-02	1,09E-02	0,39976	3,97
	3,81E-02	9,66E-03	0,36786	2,86
175	3,72E-02	9,60E-03	0,35727	2,74
	3,44E-02	1,04E-02	0,35819	3,24
150	3,82E-02	9,37E-03	0,35757	2,61
	3,58E-02	9,59E-03	0,34292	2,62

Para el cálculo del esfuerzo flector de rotura, $\sigma_{flexión}$ [10] se tiene en cuenta que la prueba de carga – desplazamiento se llevó a cabo para una viga simplemente apoyada, con lo que la ecuación que define el esfuerzo está dada por:

$$\sigma_{flexión} = \frac{PLh}{4I} \quad (2)$$

Donde P es la fuerza y L es la longitud entre apoyos. Con esto se obtuvieron los valores que se presentan en la Figura 6.

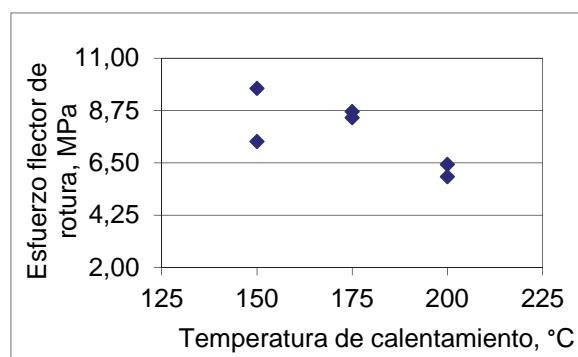


Figura 6. Variación del esfuerzo flector de rotura con la temperatura de calentamiento

Las pruebas realizadas muestran que el aislante a base de cascarilla de arroz presenta alta resistencia a la degradación por temperatura, soportando hasta 175°C presentándose solamente cambio de color. Y al ser sometido a temperaturas superiores a 175°C se carboniza sin presentar llama. Comparado con materiales aislantes como el poliestireno expandido - 20, es muy superior dado que el anterior sólo soporta hasta 80°C, y al ser sometido a temperaturas superiores puede incendiarse o fundirse totalmente. Referente a la resistencia a la flexión del material, vemos que presenta una falla frágil alcanzándose valores últimos que fluctúan entre 5.91 y 9.71 MPa, a 200°C y 150°C respectivamente. Comparado con el poliestireno expandido - 20 que presenta un valor de 0.21 MPa, este valor es mucho mayor, y es además capaz de soportar carga incluso a altas temperaturas. Vale la pena anotar, que el esfuerzo último se ve afectado por el aumento de temperatura, produciéndose un deterioro en la capacidad del material de soportar carga.

La Tabla 6 muestra valores de algunos materiales aislantes comúnmente utilizados en la industria como elemento de comparación con el material aglomerado de cascarilla de arroz.

Tabla 6.
Propiedades de algunos aislantes térmicos comunes.

Material	Temperatura de trabajo máxima (°C)	Esfuerzo último (MPa)	Bio degradación, años
Corcho	200	0.50 – 4.00	0.25
Corrugado	[14]	[10]	[12]
Corcho	200	0.50 – 4.00	0.25
Aglomerado	[11]	[10]	[12]
Poliestireno expandido - 20	80	0.21 – 0.80	3000 – 5000
	[13]	[10]	[14]
Aglomerado de Cascarilla de arroz	175	5.91 – 9.71	0.1

Otro punto importante al momento de evaluar los aislantes es la capacidad de poder ser absorbidos nuevamente por la naturaleza. Específicamente se muestra la biodegradabilidad, o el tiempo requerido para llevar el material a sus componentes básicos.

La Figura 7 muestra la deflexión que sufre el material al ser sometido a una prueba de flexión tras haber sido sometido a calentamiento.

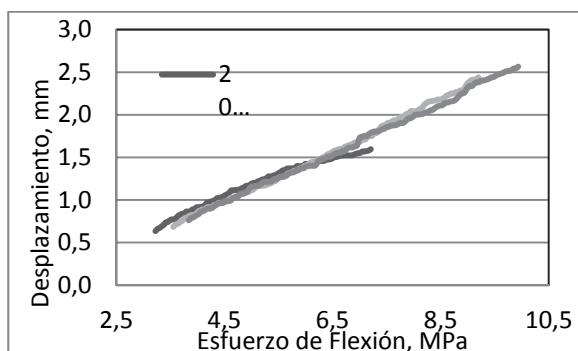


Figura 7. Deflexión contra esfuerzo de flexión para probetas sometidas a diferentes niveles de calentamiento.

Al analizar los datos obtenidos se observa que las probetas del grupo sometidas a calentamiento de 150 y 175 °C, tuvieron un desempeño similar, levemente mejor para las de 150 °C. En cambio las probetas del grupo sometido a calentamiento a 200 °C, mostraron un marcado deterioro de la capacidad portante del material. A pesar de reducirse la capacidad del material de deformarse con el aumento de la temperatura, se observa que las curvas son similares, produciéndose un desplazamiento casi paralelo de las tres curvas. Se observa que el nivel de temperatura afecta la resistencia a la flexión del material, produciéndose la rotura a menores niveles de esfuerzo.

Para determinar el módulo de Young a la flexión, $E_{flexión}$ [10] se utilizó la ecuación que define la deflexión para una viga simplemente apoyada, la cual se expresa como:

$$E_{flexión} = \frac{PL^3}{48\delta I} \quad (3)$$

Los valores obtenidos muestran que este valor casi no sufre variación con el calentamiento de las probetas, obteniéndose valores que fluctúan entre 1.97 y 2.23 MPa.

4.3. Prueba de conductividad térmica

Las dos probetas fueron sometidas a pruebas de acuerdo a la norma ASTM C 177 – 97, con un analizador automático ANACON TCA 88. Los resultados de caracterización térmica arrojaron los resultados que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.
Valores de conductividad térmica y características de las probetas sometidas a la norma ASTM C - 177.

Probeta	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	Conductividad Térmica (W/(m.K))
1	21.59	439	0.0968
2	29.72	439	0.1510

El resultado demuestra que la probeta número 1 es un material con una capacidad aislante equivalente a la de los materiales disponibles en el mercado.

5. Conclusiones

Del análisis de los anteriores resultados se puede concluir que el material compuesto desarrollado a partir de cascarilla de arroz presenta valores de conductividad térmica que se encuentran en el mismo orden de magnitud de materiales históricamente utilizados para tal fin como son el poliestireno expandido y el corcho. Se encontró también, que el material compuesto tiene una resistencia a la flexión mucho mayor que el poliestireno expandido y el corcho, superando al primero por un orden de magnitud y teniendo valores similares al segundo.

Desde el punto de vista de biodegradabilidad, se encontró que este material supera a cualquier otro material aislante, siendo esta tal vez su principal característica, pues

es llevado nuevamente a sus componentes principales (que son naturales) en cuestión de días, y en presencia de agua se disuelve inmediatamente.

Para terminar, se encontró que este material presenta una alta resistencia a la temperatura, soportando calentamiento hasta 175°C por dos horas sin sufrir mayores variaciones en sus propiedades mecánicas. En presencia de llama directa no se incendia, lo cual lo hace un material altamente seguro. Es necesario realizar ensayos adicionales sobre la capacidad del aglomerado como protector contra la propagación de llama, debido a la capacidad ignífuga observada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Investigaciones, Desarrollo e innovación de la Universidad del Norte, por su apoyo logístico y financiero, a COLCIENCIAS y su programa Joven Investigador, con cuyos recursos se financió este estudio.

Referencias

- [1] Serrano, T., Borrachero, M., Monzo, J. y Paya, J. Lightweight mortars with rice husk: mix design and properties evaluation, *Dyna-Colombia*, 79(175), pp.128-136, 2012.
- [2] Sisman, B., Gezer, E., and Kocaman, I. Effects of organic waste (rice husk) on the concrete properties for farm buildings, *Bulgarian Journal Of Agricultural Science*, 17(1), pp.40-48, 2011
- [3] Moshtaghoun, B., and Monshi, A. Hot corrosion mechanism of tundish plaster with steel slags in continuous casting. *Journal Of Materials Science*, 42(16), pp.6720-6728, DOI: 10.1007/s10853-006-1482-9, 2007.
- [4] Cadena, C. y Bula, A. Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. *Ingeniería y Desarrollo*, 12, pp. 1 – 9, 2002.
- [5] Díaz, A. Modelamiento y escalamiento piloto de un fermentador para producción de etanol a partir de glicerina. Tesis de Maestría, Barranquilla, Universidad del Norte, 2012.
- [6] Donalies, U., Nguyen, H., Stahl, U. and Nevoigt, E. Improvement of *Saccharomyces* Yeast Strains Used in Brewing, Wine Making and Baking. *Food Biotechnology*, 111, pp. 67 – 98, 2008.
- [7] Vassilev, S. Baxter, D., Andersen, L. and Vassileva, C. An overview of the composition and application of biomass ash. Part 2. Potential utilisation, technological and ecological advantages and challenges. *Fuel*, 105, pp. 19–39, 2013.
- [8] Johnson, A. *Biological Process Engineering*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1999.
- [9] Özisik, N. *Heat Conduction*, Second edition, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1993.
- [10] Askeland, D., Pradeep, F., and Wendelin, W. *The Science and Engineering of Materials*. Sixth edition, Cengage, Stamford, CT, USA, 2011.
- [11] Silva, S., Sabino, M., Fernandes, E., Correlo, V., Boesel, L., and Reis, R. Cork: properties, capabilities and applications. *International Materials Review*, 50(6), pp. 345 – 365, 2005.
- [12] Mendoza, E., Pereira, P., Martins, A., and Anselmo, A. Fungal biodegradation of cork boiling waste waters. *Eng. Life Sci.*, 4(2), pp. 1-6, 2004.
- [13] Grassi, V., Forte, M. and Dal pizzol, M. Aspectos Morfológicos e Relação Estrutura-Propriedades de Poliestireno de Alto Impacto. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 11(3) pp. 158-168, 2001.
- [14] Alonso, M., Vilte, E., Madregal S., Saravia, J., Apaza, A. Y Lozano, A. Biodegradación de polietileno de alta y de baja densidad a diferentes condiciones operativas. *XXIV Congreso de ASADES*, Mendoza, Argentina, 23 al 26 de octubre, 2001.

Relationship between the chemical composition and atomic volume in Ag- x % at Zn (x ≤ 20) solid solutions

Relación entre la composición química y el volumen atómico en soluciones sólidas Ag- x % at Zn (x ≤ 20)

Danny Guzmán ^a, Claudio Aguilar ^b, Daniel Serafini ^c, Paula Rojas ^d, Stella Ordoñez ^e & Juan F. Olivares-Pacheco ^f

^a Dr., Universidad de Atacama y CRIDESAT, Chile danny.guzman@uda.cl

^b Dr., Universidad Técnica Federico Santa María, Chile claudio.aguilar@usm.cl

^c Dr., Universidad de Santiago de Chile, daniel.serafini@usach.cl

^d Dra., Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile paula.rojas.s@ucv.cl

^e Dra., Universidad de Santiago de Chile, stella.ordonez@usach.cl

^f Lic., Universidad de Atacama, Chile jolivares@mat.uda.cl

Received: January 21th, 2013. Received in revised form: October 20th, 2013. Accepted: November 20th, 2013

Abstract

In this work the relationship between the chemical composition and atomic volume in the Ag – x % Zn (x ≤ 20) system was studied. For this purpose, 10 solid solutions were obtained by means of casting and mechanical alloying. The microstructural characterization was carried out by means of X ray diffraction. The lattice parameter was obtained using the Rietveld's method, while the chemical composition was determined by dispersive energy X-ray spectroscopy. Based on the results obtained, it can be concluded that there is an inverse lineal relationship between the atomic volume of the solid solution and its Zn concentration, which shows a negative deviation from Vegard's law (-2.96%). Additionally, it was proposed an equation which relates the Zn concentration with the atomic volume of the solid solution, which showed a prediction error less than 12%.

Keywords: Solid solution, atomic volume, Ag-Zn alloys, X-ray diffraction, chemical composition.

Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo estudiar la relación existente entre la composición química y el volumen atómico en el sistema Ag – x % at Zn (x ≤ 20). Para este fin, se fabricaron 10 soluciones sólidas mediante fundición y aleado mecánico. La caracterización microestructural se llevó a cabo utilizando difracción de rayos-X. El parámetro reticular fue calculado mediante el método de Rietveld, mientras que la composición química se determinó utilizando espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X. En base a los resultados obtenidos se puede concluir que existe una relación lineal inversa entre el volumen atómico de la solución sólida y su contenido Zn, presentando una desviación negativa de la ley de Vegard (-2,96%). Adicionalmente, se propuso una ecuación que vincula el contenido de Zn con el volumen atómico de la solución sólida, la cual presentó un error promedio de predicción menor al 12%.

Palabras Clave: Solución sólida, volumen atómico, aleaciones Ag-Zn, difracción de rayos X, composición química.

1. Introducción

Los materiales más utilizados en aplicaciones de contacto eléctrico son las aleaciones de matriz metálica con dispersión de óxidos [1]. Dentro de esta familia encontramos las aleaciones Ag-CdO, las cuales son fabricadas mediante oxidación interna de una solución sólida Ag-Cd obtenida por fundición [2]. Sin embargo, por la toxicidad del Cd, su utilización está siendo cada vez más restringida.

Debido a que las propiedades fisicoquímicas del Zn son similares a las del Cd, las aleaciones Ag-ZnO han suscitado un creciente interés como un posible sustituto de las aleaciones Ag-CdO [3, 4]. Uno de los pasos iniciales involucrados en el proceso de fabricación de este tipo de

aleaciones, es la formación de una solución sólida. De este modo, se hace imprescindible para un buen control del proceso, contra con una técnica de análisis para determinar la composición química de esta solución sólida inicial.

Se conoce que el parámetro reticular afecta diversas propiedades de las soluciones sólidas metálicas, tales como: composición química, coeficiente elástico, expansión térmica, conductividad eléctrica, entre otras. Vegard [5] observó que cuando dos sales forman una solución sólida continua, el volumen atómico varía linealmente con la concentración de soluto, como un valor ponderado entre el volumen atómico del soluto y del solvente. La ley de Vegard ha sido utilizada con éxito para describir el comportamiento de algunos sistemas minerales [6-8]. En cuanto a los metales, la ley de Vegard sólo



se cumple cuando con la formación de la solución sólida, no se altera el entorno electrónico de ambos átomos [9]. Por esta razón es muy común hablar de desviaciones de la ley de Vegard [10, 11].

Considerando que en muchos sistemas a valores bajos de concentración de soluto, el volumen atómico de la solución sólida varía linealmente con la composición, Massalki y King [9, 12] definieron el concepto de volumen atómico efectivo, como aquel volumen que debería tener el solvente para que la relación entre el volumen atómico de la solución sólida y la composición del solvente siguiese una tendencia lineal en todo el rango de composiciones. De esta forma, la desviación de la ley de Vegard puede ser medida comparando el volumen atómico efectivo del solvente con respecto a su valor verdadero [9, 12].

Considerando lo descrito anteriormente, el presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la relación existente entre la composición química y el volumen atómico en el sistema Ag-x % at Zn ($x \leq 20$).

2. Experimental

Diez Aleaciones monofásicas Ag-x % at. Zn ($x \leq 20$) fueron fabricadas mediante fundición y aleado mecánico (molino planetario y SPEX).

El proceso de fundición se realizó en un horno Inductotherm usando granillas de Ag (Sigma Aldrich, 99,9 % de pureza) y Zn (Merck, 99,9 % de pureza) como material de partida. Las composiciones químicas ensayadas fueron Ag-x % at Zn ($x = 5, 10$ y 15). Las dimensiones de los lingotes fueron de $6 \times 2 \times 1$ cm.

El proceso de aleado mecánico se realizó utilizando tanto un molino Planetario Retsch PM100 como SPEX 8000D. Todas las moliendas fueron llevadas a cabo bajo atmósfera de Ar, utilizando como material de partida granillas de Ag y Zn. En el proceso de aleado mecánico realizado en el molino planetario se empleó una razón bolas:material de 60:1, una velocidad de rotación de 400 rpm y un tiempo de molienda de 35 h. Para evitar la aglomeración de los polvos se utilizó hexano como agente de control. Las composiciones químicas estudiadas fueron Ag x % at Zn ($x = 5, 10$ y 15). Por otro lado, en el proceso

de aleado mecánico realizado en el molino SPEX 8000D, se empleó una razón bolas material de 20:1, ácido estérico como agente de control y un tiempo de molienda de 10 h. En este caso, las composiciones estudiadas fueron Ag x % at Zn ($x = 5, 10, 15$ y 20).

La caracterización microestructural se realizó mediante difracción de rayos X en un equipo Shimadzu DRX-6000 ($K_{\alpha 1}$ Cu). Los barridos fueron realizados entre 30 y $90^\circ 2\theta$, utilizando un paso de $0,02^\circ$ y un tiempo de 3 s por paso. Con el objetivo de obtener el volumen atómico de las soluciones sólidas, los difractogramas fueron refinados mediante el método de Rietveld.

De modo de estudiar la homogeneidad química de las soluciones sólidas, se realizaron observaciones mediante microscopía electrónica de barrido en un equipo Jeol 5410 a muestras preparadas metalográficamente. La composición química se determinó mediante un promedio de 10 mediciones de espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X.

La contaminación por Fe en las muestras obtenidas mediante aleado mecánico, se determinó utilizando espectroscopía de absorción atómica en un equipo Varian Spectra AA-600.

De modo de obtener la mejor curva que ajuste los datos experimentales, se realizó un estudio estadístico que incluyó un análisis de residuos Jackknife [13] y la identificación de puntos influyentes para el modelo mediante la distancia de Cook modificada [14, 15]. Como el objetivo de este trabajo es utilizar el modelo de regresión lineal para efectos predictivos, adicionalmente se realizó un estudio del impacto de cada una de las observaciones sobre la predicción del modelo utilizando las distancias de Welsch-Kuh [16].

3. Resultado y Discusión

La Figura 1 muestra un área ampliada de los difractogramas de rayos X de las muestras producidas mediante fundición y aleado mecánico. Se observa que bajo las condiciones ensayadas sólo se detecta solución sólida α (Ag-Zn) en todas las muestra analizadas. Además es posible apreciar un corrimiento de los picos de difracción hacia ángulos mayores a medida que el contenido de Zn de la aleación aumenta.

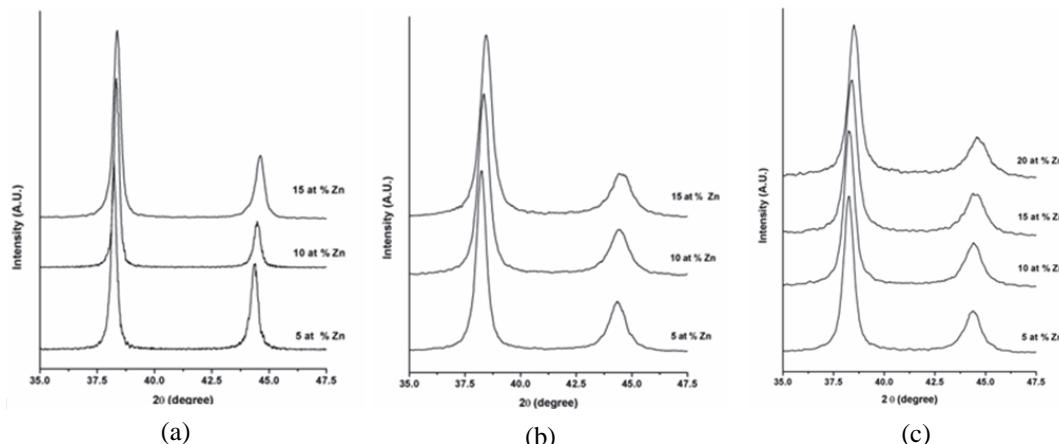


Figura 1. Difractogramas de rayos X de muestras obtenidas mediante (a) fundición (b) molienda planetaria y (c) molienda SPEX.

La Figura 2 muestra micrografías obtenidas mediante electrones retrodifundidos de muestras preparadas metalográficamente. En estas micrografías fue posible

observar que todas las muestras analizadas presentan una alta homogeneidad química. Estas observaciones corroboran los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X.

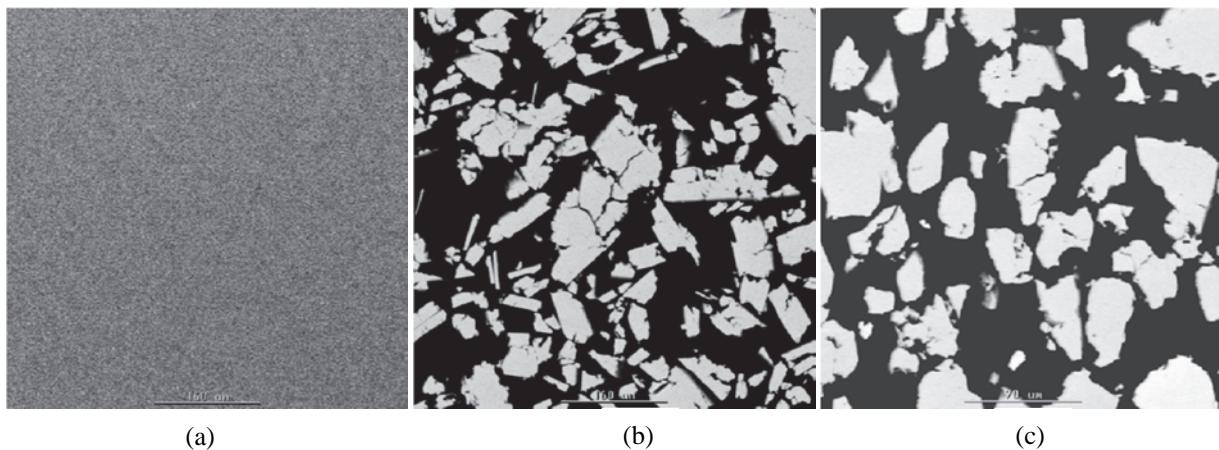


Figura 2. Micrografías obtenidas en el modo electrones retrodifundidos de muestras Ag- 15 % at. Zn producidas mediante (a) fundición (b) molienda planetaria y (c) molienda SPEX.

Con el objetivo de determinar la magnitud de la contaminación por Fe durante el proceso de aleado mecánico, muestras producidas mediante molienda planetaria y SPEX fueron analizadas mediante espectroscopía de absorción atómica. Los resultados obtenidos indicaron que la concentración de Fe es mayor para muestras provenientes del molino planetario (1,39 % en masa) en comparación a muestras provenientes del molino SPEX (0,37 % en masa). Lo anterior se explica considerando la diferencia de tiempos de molienda entre ambos procesos (35 h molienda planetaria, 10 h molienda SPEX).

La Tabla 1 presenta la composición química promedio y el parámetro reticular de las 10 soluciones sólidas bajo estudio. Las composiciones fueron obtenidas utilizando análisis de espectroscopía de energía de rayos-X, mientras que los parámetros reticulares se calcularon a partir de los análisis de difracción de rayos-X utilizando el método de Rietveld. Se observa que en general la composición química medida es menor a la nominal. Esto se puede entender considerando la gran afinidad que presenta el Zn por el O₂ [17], lo cual hace que se oxide fácilmente y abandone la solución sólida.

Con los valores de los parámetros reticulares se procedió a calcular el volumen atómico para cada muestra. La Figura 3 presenta la variación de la concentración de Zn en función del volumen atómico. Como se aprecia, a medida que el volumen atómico aumenta, la composición de la solución sólida disminuye. Lo anterior se entiende considerando la diferencia de volúmenes atómicos entre la Ag ($\Omega_{\text{Ag}} = 1,705 \cdot 10^{-2} \text{ nm}^3$) y el Zn ($\Omega_{\text{Zn}} = 1,521 \cdot 10^{-2} \text{ nm}^3$).

Considerando que la relación entre la composición y el volumen atómico, tanto para las muestras producidas por aleado mecánico como fundición siguen la misma tendencia lineal (Figura 3) y que la máxima solubilidad de Fe en Ag es $6.53 \cdot 10^{-3}$ at [18], se establece que la contaminación por Fe que presentan las muestras provenientes de aleado mecánico no alteran el volumen atómico de la solución sólida.

Tabla 1.
Composición química y parámetro reticular de las muestras estudiadas.

Nº	% at Zn nominal	Método obtención	% at Zn medido	Parámetro reticular (nm)
1	Ag-20Zn	AM SPEX	17,56	0,40584
2	Ag-15Zn	AM SPEX	13,05	0,40652
3	Ag-15Zn	AM Planet	11,87	0,40632
4	Ag-15Zn	Fusión	11,83	0,40619
5	Ag-10Zn	AM SPEX	9,53	0,40732
6	Ag-10Zn	AM Planet	8,77	0,40730
7	Ag-10Zn	Fusión	8,16	0,40760
8	Ag-5Zn	AM Planet	5,09	0,40781
9	Ag-5Zn	Fusión	4,40	0,40827
10	Ag-5Zn	AM SPEX	3,87	0,40837
11	Ag	-	0,00	0,40867

Lo anterior se corrobora observando la Figura 4, la cual muestra una micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido en modo electrones retrodifundidos de una muestra de composición nominal Ag- 10 % at Zn obtenida por molienda planetaria. Analizando los resultados de los análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X, se corrobora que el Fe detectado se encuentra principalmente como una segunda fase y no formado parte de la solución sólida.

Con el objetivo de encontrar una relación matemática que vincule la composición de aleaciones monofásicas Ag-x % at Zn ($x \leq 20$) con su volumen atómico, se realizó un análisis de regresión lineal de los datos obtenidos. Los resultados pueden ser observados en la figura 3.

Para determinar la validez del modelo lineal, se realizó un análisis de los residuos Jackknife. De la figura 4 podemos notar que la observación 4 puede presentar una

varianza mayor al resto de los datos, no cumpliendo de esta forma el supuesto de homoscedasticidad.

Además, se determinó la influencia de las distintas observaciones sobre los estimadores de mínimos cuadrados del ajuste. Para este fin se utilizó el método de las distancias de Cook modificado. Los resultados obtenidos se aprecian en la figura 6, de cuyo análisis se desprende que las observaciones 1, 4 y 11 influyen preponderantemente sobre el modelo lineal, generando un cambio significativo en las estimaciones cuando son utilizadas en el proceso de ajuste.

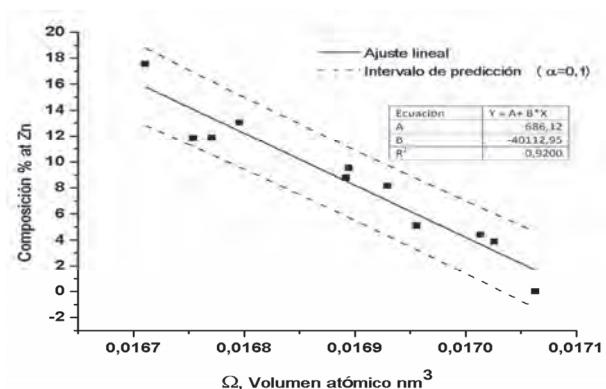


Figura 3. Variación de la composición de Zn de la solución sólida Ag-Zn con respecto al volumen atómico.

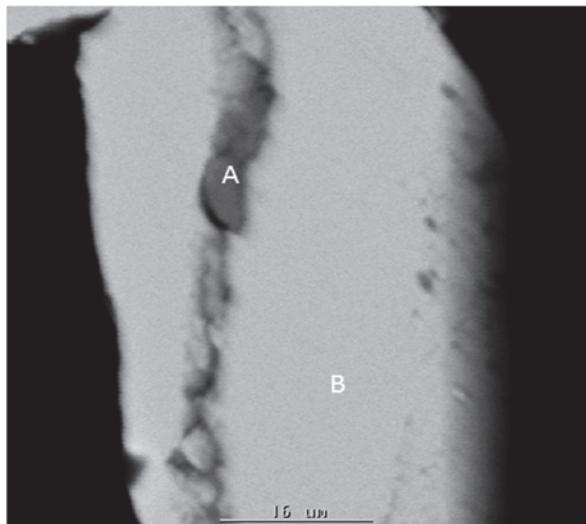


Figura 4. Micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido en el modo electrones retrodifundidos de muestra Ag- 10% at Zn producida mediante molienda planetaria y correspondientes análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos X de zonas seleccionadas.

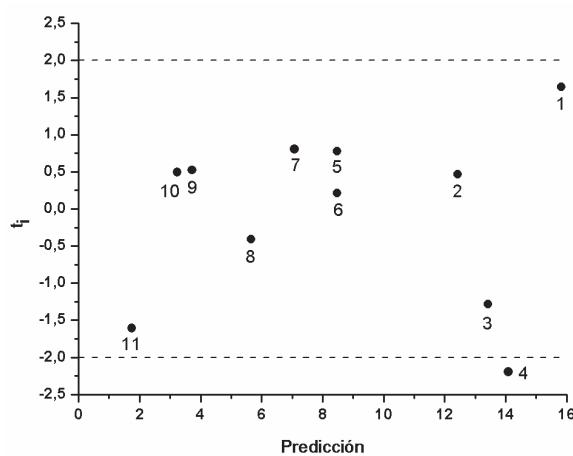


Figura 5. Grafico de residuos Jackknife.

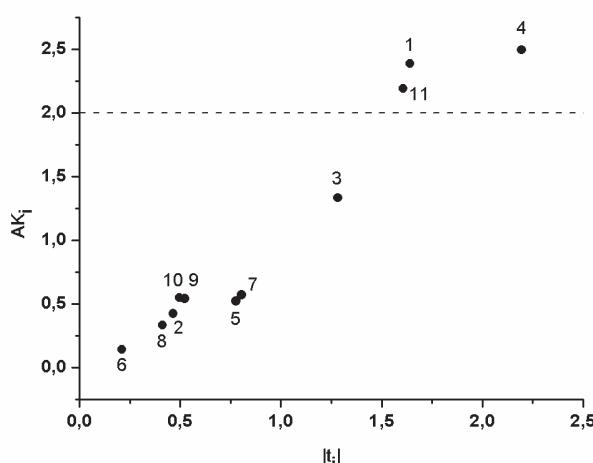


Figura 6. Distancias de Cook modificadas.

Adicionalmente, se realizó un estudio del efecto de las distintas observaciones sobre la predicción del modelo utilizando las distancias de Welsch-Kuh (figura 7). Del análisis de los resultados obtenidos, se concluye que las observaciones 1, 4 y 11, influyen sobre la predicción del modelo.

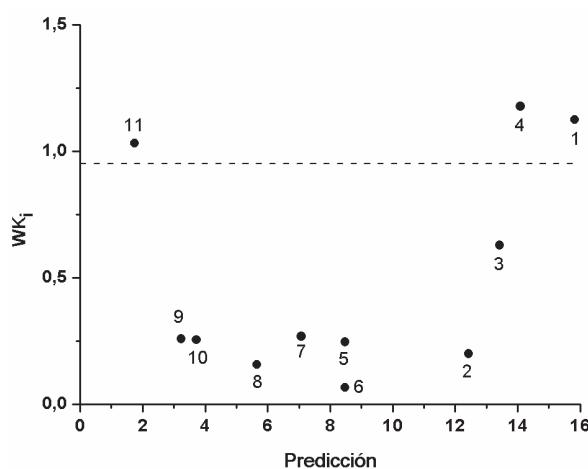


Figura 7. Distancias de Welsch-Kuh.

Considerando los análisis realizados, se definieron dos modelos adicionales de regresión teniendo en cuenta la eliminación de observaciones conflictivas. Los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 2. Basados en el mayor coeficiente de determinación, se concluye que el mejor ajuste para propósitos predictivos, viene dado por el modelo 2, representado por la ecuación (1), donde se incluye el intervalo de predicción para un $\alpha = 0,1$.

$$(\%) \text{ at Zn} = (732,91 \pm 7,47) - (42867,25 \pm 297,94) \Omega \text{ (nm}^3\text{)} \quad (1)$$

Es importante destacar, que el error promedio entre los datos experimentales y los predichos por este modelo se encuentra por debajo del 12 %.

Tabla 2.
Modelos evaluados.

Modelo	A	B	R ²
Modelo 1: todos los datos	686,12	-40112,95	0,9200
Modelo 2: Sin dato 4	725,44	-42569,31	0,9451
Modelo 3: sin datos 1, 4 y 11.	613,55	-35805,30	0,9222

La figura 8 presenta la comparación entre el ajuste obtenido a partir de los datos experimentales (ecuación 1) y la ley de Vegard. De modo de cuantificar la desviación existente entre ambas curvas, se calculó el volumen atómico efectivo del Zn, el cual resultó ser $\Omega_{\text{Zn}}^* = 1,476 \text{ } 10^{-2} \text{ nm}^3$. De esta forma, se determinó que la desviación existente entre el ajuste experimental y la ley de Vegard era de -2,96 %. Esta desviación es menor a la reportada por King para el mismo sistema (-3,27 %) [9].

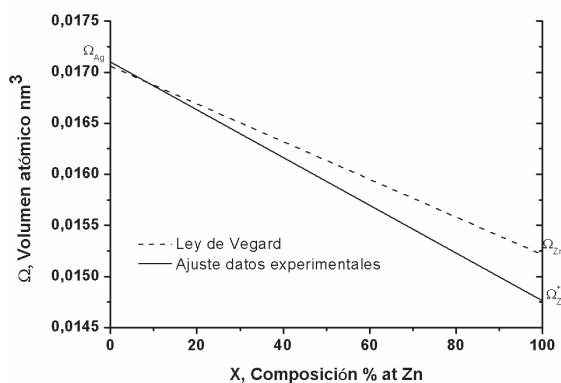


Figura 8. Comparación entre el ajuste obtenido a partir de los datos experimentales y la ley de Vegard.

4. Conclusiones

Basados en los resultados obtenidos se puede concluir que existe una relación inversa entre el volumen atómico de la solución sólida Ag-Zn y su contenido en Zn. En el rango de concentraciones estudiadas, esta relación sigue una tendencia lineal, la cual presenta una desviación con respecto a la ley de Vegard de -2,96 %.

De modo de contar con una herramienta rápida para determinar la composición de soluciones sólidas Ag- x % at Zn ($x \leq 20$) mediante difracción de rayos X, se propuso una ecuación que vincula la composición de estas aleaciones con su volumen atómico, la cual entrega un error promedio de predicción menor al 12 %.

Agradecimientos

Los autores agradecen al proyecto FONDECYT iniciación N° 11100284, por haber financiado el presente trabajo.

Referencias

- [1] Fernández, P., Martínez, V., Valencia, M., y Cruz, J. Aplicaciones de los materiales compuestos de matriz metálica en el sector eléctrico y electrónico, Revista DYNA, 73 (149), pp.131-140, 2006.
- [2] Kabayama, S., y Kamijo, E. Electric contact material and method of making the same, USA patent 3,607,244, 1967.
- [3] Joshi, P., Rao, V., Rehani, B., and Pratab, A. Silver-Zinc oxide electrical contact materials by mechanochemical synthesis route, Indian Journal Pure Appl. Phys., 45, pp. 9-15, 2007.
- [4] Verma, P., Pandey, O.P., and Verma, A. Influence of metal oxides on the arc erosion behavior of silver metal oxides electrical contact materials, J. Mater. Sci. Technol., 20, pp. 49-52, 2004.
- [5] Vegard, L. Die Konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome. Z. für Physik, 5, pp.17-26, 1921.
- [6] Lambregts, M., and Frank, S. Application of Vegard's law to mixed cation sodalites: a simple method for determining the stoichiometry, Talanta, 62, pp. 627–630, 2004.
- [7] Rozov, K., Berner, U., Taviot-Gueho, C., Leroux, F., Renaudin, G., Kulik, D., and Diamond, L. Synthesis and characterization of the LDH hydrotalcite–pyroaurite solid-solution series, Cement. Concrete Res., 40, pp. 1248-1254, 2010.
- [8] Drouet, C., Navrotsky, A. Synthesis, characterization, and thermochemistry of K-Na-H₃O jarosites, Geochim. Cosmochim. Ac., 67, pp. 2063–2076, 2003.
- [9] King H.W. Quantitative Size-factor for metallic solid solution. J. Mater. Sci., 1, pp. 79-80, 1966.
- [10] Humme-Rothery, W., and Smallman, R.E., Haworth, C.W., The structure of metals and alloys, Institute of Metals, London, 1969.
- [11] Manova, D., Lutz, J., Gerlach, J., Neumann, H., Mändl, S. Relation between lattice expansion and nitrogen content in expanded phase in austenitic stainless steel and CoCr alloys, Surf. Coat. Technol., 205, pp. S290-S293, 2011.
- [12] Massalski, T.B., and King H.W. Alloy Phases of the noble metals, Prog. Mater. Sci., 10, 3-78, 1961.
- [13] Rencher, A.C., and Schaalje, G.B. Linear models in statistics, John Wiley, USA, 2008.
- [14] Cook, R. D. Detection of influential observations in linear regression, Technometrics 19, pp.15-18, 1977.
- [15] Atkinson, A.C. Two graphical display for outlying and influential observations in regression, Biometrika 68, pp. 13-20, 1981.
- [16] Belsley, D.A., Kuh, E., and Welsch, R.E. Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of collinearity, New Jersey, USA, John Wiley, 1980.
- [17] Kubaschewski, O., and Evans, E. Metallurgical Thermochemistry, Pergamon press, 3rd edition, London, UK, 1965.
- [18] ASM handbook. Alloys and phase diagrams, ASM international, Materials Park, Ohio, USA, 1992.

Methodology for the implementation of an economic and/or statistical design for x-bar charts with variable parameters (VP)

Metodología para la implementación del diseño económico y/o estadístico de cartas de control x-barra con parámetros variables (VP)

Rita Peñabaena-Niebles ^a, Oscar Oviedo-Trespalacios ^b, Sandra Cuentas-Hernandez ^c & Ethel García-Solano ^d

^a Ph.D., Profesor Investigador, Universidad del Norte, Colombia. rpena@uninorte.edu.co

^b M.Sc., Profesor Investigador, Universidad del Norte, Colombia. ooviedo@uninorte.edu.co

^c M.Sc. (C), Investigador, Universidad del Norte, Colombia. scuentas@uninorte.edu.co

^d M.Sc. (C), Investigador, Universidad del Norte, Colombia. egarcia@uninorte.edu.co

Received: November 22th, 2012. Received in revised form: October 15th, 2013. Accepted: November 20th, 2013.

Abstract

Recent advances in the design of control charts have focused on variable parameters charts (VP) in which parameters are modified according to the last sample value. These charts have proved more effective in detecting assignable causes but more complexes for implementation in organizations. Although, there is a lot literature regarding the economic and/or statistical design of a VP chart, few authors focus their efforts on making them accessible to companies. In this paper a new procedure is proposed to reduce the complexity and enhance the benefits of an economic and an economic-statistical design of X charts with variable parameters.

Keywords: X control charts, cost-effective design, statistical design, variable parameters.

Resumen

Los últimos avances en el diseño de cartas de control se han enfocado en las cartas con parámetros variables (VP) en las cuales se modifica los parámetros de la carta de acuerdo al valor de la última muestra. Estas cartas han demostrado ser más eficaces en la detección de las causas asignables pero más complejas para su implementación en las organizaciones. Aunque es mucha la literatura referente al diseño económico y/o estadístico de cartas VP, son pocos los autores que enfocan sus esfuerzos en hacerlas accesibles a las empresas. En este artículo se presentara un nuevo procedimiento diseñado con el fin de disminuir la complejidad y aprovechamiento de las ventajas del diseño económico y económico-estadístico de cartas X con VP.

Palabras Clave: Cartas de control X, diseño económico, diseño estadístico, parámetros variables.

1. Introducción

Las cartas de control X son una de las herramientas de control estadístico de procesos más utilizadas para el mejoramiento de la calidad y la productividad en las compañías. En el diseño de una carta X para monitorear la media de un proceso se debe seleccionar tres parámetros: el tamaño de muestra (n), el intervalo de muestreo (h) y el coeficiente del límite de control (k). Sin embargo, la carta X tradicional ha demostrado tener un peor desempeño al detectar cambios pequeños y moderados en la media del proceso [1, 2, 3], por este motivo, se ha recurrido a modificar el diseño de esta carta de control utilizando diferentes enfoques, como por ejemplo variar los parámetros de la carta aumentando o disminuyendo el rigor de la búsqueda en función del valor de la última muestra tomada. Este enfoque recibe el nombre de cartas de control con parámetros variables (VP).

Sobre estas cartas son diversas las opiniones, mientras algunos autores como Reynolds et al. [4], Costa [5], Das et al. [6,7], De Magalhaes et al. [8] han demostrado que la variación de uno o más parámetros a partir de la información de la muestra anterior tiene un mejor desempeño estadístico y económico que la carta tradicional con parámetros fijos. Los supuestos base para hacer la comparación es que el proceso arroje observaciones independientes y normalmente distribuidas. Otros autores como Prabhu et al. [9] sugieren que aunque la carta VP tiene una mejor eficiencia estadística no tienen necesariamente un desempeño en costos superior a la carta tradicional.

Al igual que otros tipos de cartas, estas han venido siendo optimizadas mediante el uso de funciones que permitan mejorar su comportamiento a nivel estadístico y económico. El enfoque que busca obtener el mayor rendimiento estadístico de una carta recibe el nombre de diseño estadístico de una carta de control. Por otro lado,



cuando se busca minimizar los costos derivados del uso de la carta de control se habla de diseño económico de una carta de control. Además de estos dos enfoques, existe otro tipo de diseño que busca un equilibrio entre los costos y las propiedades estadísticas de una carta de control denominado diseño económico estadístico.

Aunque estos diseños han mejorado el desempeño de las cartas VP, algunos como el de Parkideh y Case [10] y el de Ohta y Rahim [11], son matemáticamente muy complicados y difíciles de implementar [1]. Además, otra desventaja de estas cartas es que resultan complejas administrativamente en comparación a las cartas con parámetros fijos, y en algunos casos el ahorro conseguido por reducción de residuo, reprocesos e inspecciones no es significativo en relación al costo de manejo administrativo [12].

La aplicación de estos diseños económicos estadísticos de cartas de control en la industria se ven obstaculizados por la dificultad de obtención y evaluación de costos y tiempos necesaria, la dificultad de los métodos para estimar los parámetros y la complejidad que se genera para los encargados del monitoreo de calidad al tratar de entender un sistema con algún grado de dificultad. Esta situación ha sido referenciada por autores como Montgomery [13] y Keats et al. [14].

El propósito de este artículo es presentar una metodología que facilite la implementación de los modelos económico y económico-estadístico de cartas de control con todos los parámetros variables (VP) a través de un caso de estudio presentado por Lorenzen y Vance [15] para parámetros fijos y más tarde modificado para parámetros variables por De Magalhaes et al. [16]. Los resultados de este último serán comparados con la metodología propuesta.

2. Diseño económico-estadístico de cartas de control

En el diseño de una carta X los parámetros tamaño de muestra (n), intervalo de muestreo (h) y coeficiente del límite de control (k) varían entre dos valores (mínimo y máximo) cuya selección disminuye o aumenta la rigurosidad del control. Así entonces, la selección de los parámetros debe cumplir con: $n_1 < n_2$, $h_1 > h_2$, $w_1 > w_2$ y $k_1 > k_2$, de tal forma que el escenario con valores (n_1, h_1, w_1, k_1) corresponda al control relajado y el escenario con valores (n_2, h_2, w_2, k_2) corresponda al control estricto.

La carta VP está dividida en tres regiones diferentes (ver figura 1): la región central comprendida entre el límite de advertencia inferior y el límite de advertencia superior (LAI, LAS), la de advertencia comprendida por las zonas entre el límite de control inferior hasta límite de advertencia inferior (LCI, LAI) y el límite de advertencia superior hasta límite de control superior (LAS, LCS) y la región de acción comprendida por los valores que sobrepasan los límites de control superior (LCS) y los valores que son inferiores al límite de control inferior (LCI).

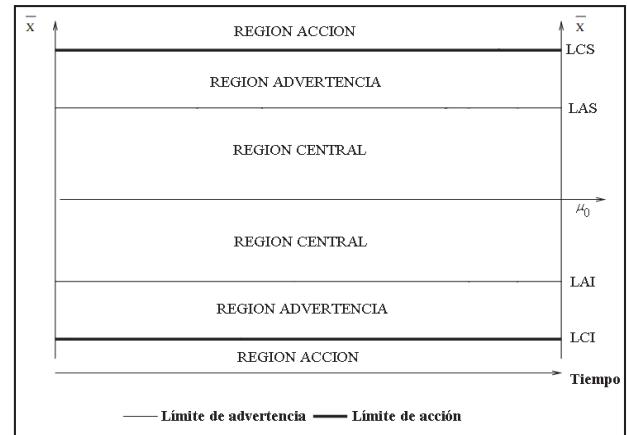


Figura 1. Regiones de la carta de control con parámetros variables

La política de decisión determina que la posición en la que caiga cada muestra determina cual set de parámetros de control (relajado o estricto) se deberá utilizar en la siguiente toma. Si el punto cae en la región central, el control se disminuye, el tamaño de muestra debe ser pequeño (n_1), el intervalo de muestreo y los coeficientes de control y advertencia deben ser grandes (h_1 , k_1) (w_1). Por otro lado, si el punto cae en la región de advertencia, el control se aumenta, en consecuencia el tamaño de muestra debe ser grande (n_2), el intervalo de muestreo y los coeficientes de control y advertencia deben ser pequeños (h_2) (k_2) (w_2). Por último, si el punto cae en la región de acción, una investigación debe comenzar para verificar la ocurrencia de una causa assignable y si es pertinente iniciar el proceso de reparación.

$$(n_i, h_i, k_i, w_i) = \begin{cases} (n_2, h_2, k_2, w_2) & \text{si } w < Z_{i-1} < LCS \\ (n_1, h_1, k_1, w_1) & \text{si } -w < Z_{i-1} < w \\ (n_2, h_2, k_2, w_2) & \text{si } LCI < Z_{i-1} < -w \end{cases}$$

El diseño estadístico de cartas de control implica la selección de los parámetros óptimos teniendo en cuenta propiedades estadísticas de interés dejando a un lado los costos asociados a su obtención. Por otro lado, cuando se desea que los costos asociados al control de un proceso se reduzcan sin tener en cuenta la perdida de características estadísticas relevantes del mismo, se habla de un diseño económico de una carta de control. Cuando es deseable seleccionar parámetros que equilibran tanto el comportamiento estadístico como de costos de un proceso, lo llamamos un diseño económico estadístico de una carta de control [17]. Así entonces, el tipo de diseño está condicionado a que se busca obtener: reducción de costos, alto desempeño en la detección de desajustes del proceso o un equilibrio entre estas dos variables.

Individualmente, las cartas de control estadísticas tienen propiedades estadísticas estables pero un costo operacional elevado, mientras que las cartas de control económicas se concentran más en los costos en detrimento del desempeño estadístico incrementando el número de falsas alarmas y

conduciendo a sobreajustes que pueden aumentar la variación de la característica a evaluar [18]. En respuesta a esta situación surgen las cartas económico-estadísticas, que utilizan un enfoque semi-económico que minimiza la función de costos pero añadiendo restricciones sobre algunas características estadísticas, lo cual garantiza una disminución en los costos totales sin descuidar el desempeño estadístico.

3. Metodología

La metodología propuesta para la implementación de un diseño económico y económico-estadístico, contiene las siguientes etapas:

2.1. Selección Primera Muestra

La selección del tamaño y frecuencia de muestreo depende del valor de la muestra inmediatamente anterior, la primera muestra al inicio del proceso de muestreo debe ser escogida de forma arbitraria. En esta metodología se sigue el planteamiento de Bai y Lee [19] sobre utilizar la frecuencia de muestreo más baja y el tamaño de muestra más alto como una medida de protección más elevada ante la ocurrencia de una causa assignable.

2.2. Grafica Carta de Control

Para la metodología se propone graficar las cartas de control de manera diferente a la tradicional, donde se utilizan límites constantes y se construye una gráfica de control con dos escalas a cada lado de la misma [20]. Con el fin de graficar las muestras pequeñas y grandes en una gráfica, se diseñó una macro de Excel que permite mover los límites de acuerdo al valor que requiera la muestra. En la Figura 2 se presenta una imagen de la una gráfica obtenida a través de la macro.

Para su ejecución, la plataforma necesita de valores de entrada la media, desviación y los parámetros óptimos del modelo y arroja la gráfica y algunos parámetros de interés seleccionados por el usuario.



Figura 2. Carta X con parámetros variables límites variables

2.3. Modelo de Costos

La metodología propuesta utiliza el modelo de De Magalhaes et al. [16] para determinar los parámetros óptimos: $n_1, n_2, h_1, h_2, w_1, w_2, k_1, k_2$ que minimizan los costos de las cartas de control. En este artículo, se propone un procedimiento que utiliza algoritmos genéticos (GA)

como método de optimización. Además, incorpora dos nuevas restricciones que evitan que el modelo asuma probabilidades negativas que alteren el resultado de los valores óptimos. Las asunciones del modelo propuesto son:

- i. Las muestras son independientes.
- ii. Las observaciones están normalmente distribuidas.
- iii. El proceso comienza bajo control con media y desviación estándar conocida $\mu = \mu_0$ y σ
- iv. El modelo considera la existencia de una sola causa assignable en la operación del proceso.
- v. La ocurrencia de la causa assignable tiene distribución exponencial con media $1/\lambda$.
- vi. El proceso no es auto correctivo (Solo la intervención puede regresar el proceso a estado de control)
- vii. El proceso puede o no ser detenido durante la búsqueda y reparación de una causa assignable.
- viii. Los parámetros a determinar son: $n_1, n_2, h_1, h_2, w_1, w_2, k_1, k_2$

A continuación se presenta la notación de las variables de salida y entrada utilizada en el modelo:

$$n_1 = \begin{cases} i = 1 & \text{Tamaño de muestra para región central.} \\ i = 2 & \text{Tamaño de muestra para región a advertencia.} \end{cases}$$

$$h_1 = \begin{cases} i = 1 & \text{Frecuencia de muestreo para región central.} \\ i = 2 & \text{Frecuencia de muestreo para región a advertencia.} \end{cases}$$

$$k_1 = \begin{cases} i = 1 & \text{Coeficientes de límites de acción para región central.} \\ i = 2 & \text{Coeficientes de límites de acción para región a advertencia.} \end{cases}$$

$$w_1 = \begin{cases} i = 1 & \text{Coeficiente de límites de advertencia para región central.} \\ i = 2 & \text{Coeficiente de límites de advertencia para región a advertencia.} \end{cases}$$

Y: Costo por falsa alarma.

G: Tiempo promedio de/para muestrear.

T_0 : Tiempo promedio de búsqueda de una falsa alarma.

T_{**} : Tiempo promedio para reparar una causa assignable.

T_* : Tiempo promedio de búsqueda de una causa assignable.

C_0 : Costo promedio por hora de la no conformidad durante el periodo en que el proceso está bajo control.

C_1 : Costo promedio por hora de la no conformidad durante el periodo en que el proceso está fuera de control.

W: Costo promedio para encontrar y eliminar una causa assignable.

a: Costo fijo por toma de una muestra.

b: Costo variable por toma de una muestra.

$1/\lambda$: Tiempo promedio en que el proceso está bajo control.

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & \text{Si la producción continúa en la búsqueda} \\ 0 & \text{Si la producción no continúa en la búsqueda} \end{cases}$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 1 & \text{Si la producción continúa en la reparación} \\ 0 & \text{Si la producción no continua en la reparación} \end{cases}$$

p_0 : Es la probabilidad de que se requiera una muestra grande durante el periodo bajo control.

$(1 - p_0)$: Es la probabilidad de que una muestra sea pequeña durante el periodo bajo control.

$E(ECTU)$: Costo por unidad de tiempo asociado al control de un proceso con una carta de control VP.

$E(C)$: Costo esperado por ciclo.

$E(T)$: Tiempo esperado por ciclo.

$E(C_{fa})$: Costo esperado de falsas alarmas.

$E(C_{in})$: Costo esperado de la no conformidad al operar en estado bajo control.

$E(C_{out})$: Costo esperado de la no conformidad al operar en estado fuera de control.

$E(C_{sam})$: Costo esperado de inspección y muestreo.

$E(C_r)$: Costo esperado de encontrar y eliminar una causa assignable.

$E(F)$: Es el número esperado de falsas alarmas.

$E(R)$: Tiempo esperado entre la ocurrencia del cambio en la media del proceso y la primera muestra después de este.

$E(S)$: Tiempo esperado desde la primera muestra después de la ocurrencia de una causa assignable hasta la ocurrencia de una alarma.

$E(T_1)$: Tiempo esperado desde la primera muestra después del cambio, cuando esta muestra cae en la región de advertencia, hasta la ocurrencia de una alarma.

$E(T_2)$: Tiempo esperado desde la primera muestra después del cambio, cuando esta muestra cae en la región central, hasta la ocurrencia de una alarma.

$E(T_{fa})$: Tiempo esperado de búsqueda de falsas alarmas.

α_i : es la probabilidad del error tipo I cuando la carta tiene parámetros n_i, k_i, h_i con $i = 1, 2$.

n : Es el promedio de tamaños de muestra tomadas mientras el proceso está bajo control.

n' : Es el promedio de tamaños de muestra tomadas mientras el proceso está fuera de control.

$E(N)$: Es el número promedio de muestras tomadas mientras el proceso está bajo control.

$E(N')$: Es el número promedio de muestras tomadas mientras el proceso está fuera de control.

ATS_0 : Tiempo promedio para señalar.

$AATS$: Tiempo esperado desde la ocurrencia de una causa assignable hasta que una alarma es dada.

$P(B = B_1)$: Probabilidad de que la primera muestra tomada luego de la ocurrencia de la causa assignable caiga en la región central.

$P(B = B_2)$: Probabilidad de que la primera muestra tomada

luego de la ocurrencia de la causa assignable caiga en la región de advertencia.

$P(B = B_3)$: Probabilidad de que la primera muestra tomada luego de la ocurrencia de la causa assignable caiga en la región de acción.

2.4. Calculo de Variables

Con el objetivo de disminuir los costos asociados al control de calidad, se utiliza la expresión expuesta por Ross [21], la cual determina el costo esperado por unidad de tiempo (ECT):

$$ECT = \frac{E(C)}{E(T)} \quad (2)$$

Las expresiones necesarias para el cálculo del tiempo esperado de ciclo $E(T)$ y costo esperado por ciclo $E(C)$ se basan en lo desarrollado por Das et al. [6] y De Magalhaes et al. [16].

Para la estimación de estos parámetros, el modelo presentado divide al proceso de producción en ciclos que comienzan con el inicio o reinicio del proceso debido a la eliminación de una causa assignable o el comienzo del proceso de producción. Así, un ciclo está conformado por el periodo en control, el periodo fuera de control, periodo de investigación y reparación. Con esto tenemos que el tiempo esperado de ciclo estará dado por:

$$E(T) = \frac{1}{\lambda} + (1 - \delta_1) E(T_{fa}) + AATS + n'G + T_* + T_{**} \quad (3)$$

Por otra parte, en un ciclo se puede incurrir en costos asociados a las falsas alarma $E(C_{fa})$, costos de la no conformidad al operar en estado bajo control $E(C_{in})$ y fuera de control $E(C_{out})$, costos de inspección y muestreo $E(C_{sam})$ y costo de encontrar y eliminar una causa assignable $E(C_r)$. De lo cual se puede deducir la expresión:

$$E(C) = E(C_{in}) + E(C_{out}) + E(C_{fa}) + E(C_r) + E(C_{sam}) = \frac{c_0}{\lambda} + C_1[AATS + n'G + \delta_1 T_* + \delta_2 T_{**}] + YE(F) + W + (a + bn)E(N) + (a + bn')E(N') \quad (4)$$

El número esperado de falsas alarmas ($E(F)$) durante un ciclo vienen dado por la probabilidad de que una muestra caiga en la región de acción mientras el proceso está bajo control multiplicado por el número esperado de muestras tomadas durante el estado de control

$$E(F) = [\alpha_1 p_0 + \alpha_2 (1 - p_0)]E(N) \quad (5)$$

Donde

$$\alpha_1 = p(|Z| > k_i) \text{ y}$$

$$E(N) = \frac{e^{-\lambda h_1} p_0 + e^{-\lambda h_2} (1 - p_0)}{1 - e^{-\lambda h_1} p_0 + e^{-\lambda h_2} (1 - p_0)}$$

El tiempo promedio para señalar (ATS_0) será utilizado como restricción para mejorar las propiedades estadísticas del diseño económico. Este viene dado por:

$$ATS_0 = \frac{[h_1(1 - p_{11}(0) + h_2 p_{12}(0))p_0 + [h_2(1 - p_{11}(0)) + h_1 p_{21}(0)](1 - p_0)]}{1 - p_{11}(0) - p_{22}(0) + p_{11}(0)p_{22}(0) - p_{12}(0)p_{21}(0)} \quad (6)$$

Donde

$$p_{i1}(0) = P(-w_i < Z < -w_i), i = 1, 2$$

$$p_{i2}(0) = P(-k_i < Z < -w_i) P(k_i < Z < -k_i), i = 1, 2$$

El tiempo esperado de ocurrencia de una causa assignable o alarma ($AATS$) será utilizado para calcular el tiempo esperado de ciclo, así como una restricción que permita minimizar el tiempo de detección de la ocurrencia de una causa assignable. Viene dado por:

$$AATS = E(R) + E(S) \quad (7)$$

El tiempo esperado entre la ocurrencia del cambio en la media del proceso y la primera muestra después de este ($E(R)$) viene dado por:

$$E(R) = \left\{ h_1 - \frac{1 - e^{-\lambda h_1} (1 + \lambda h_1)}{\lambda (1 - e^{-\lambda h_1})} \right\} P(= h_1) + \left\{ h_2 - \frac{1 - e^{-\lambda h_2} (1 + \lambda h_2)}{\lambda (1 - e^{-\lambda h_2})} \right\} P(= h_2) \quad (8)$$

Donde:

$$P(A = h_1) = \frac{p_0 h_1}{[p_0 h_1 + (1 - p_0) h_2]}$$

$$P(A = h_2) = \frac{p_0 h_2}{[p_0 h_1 + (1 - p_0) h_2]}$$

El tiempo desde la toma de la primera muestra luego del cambio en el proceso y la aparición de la señal de alarma ($E(S)$) viene dado por:

$$E(S) = E(T_1) P(B = B_1) + E(T_2) P(B = B_2) \quad (9)$$

Dónde:

$$P(B = B_1) = p_{11} P(A = h_1) + p_{21} P(A = h_2)$$

$$P(B = B_2) = p_{12} P(A = h_1) + p_{22} P(A = h_2)$$

$$P(B = B_3) = 1 - P(B = B_1) + -P(B = B_2)$$

$$E(T_1) = \left\{ \frac{[h_1(1 - p_{22}) + h_1 p_{12}]}{1 - p_{11} - p_{22} + p_{11} p_{22} - p_{12} p_{21}} \right\}$$

$$E(T_2) = \left\{ \frac{[h_2(1 - p_{11}) + h_1 p_{21}]}{1 - p_{11} - p_{22} + p_{11} p_{22} - p_{12} p_{21}} \right\}$$

$$p_{i1} = P(-w_i - \delta \sqrt{n_i} < Z < w_i - \delta \sqrt{n_i}), \quad i = 1, 2$$

$$p_{i2} = P(-k_i - \delta \sqrt{n_i} < Z < -w_i - \delta \sqrt{n_i}) + P(w_i - \delta \sqrt{n_i} < Z < k_i - \delta \sqrt{n_i}), \quad i = 1, 2$$

El tamaño promedio de muestra durante el periodo fuera de control (n') y la frecuencia promedio de muestreo durante el estado fuera de control del proceso (h') se expresan como:

$$n' = n_1 p_0(\delta) + n_2 (1 - p_0(\delta)) \quad (10)$$

$$h' = h p_0(\delta) + h_2 (1 - p_0(\delta)) \quad (11)$$

Donde

$$p_0 = P(-w_i - \delta \sqrt{n_i} < Z < w_i - \delta \sqrt{n_i}) \quad | -k_i - \delta \sqrt{n_i} < Z < k_i - \delta \sqrt{n_i} \quad i = 1, 2$$

Para el cálculo del tamaño promedio de muestra durante el periodo bajo control del proceso (n) y el número promedio de muestras tomadas durante el estado fuera de control $E(N')$ utilizamos las siguientes expresiones:

$$n = n_1 p_0 + n_2 (1 - p_0) \quad (12)$$

$$E(N') = \left[\frac{[AATS + n' G + \delta_1 T_* + \delta_2 T_{**}]}{h'} \right] \quad (13)$$

2.5. Optimización

En la literatura sobre diseño económico de cartas de control se utilizan diferentes herramientas para obtener los valores óptimos de los parámetros requeridos para minimizar costos, en este caso se utiliza una optimización por medio de algoritmos genéticos.

Las ventajas de los algoritmos genéticos (AG) como método de optimización sobre otros métodos están contenidas en los artículos de Chen [22, 23], Aparisi y García [24] y Chen y Chiou [25]. En estos se explica que el algoritmo genético es más potente a la hora de estimar la solución de un problema debido a que toma muestras aleatorias de todo el espectro de posibilidades, y a partir de estas, determina los mejores escenarios para fijar la mejor solución. Por esto, a diferencia de la mayoría de programas que optimizan los modelos de forma matemática y sistemática, se ve menos afectado por los óptimos locales seleccionando un mejor óptimo global, de tal manera que se

emula el proceso evolutivo donde se busca la supervivencia del más apto.

Los algoritmos genéticos imitan los principios darwinianos de selección natural mediante la creación de un entorno en el que cientos de posibles soluciones a un problema compiten unas con otras, y sólo la “mejor adaptada” sobrevive. Como sucede en la evolución biológica, cada solución puede transmitir sus mejores “genes” a través de soluciones “descendientes” de forma que toda la población de soluciones sigue evolucionando en soluciones mejores.

En esta aplicación se considera incluir el truncamiento de los parámetros objetivos del modelo ($h_1, h_2, w_1, w_2, k_1, k_2$) de acuerdo al proceso al cual se le está haciendo el control y al instrumento utilizado para medir las variables, debido a que el paquete arroja parámetros óptimos con gran cantidad de números. Así, por ejemplo, si la medición se está haciendo sobre el diámetro de una pieza y el instrumento para realizar la medición solo mide hasta 3 cifras decimales, se recomienda truncar los parámetros objetivos w_1, w_2, k_1, k_2 a igual número de cifras decimales. Igualmente, se recomienda truncar el valor para los parámetros h_1, h_2 de acuerdo a la capacidad del instrumento utilizado para medir el intervalo de toma de muestra.

3. Caso de estudio

Con el fin de validar y comparar los resultados del modelo, se utiliza el caso de estudio desarrollado por De Magalhaes et al. [16], tomado originalmente de Lorenzen and Vance [15], basado en muestras de hierro licuado tomadas de manera periódica en una línea de fundición para monitorear el contenido de silicato de carbono de la pieza para graficar la curva de enfriamiento. La curva está relacionada con el contenido de silicato de carbono dado que el contenido alto del mismo resulta en baja resistencia a la tracción.

En los parámetros de entrada se tiene que el costo de muestreo es de \$4.22 por muestra y toma aproximadamente cinco minutos en realizarse. El costo promedio de cada no conformidad es de \$100. De información estadística histórica se tiene que el proceso en estado de control produce 1.36% de no conformidades (en este estado permanece un promedio de 50 horas) y 11.3% cuando se encuentra fuera de control. Cuando el estado del proceso es fuera de control, el sistema debe ser borrado y reiniciado tomando cerca de 45 minutos con un costo de reparación de \$22.80 por hora y costo de inactividad de \$21.34 por minuto. El costo del proceso bajo control es de \$114.24 por hora y fuera de control de \$949.20 por hora. Los costos por falsas alarmas son de 977.40 por hora. De acuerdo a lo anterior los modelos fueron planteados de la siguiente forma:

3.1. Diseño Económico

$$\text{Min } \frac{E(C)}{E(T)} \text{ Sujeto a}$$

$$n_1 \leq n_2 \quad 1 \leq n_1 \quad 3 \leq n_2$$

$$0.1 \leq h_2 \leq h_1 \quad 0.1 \leq w_2 \leq w_1 \quad 1 \leq k_2 \leq k_1$$

$$h_1 \leq n_2 \quad w_1 \leq k_1 \quad w_2 \leq k_2$$

Donde $n_1, n_2 \in \mathbb{N}^+$

3.2. Diseño económico- estadístico

$$\text{Min } \frac{E(C)}{E(T)} \text{ Sujeto a}$$

$$n_1 \leq n_2 \quad 1 \leq n_1 \quad 3 \leq n_2 \quad w_2 \leq k_2$$

$$0.1 \leq h_2 \leq h_1 \quad 0.1 \leq w_2 \leq w_1 \quad 1 \leq k_2 \leq k_1$$

$$h_1 \geq 1 \quad w_1 \leq k_1$$

$$AATS \leq 4 \quad 500 \leq AATS$$

Donde $n_1, n_2 \in \mathbb{N}^+$

Como se puede notar, se ha incluido adicionalmente al ejemplo de De Magalhaes et al. [16] las restricciones $w_1 \leq k_1$ y $w_2 \leq k_2$. Que evitan que al momento de buscar la solución óptima el modelo asuma probabilidades negativas como resultado de considerar, en el caso de la primera restricción, el límite superior de la región de advertencia (LAS) mayor al límite superior de control (LCS) y, en el caso de la segunda, el límite inferior de advertencia (LAI) menor que el límite inferior de control (LCI). Además, se clarifica que n_1 y n_2 deben ser valores enteros positivos.

Para la evaluación de los resultados se consideraron los siguientes casos:

1. Diseño económico estadístico / Parámetros Variables / Método con Algoritmo Genético (ESD/VP/AG).
2. Diseño económico estadístico / Parámetros Variables / Método programación cuadrática secuencial (ESD/VP/PCS).
3. Diseño económico / Parámetros Variables / Método con Algoritmo Genético (ED/VP/AG).
4. Diseño económico / Parámetros Variables / Método programación cuadrática secuencial (ED/VP/PCS).

De estos, el escenario 1 y 3 corresponden al método propuesto para el modelo de diseño económico y económico-estadístico resuelto usando algoritmos genéticos, utilizando el complemento Evolver 4.0 de Excel ®. Por otro lado, los modelos 2 y 4 corresponden al económico y al económico-estadístico resuelto utilizando la programación cuadrática secuencial (PCS) utilizando Matlab ® propuesta por Magalhaes et al. [16].

Para realizar los resultados se calcularon unos indicadores que permiten estimar las diferencias de costo entre los distintos escenarios considerados y distintos corrimientos.

$$PR_1 = \frac{|(ESD/VP/PCS) - (ESD/VP/AG)|}{(ESD/VP/AG)} * 100 \quad (14)$$

$$PR_2 = \frac{|(ESD/VP/AG) - (ESD/VP/PCS)|}{(ESD/VP/PCS)} * 100 \quad (15)$$

$$PR_3 = \frac{|(ED/VP/AG) - (ESD/VP/AG)|}{(ESD/VP/AG)} * 100 \quad (16)$$

$$PR_4 = \frac{|(ED/VP/PCS) - (ED/VP/AG)|}{(ED/VP/AG)} * 100 \quad (17)$$

Al resolver el modelo se tiene que el valor del PR_3 indica que sacrificando algunas de las propiedades estadísticas del ATS y AATS se puede obtener una disminución del costo esperado del 6.23%, 2.92%, 1.50%, 0.8%, 0.45%, 0.05% y 0% para corrimientos en la media de 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 y 2, respectivamente, usando el AG como medio de solución. Por lo tanto, para corrimientos grandes de la media es mejor utilizar el modelo económico estadístico que el modelo económico ya que la diferencia en costos no es significativa y el modelo estadístico provee mejor comportamiento estadístico. Por otro lado para corrimientos pequeños de la media si es necesario evaluar si es más importante la disminución de los costos versus la eliminación de las propiedades estadísticas.

Los valores de PR_1 y PR_2 resultaron en una disminución de costos esperados de 10.79%, 5.71%, 3.60%, 2.73%, 2.16%, 1.66% y 1.26% en relación a los resultados de AG y 9.74%, 5.4%, 3.48%, 2.66%, 2.11%, 1.63% y 1.25% en relación al resuelto con PCS para corrimientos en la media de 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 y 2, respectivamente. De esto se puede concluir que la solución con el algoritmo genético representa una disminución significativa de los costos en referencia a la solución con programación cuadrática secuencial.

El valor de PR_4 indica que las solución del modelo económico con el AG disminuye los costos esperados en un 14.21%, 7.91%, 5.08%, 3.51%, 2.62%, 1.71% y 1.27% en relación a la solución con PCS para corrimientos en la media de 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 y 2 respectivamente.

En términos del ahorro total esperado derivado de utilizar determinado método de solución, se calculó la siguiente expresión:

$$Ahorro\% = \frac{[(Modelo_1) - (Modelo_2)]}{(Modelo_2)} * 100 \quad (18)$$

La Tabla 1 resume los ahorros obtenidos y nos permite observar las diferencias entre los distintos modelos ilustrados. Los valores negativos indican que el desempeño del modelo ubicado en la parte inferior izquierda es inferior, en el porcentaje ilustrado, en relación al modelo ubicado en la parte superior. Cabe recordar que es deseable obtener valores altos de ATS y valores pequeños de AATS, por lo tanto, aun cuando la formula arroja signos positivos para el parámetro ATS en la tabla se colocó el signo inverso para sus resultados indicando que no es conveniente para el

modelo de la izquierda tener este parámetro mayor que el modelo de la parte superior.

El modelo económico-estadístico resuelto con PCS posee un costo promedio superior en un 4.2% (en relación a el mismo) y 4.3% (en relación al AG) al modelo resuelto con el algoritmo genético. Además, tiene un comportamiento del AATS inferior en un 1.6% (en relación a el mismo) y 1.7% (en relación al AG) pero un mejor comportamiento en el desempeño del AST aumentándolo en un 19.4% (en relación a el mismo) y 24.1% (en relación al método con algoritmos genéticos).

Tabla 1.

Diferencias de porcentual del costo por escenario

		ESD/VP/ AG	ESD/VP/ PCS	ED/VP/ AG	ED/VP/ PCS
ESD/VP/ AG	ECT U	-	-4.2%	2.0%	-3.4%
	AST	-	19.4%	-429.5%	-8.7%
	AATS	-	-1.6%	9.8%	2.6%
ESD/VP/ PCS	ECT U	4.3%	-	6.4%	0.8%
	AST	-24.1%	-	-557.2%	-35.0%
	AATS	1.7%	-	11.7%	4.3%
ED/VP/ AG	ECT U	-1.9%	-6.0%	-	-5.3%
	AST	81.1%	84.8%	-	79.5%
	AATS	-9.0%	-10.4%	-	-6.6%
ESD/VP/ PCS	ECT U	3.5%	-0.8%	5.6%	-
	AST	8.0%	25.9%	-387.0%	-
	AATS	-2.5%	-4.1%	7.1%	-

El modelo económico resuelto con el AG disminuye los costos en un 2% (en relación a el mismo) y 1.9% (en relación al modelo económico-estadístico) al modelo económico-estadístico. También, tiene un comportamiento del AATS inferior en un 9.8% (en relación a el mismo) y 9% (en relación al modelo económico-estadístico) pero un mejor comportamiento en el desempeño del AST aumentándolo en un 429.5% (en relación a el mismo) y 81.1% (en relación al modelo económico-estadístico).

Finalmente, se detectó que el algoritmo genético como método de optimización mejora significativamente los costos asociados al problema. Por otro lado, a la hora de seleccionar que diseño es más conveniente para la compañía, entre económico o económico-estadístico, se recomienda evaluar las implicaciones de no restringir el modelo y permitir que variables como las falsas alarmas intervengan con mayor frecuencia en el proceso.

4. Conclusiones

Con los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología, podemos afirmar que el uso del algoritmo genético como método de optimización permite obtener mejores resultados que la optimización utilizada en el artículo original de De Magalhaes et al. [16]. Lo anterior, gracias a que el algoritmo genético arroja parámetros que minimizan en una mayor proporción el costo de calidad

asociado al monitoreo con cartas VP. Las mayores diferencias entre los modelos se encuentran en corrimientos pequeños de la media.

En lo referente a facilitar la implementación de un modelo económico y económico-estadístico, podemos decir que se logra gracias a la utilización de un software accesible a las empresas y que puede ser fácilmente ejecutado utilizando el complemento Evolver de Excel. Por esto, ya no será necesaria la programación de algoritmos que permitan obtener los parámetros óptimos ni de programas que en muchos casos son de difícil acceso y manejo. Otra ventaja del procedimiento propuesto es que brinda información sobre como graficar las muestras en la carta de control y así disminuir los errores asociados a la complejidad de variar los parámetros de acuerdo al comportamiento del proceso.

Agradecimientos

Este artículo fue escrito en el marco del proyecto Desarrollo de un *Modelo de Cartas de Control para Procesos Altamente Correlacionados* No.121552128846, financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colombiano, COLCIENCIAS (contrato 651-2011) y ejecutado por la Universidad del Norte.

Referencias

- [1] Costa, A.F.B. y Rahim, M., Economic design of X charts with variable parameters: The Markov chain approach. *Journal of Applied Statistics*, 3, (1), pp. 875-885. 2001.
- [2] Apley, D. y Lee, H., Design of Exponentially Weighted Moving Average Control Charts for Autocorrelated Processes With Model Uncertainty. *Technometrics*, 45, (3), pp. 187-198. 2003.
- [3] De Magalhaes, M.S., Costa A.F.B. y Moura- Neto, F.D. Joint economic model for totally adaptive X and R charts. *European Journal of Operational Research*, 99, pp. 236-246. 2006.
- [4] Reynolds Jr., M. R., Amin, R.W., Arnold, J., y Nachlas, J.A. X charts with variable sampling intervals. *Technometrics*, 30, pp. 181-192. 1988.
- [5] Costa, A.F.B. X control chart with variable sample size. *Journal Quality of Technology*, 26, pp. 155-163. 1994.
- [6] Das, T. K. y Jain, V. A Design Methodology for Random Sampling Policies for X-Bar Control Charts. *IIE Transactions on Quality and Reliability Engineering*, 29, 9. 1997.
- [7] Das, T.K., Jain, V. y Gosavi A. Economic design of dual-sampling interval policies for X charts with and without run rules. *IIE Transactions*, 29, pp. 497-506. 1997.
- [8] De Magalhaes, M.S., Epprecht, E.K. y Costa, A.F.B. Economic design of a VP X chart. *International Journal of Production Economics*, 74, pp. 191-200. 2001.
- [9] Prabhu, S.S., Runger, G. C., y Keats, J.B. X chart with adaptive sample sizes. *International Journal of Production Research*, 31, pp. 285-290. 1993.
- [10] Parkhideh, B. y Case, K. E. The economic design of a dynamic X-control chart. *IIE Transactions*, 21(4), pp. 313-323. 1989.
- [11] Ohta, H. y Rahim, M. A. A Dynamic Economic Model for an X-Control Chart Design. *IIE Transactions*, 29, pp. 481-486. 1997.
- [12] Prabhu, S.S., Montgomery, D.C. y Runger, G.C. A Combined Adaptive Sample Size and Sampling Interval X Control Scheme, 26, pp. 164-176. 1994.
- [13] Montgomery, D. C. The Economic Design of Control Charts: A Review and Literature. *Journal of Quality Technology*, 12, pp. 75-8. 1980.
- [14] Keats, J.B., Castello, E.D, Collani, E.V. y Saniga, E.M. Economic modeling for statistical process control. *Journal of Quality Technology*, 29, 2, pp. 144. 1997.
- [15] Lorenzen, T.J., y Vance, L.C. . The economic design of control charts: A unified approach, *Technometrics*, 28, pp. 3-10, 1986.
- [16] De Magalhaes, M.S., Costa, A.F.B., y Epprecht, E. K. Constrained Optimization Model for the Design of an Adaptive X Chart. *International Journal of Production Research*, 40, pp. 3199 - 3218. 2002.
- [17] Peña-Baena Niebles, R.P. y Sanjuán M. Diseño de un experimento para evaluar el uso de la carta EWMA con predicción en el monitoreo de procesos correlacionados. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 15, pp. 67-83, 2004
- [18] Woodall, W.H. Weaknesses of the economic design of control charts. *Technometrics*, 28, pp. 408-410. 1986.
- [19] Bai, D. S., y Lee, K. T. An economic design of variable sampling interval X-bar control charts. *International Journal of Production Economics*, 54, pp. 57-64. 1998.
- [20] Costa, A.F.B. Joint X and R Charts with Variable Sample Sizes and Sampling Intervals. *Journal of Quality Technology*, 31, pp. 387-397. 1999.
- [21] Ross, S.M. *Applied Probability Models with Optimization Applications*. Holden-Day, San Francisco. 1970.
- [22] Chen, Y. K. An Evolutionary Economic-Statistical Design for VSI X Control Charts Under Non-normality. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22, pp. 602- 610. 2003.
- [23] Chen, Y. K. Design of X control charts for non normal data using variable sampling policy. *International Journal of Production Economics*, 92, pp. 61-74. 2004.
- [24] Aparisi, F. and García-Díaz, J. C. Economic design of EWMA control charts using regions of maximum and minimum ARL. *IIE Transactions*, 37, (11), pp. 1011-1021. 2005.
- [25] Chen, Y. K., and Chiou, K. C. Design of VSI X control charts for monitoring correlated samples. *Quality and Reliability Engineering International*, 21, pp. 757-768. 2005.

Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization

Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización

Eduardo Gómez-Luna ^a, Diego Fernando-Navas ^b, Guillermo Aponte-Mayor ^c
& Luis Andrés Betancourt-Buitrago ^d

^a Dr. Ing Electricista. Grupo GRALTA, Universidad del Valle, Colombia eduardo.gomez@correounivalle.edu.co

^b M.Sc, Ing. Electricista. Profesor Asistente, Grupo GRALTA, Universidad del Valle, Colombia diego.navas@correounivalle.edu.co

^c Dr. Ing. Electricista. Profesor Titular, Grupo GRALTA, Universidad del Valle, Colombia guillermo.aponte@correounivalle.edu.co

^d M.Sc, Ing. Grupo GAOX, Universidad del Valle, Colombia luisandresbetancourt@gmail.com

Received: February 11th, 2013. Received in revised form: November 13th, 2014. Accepted: February, 18th, 2014

Abstract

This paper presents a methodology to find, organize and analyze the information in any field of research, thereby facilitating the acquisition of the available information and the identification of the main authors, the number of publications per year, the main areas of work and the future trends in a proposal topic. It is also, showns an application of the methodology for the topic "Frequency Response Analysis with the transformer in service (FRA on-line)".

Keywords: Literature review, database, technology watch, bibliometric.

Resumen

Este documento presenta una metodología para búsqueda, organización y análisis de la documentación en cualquier campo de investigación, facilitando la adquisición de la información disponible y la identificación de los principales autores, el número de publicaciones por año, las principales áreas de trabajo y las tendencias futuras de un tema propuesto. Se presenta también una aplicación de la metodología para el tema de "Análisis de la respuesta en frecuencia con el transformador energizado (FRA on-line)".

Palabras Clave: Revisión bibliográfica, base de datos, vigilancia tecnológica, gestores de referencias, bibliometría.

1. Introducción

El trabajo de revisión bibliográfica constituye una etapa fundamental de todo proyecto de investigación y debe garantizar la obtención de la información más relevante en el campo de estudio, de un universo de documentos que puede ser muy extenso [1]. Dado que en la actualidad se dispone de mucha información científica y su crecimiento es exponencial, el problema de investigar es precedido por el ¿cómo? manejar tanta información de forma eficiente [2].

La revisión bibliográfica o estado del arte corresponde a la descripción detallada de cierto tema o tecnología, pero no incluye la identificación de tendencias que puedan plantear diferentes escenarios sobre el desarrollo de la tecnología en cuestión y que permitan tomar decisiones estratégicas. Para ello se emplea la Vigilancia Tecnológica [3-4], la cual permite comprender los cambios tecnológicos

del entorno a través de la revisión periódica de diferentes fuentes. Este último aspecto no es tema del presente artículo.

La metodología que se presenta para la revisión bibliográfica está compuesta de tres fases fundamentales, las cuales deben retroalimentarse a lo largo de la búsqueda.

2. Paquetes computacionales de apoyo

En general, existen muchas plataformas en forma de software que permiten realizar estructuración de la información y en ciertos casos, algunas son tan avanzadas que hacen minería de datos y estadística multivariada para facilitar la obtención de información que no se tendría a simple vista.

Algunos de estos programas se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1.
Software de apoyo para la gestión documental

Nombre	Características	Ventajas
GOLDFIRE Apoyo a la VT y gestión documental	Es un software analizador que lee los contenidos de Internet, de bases de datos locales, de bases de artículos científicos y de patentes.	Identifica las soluciones a preguntas hechas en lenguaje natural, permite la extracción de valor de los documentos. Permite establecer la evolución de una tecnología, el perfil de una organización en cuanto a su actividad de patentes; identificar las organizaciones implicadas en el desarrollo de determinadas patentes, la citación de patentes, de inventores, etc.
WebQL	Es una herramienta de software diseñada para recuperar información de fuentes no estructuradas, semi-estructuradas, y estructuradas.	La información es extraída en diferentes formatos: HTML, XML, pdf, doc, CSV, TSV, imágenes, bases de datos, etc. También, permite navegar a través de sitios pertenecientes a la "deep web".
MATHEO PATENT Apoyo a VT solo de patentes y gestión documental	Es un software diseñado para automatizar las tareas de búsqueda, recuperación y análisis de patentes de las bases de datos de la Oficina de Patentes de los EE.UU. (USPTO) y de la Oficina Europea de Patentes (EPO).	Permite la búsqueda automática de patentes, y su gestión documental.
Biowiadom (antes Refviz u Omnidiviz)	Es un software de visualización de documentos científicos o estructurados.	Permite hacer agrupación de información basado en técnicas estadísticas multivariadas para determinar similitud de documentos que se traducen en áreas de trabajo o temáticas.
Zotero	Es un software para la gestión documental en la investigación. Se basa en la organización categórica de los documentos y referencias en múltiples formatos.	La ventaja de Zotero está en su integración con los navegadores de Internet, la posibilidad de sincronización y el uso de diferentes formatos.
Mendeley Desktop	Al igual que Zotero es un gestor documental de información científica. Está más orientado a ser una red social científica.	Las ventajas están en su utilización intuitiva, el manejo de documentos, la facilidad de importación y exportación y el compartimiento de documentos en grupos privados y públicos, dando soporte al trabajo de investigación en la red social científica.
JabRef	Es un gestor documental de código abierto desarrollado sobre Java.	Es una multiplataforma de código abierto, que opera bajo el formato BibText, lo cual permite la personalización y adaptabilidad a las distintas fuentes de información. Permite crear etiquetas automáticas por títulos, autores y otros campos adicionales.

3. Metodología

La metodología propuesta para la revisión bibliográfica puede ser aplicada a cualquier tema de investigación para determinar la relevancia e importancia del mismo y asegurar la originalidad de una investigación. Además, permite que otros investigadores consulten las fuentes bibliográficas citadas, pudiendo entender y quizás continuar el trabajo realizado. La metodología propuesta se compone de tres fases:

3.1. Definición del problema

Debe ser lo suficientemente clara para poder realizar una búsqueda bibliográfica que responda a las necesidades del investigador en particular, y que además aporte al estado de la técnica, de manera que conduzca a un escenario bastante amplio y permita la retroalimentación de la investigación.

3.2. Búsqueda de la información

Para el proceso de investigación bibliográfica se debe contar con material informativo como libros, revistas de divulgación o de investigación científica, sitios Web y demás información necesaria para iniciar la búsqueda.

Una búsqueda bibliográfica debe hacerse desde una perspectiva estructurada y profesional. Leer documentación

que no tenga fundamentos es aburrido y termina por ser una pérdida de tiempo. Por supuesto, cuando se inicia un proceso de búsqueda bibliográfica no se sabe qué material es el más pertinente o relevante, sin embargo, a medida que se avanza la perspectiva mejora y se empiezan a definir los temas que realmente interesan. Por tanto, se hace necesario delimitar la búsqueda y saber cuándo parar, aunque exista un sin número de preguntas por responder antes de abordar el tema principal del proyecto.

El material que se emplee debe ser "reconocido", es decir, no puede consistir meramente en conversaciones de pasillo o en archivos descargados de Internet sin mayores referencias. Los trabajos reconocidos son aquellos que han sido revisados cuidadosamente por expertos antes de ser publicados.

La información se presenta en multitud de formatos, unos más accesibles, más reconocidos y mejor valorados "académicamente" que otros, entre estos: libros, revistas, actas de congresos, reportes técnicos, normas, tesis e Internet. Los libros son el punto de partida de cualquier investigación bibliográfica, pues proporcionan una buena base y una visión global del tema elegido [5].

Las revistas contienen artículos (generalmente revisados por expertos) actualizados y especializados, por lo tanto, más difíciles de asimilar. En el caso que no se entienda

alguna teoría o concepto que no deja avanzar en el proyecto, lo más pertinente es estudiar los libros para adquirir una base sólida antes de intentar entender los artículos más actuales y las últimas teorías publicadas en revistas.

Las actas de congresos contienen artículos presentados en conferencias nacionales e internacionales. La calidad de estos artículos varía mucho, dependiendo del proceso de revisión y de la experiencia y trayectoria de los revisores.

Los reportes técnicos por lo general son informes de proyectos de investigación realizados por universidades y/o empresas públicas o privadas, en los que se encuentra información de gran utilidad. En ocasiones es difícil acceder a estos ya que la política de publicación depende de la entidad que los realiza, en algunos casos los reportes técnicos dan información para alguna aplicación en particular y promover cierta marca o producto.

Las normas ó estándares a nivel nacional o internacional, marcan una pauta o guía a considerar en la ejecución de procedimientos específicos. Son el resultado de las opiniones y sugerencias de expertos en un tema, permitiendo al investigador trabajar con fundamento y credibilidad.

Las tesis son las memorias e informes publicados como resultados de trabajos de investigación de maestría y/o doctorados, estas constituyen una fuente de ideas de actualidad y contienen una serie de valiosas referencias bibliográficas.

El Internet aparece como una valiosa fuente de información, pero se debe tratar con extrema cautela, pues se pueden perder horas navegando sin encontrar nada de valor y el material encontrado puede ser poco fiable.

Con el fin de definir el dominio de la investigación, se deben utilizar ecuaciones de búsqueda (expresiones que consisten de palabras claves y operadores lógicos) que incluyan términos específicos del tema a investigar, además, se deben estudiar los patrones semánticos y de citación e identificar en primera instancia la estructura cognitiva para así, determinar las principales líneas de investigación desarrolladas en el mundo para el estudio del tema. Se deben aplicar criterios de selectividad de manera que el investigador se enfoque en los documentos relevantes para la investigación y si, a pesar de todo, existe demasiada información, quizás el tema elegido sea excesivamente amplio y sea necesario enfocarlo aún más.

3.3. Organización de la información

Esta fase es de gran importancia en todo proyecto de investigación, consiste en organizar de manera sistemática la documentación encontrada. Se puede realizar tanto de manera básica o detallada. Inicialmente la información puede ser ordenada en carpetas u hojas de cálculo desarrolladas por el propio investigador de forma manual, sin embargo, el proceso es lento y deficiente; otra manera de hacerlo es mediante el uso de programas especiales tales como [6]: JabRef, Zotero, Mendeley, Endnote y Reference manager, mostrados en la Tabla 1. Estas aplicaciones son eficientes, de uso libre y permiten organizar fácilmente la información por título, autor, revista y aporte; además, generan fácilmente la bibliografía para el informe final.

Una manera de organizar la información es por relevancia, distinguiendo los principales documentos de los secundarios. Así se obtiene una estructura o diagrama que permite identificar los pilares del tema bajo estudio. Es necesario definir una estructura para organizar la información de forma jerárquica y la cantidad de datos que se van a incluir en esta (autores, año, resumen, idea principal, etc.).

Los mapas de ideas permiten relacionar los elementos más importantes con los niveles de cercanía que hay entre estos, para aclarar la visión que se tiene de un tema. En su ejecución se pueden combinar colores y formas, a fin de facilitar la claridad visual del contenido.

Se pueden usar diagramas jerárquicos (esquemas circulares, red de contenido, esquema de barras, esquema de sangrado, esquema de llaves, etc.) para diferenciar claramente los documentos principales de los secundarios. Su elaboración requiere del conocimiento de las ideas centrales y los postulados fundamentales del tema.

Otra forma de organizar la información es mediante el uso de tablas de datos, cuyo fin es tener una estructura organizativa determinada de los datos y hacer una presentación concisa de los mismos. Las variables o características se limitan a los criterios escogidos por el autor.

3.4. Análisis de la información

La tercera fase es analizar la información ya organizada, indagando sobre cuáles son los documentos más útiles para la temática en estudio.

El análisis de la información es la tarea que toma más tiempo en la investigación bibliográfica, ya que con ella se espera identificar el aporte a realizar. En esta fase se debe tener un pensamiento crítico y debe ser realizada en paralelo con la primera, dado que es un proceso constante. Es un ciclo donde se reafirman las ideas planteadas en la formulación del problema y si se conoce bien el problema, la solución estará al alcance. Un ejemplo de las diferentes estrategias utilizadas para un adecuado análisis de la información se ha aplicado en diferentes estudios donde los resultados han sido satisfactorios. [7-8]

Una herramienta informática que facilita el análisis cualitativo de un grupo de documentos es *Refviz*, mediante la cual se puede obtener un mapa de proximidad de los artículos de acuerdo con la frecuencia de aparición de palabras en el texto, así como la creación de los listados de descriptores primarios, identificados en los grupos temáticos más significativos.

Una vez identificados los documentos principales, es necesario realizar un análisis de co-citación de autores y de co-ocurrencia, para identificar los frentes de investigación y los autores con más citaciones [9-10]. También se debe realizar un análisis detallado de los artículos que se identifiquen como directamente relacionados con las ideas más importantes y los aspectos relevantes para el tema de estudio.

El estudio de los documentos más importantes posibilita el reconocimiento de ideas principales, inferencias, conceptos claves, etc.

Se puede además realizar un análisis cuantitativo, en el que se estudien aspectos como número de documentos por año, documentos, citaciones por autor, documentos e investigaciones realizadas por país, etc.

4. Aplicación de la metodología a un tema de investigación en ingeniería eléctrica

La metodología propuesta se aplicó a un tema de ingeniería, relacionado con transformadores eléctricos, siguiendo las etapas indicadas antes:

4.1. Definición del problema

Como tema se definió el “análisis de la respuesta en frecuencia con el transformador en servicio (FRA on-line)”.

4.2. Búsqueda de la información

Una vez definido el problema a investigar, se consultaron diferentes fuentes de información, entre normas, reportes técnicos, patentes, revistas especializadas, memorias de conferencias y simposios y tesis doctorales; empleando las ecuaciones de búsqueda mostrada en la Tabla 2.

Tabla 2.
Ecuaciones de búsqueda empleadas para el caso de investigación.

Ecuación de búsqueda	Resultados
Transfer function AND transformer	522
Frequency Response Analysis AND transformers	592
FRA AND transformer	86
monitoring transformer winding AND frequency response analysis	31
Monitoring transformer AND transfer function	44
Diagnosis in transformer AND transfer function	44
Monitoring AND transformer AND FRA	30
Monitoring on line in transformers AND transfer function	17
Monitoring on line in transformers AND Frequency Response Analysis	16
Total	1382

La Figura 1 muestra los porcentajes de impacto de cada fuente sobre el total de la búsqueda realizada, lo cual define el dominio de la investigación.

Como se observa en la Tabla 2, se emplearon nueve (9) ecuaciones de búsqueda, teniéndose entre algunas de ellas solo leves modificaciones, pero que alteran los resultados encontrados. Es por ello importante en este paso considerar todas aquellas palabras claves que estén relacionados con la temática bajo estudio, incluso las abreviaciones empleadas, para reducir la probabilidad de pérdida de información valiosa.

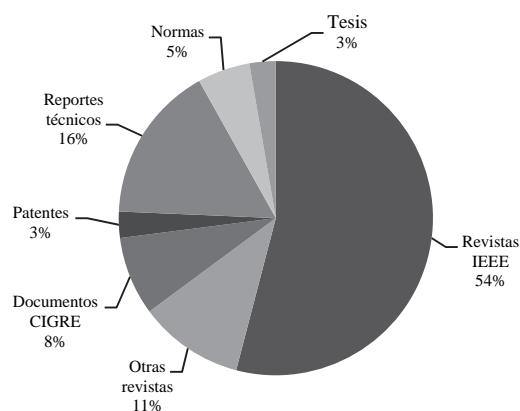


Figura 1. Material informativo consultado durante la búsqueda.

4.3. Organización de la información

Los 1382 documentos encontrados fueron organizados y analizados, aplicando los criterios de selectividad para identificar los más relevantes; para lo cual se empleó el software *Refviz*, el cual agrupa por temáticas y de forma autónoma (ecuaciones de búsqueda) toda la documentación. Esto permite ver todo el universo de búsqueda clasificado en temáticas, en un mapa de ideas que el software denomina una galaxia (Figura 2).

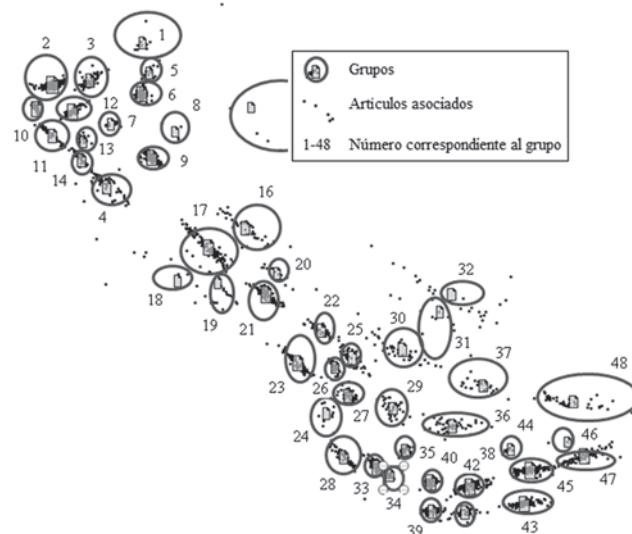


Figura 2. Organización sistemática de la documentación a través de un mapa de ideas (galaxia).

Los 1382 documentos encontrados inicialmente fueron agrupados en 48 temas de interés, mostrados en el mapa de ideas o galaxia de la Figura 2, donde cada idea se encierra en un círculo, que a su vez representa uno de los grupos encontrados (tema) con los documentos relacionados, facilitando el análisis de la información en las etapas posteriores.

Adicionalmente a *Refviz*, se empleó *Mendeley* para organizar por categorías los documentos. En la Figura 3 se observa un pantallazo con parte de los resultados para el caso objeto de estudio.

Esto permitió la creación de los diagramas jerárquicos

(esquemas de barras) mostrados en las Figuras 4, 5 y 6 que ayudan a diferenciar los documentos principales de los secundarios.

En estas Figuras se puede visualizar aspectos como: los autores que más han publicado en la temática de estudio, los que más han sido citados y la relación de las publicaciones

con los años.

La Figura 7 muestra una tabla de datos donde se presentan los diferentes países en los que se han realizado investigaciones en el tema, lo cual puede ayudar en la búsqueda de posibles aliados investigativos.

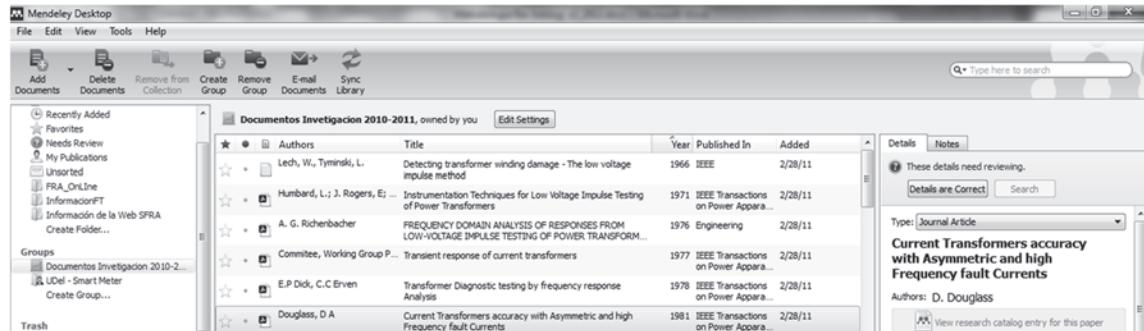


Figura 3. Organización de la información mediante la herramienta Mendeley.

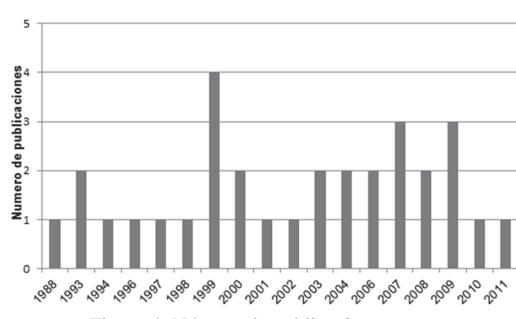


Figura 4. Número de publicaciones por año.

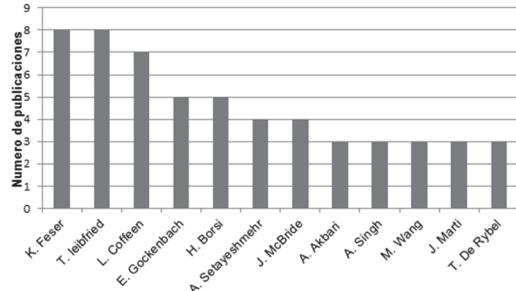


Figura 5. Número de publicaciones por autor.

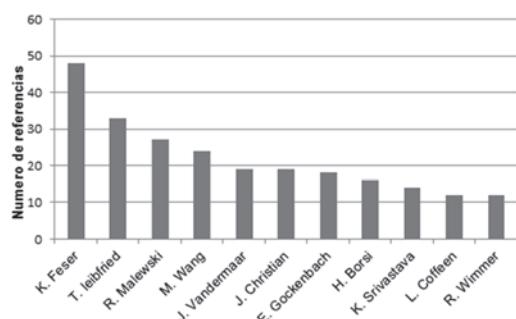


Figura 6. Autores más citados en los documentos.

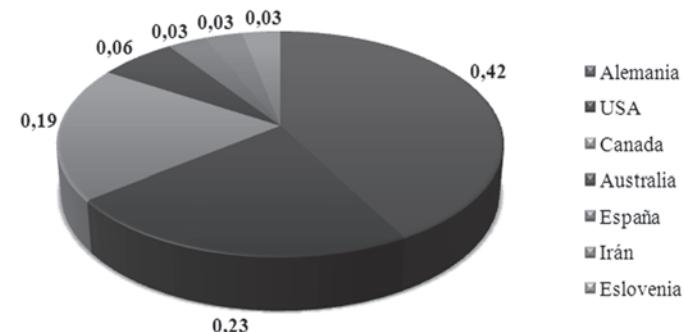


Figura 7. Países en los que se publicaron los documentos.

Mediante estos diagramas, se logra tener una idea más clara del tema y se empieza a focalizar sobre los aspectos de particular interés.

4.4. Análisis de la información

La información organizada, se debe analizar, para lo que se empleó la herramienta Mendeley. Identificados los autores con más citaciones (Figura 6) se realizó un análisis sobre los principales artículos con las ideas más importantes y los aspectos más relevantes para el tema de estudio, mediante la lectura de los resúmenes y conclusiones de dichos artículos.

Una vez realizado este trabajo, de los 48 grupos conformados en la etapa de búsqueda de la información, se seleccionaron 8 como los de mayor interés, los cuales son mostrados en la Figura 8. Estos grupos los conforman 71 artículos.

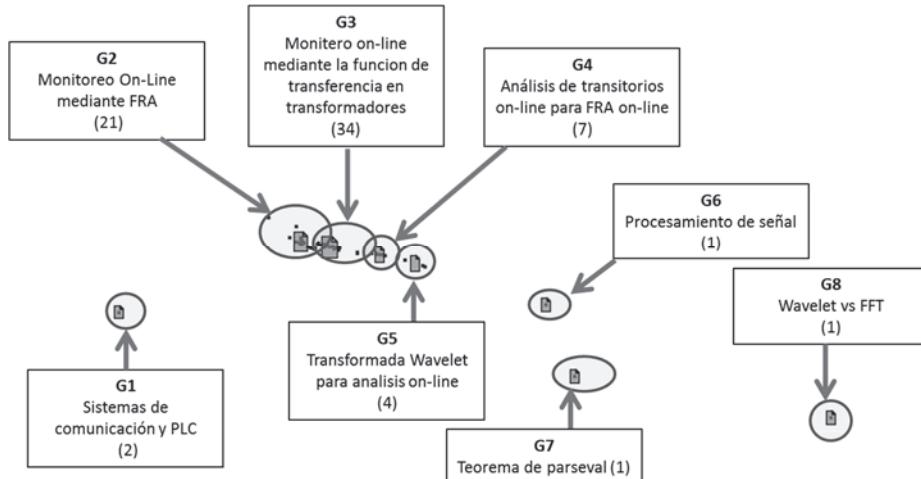


Figura 8. Grupos de interés para la investigación.

En esta etapa de la metodología se observa un avance significativo, ya que de los 1382 documentos iniciales se tienen 71 identificados como de mayor interés (primarios).

Los documentos filtrados debieron ser leídos con mayor detalle, para de esa manera finalmente seleccionar los de verdadera relevancia para la investigación. La metodología concentra la lectura sobre un menor número de artículos ya identificados como de mayor interés. Sería imposible e impráctico leer detalladamente dentro de un tiempo prudente los más de 1000 documentos iniciales.

Con la lectura detallada, finalmente se seleccionaron 23 artículos de los 71 y con estos se elaboró el estado del arte sobre el tema la respuesta en frecuencia con el transformador en servicio (FRA on-line), el cual fue publicado en una revista internacional [11].

5. Conclusiones

En este artículo se presentó una metodología para realizar revisión bibliográfica sobre cualquier tema de investigación, mediante una macro búsqueda que permite la identificación de los documentos referentes al tema de investigación.

Las estrategias de búsqueda, organización y análisis de la información, permiten tanto la obtención de los documentos referentes a un tema de investigación, así como su sistematización y estructuración con el objeto de analizar las principales características del conjunto de documentos bajo estudio.

Se presentó un caso de aplicación sobre el tema de análisis de la respuesta en frecuencia de transformadores energizados (FRA on-line), en donde se identificaron las principales categorías y áreas de interés, y se realizó la organización y el análisis de los documentos a través de Mendeley y Refviz respectivamente.

La metodología planteada permite realizar de manera organizada y secuencial una de las etapas más importante de todo proyecto de investigación: “la revisión bibliográfica”.

Referencias

- [1] Aleixandre-Benavent, R, González Alcaide, G, González De Dios, J, y Alonso-Arroyo, A. Fuente de información bibliográfica (I). Fundamentos para la realización de búsquedas bibliográficas. *Acta Pediátrica Española*, 69 (3), pp. 131-136, 2011.
- [2] Vilanova, J.C. Revisión bibliográfica del tema de estudio de un proyecto de investigación. *Radiología*, 54 (2), pp. 108-14, 2012.
- [3] Castañanos, O. F. Torres, L.M. y Rossero, J. Aplicación de un modelo de inteligencia para la definición de estrategia tecnológica en diferentes niveles de complejidad institucional, en Seminario Latino-Iberoamericano de gestión tecnológica (XI, 2005, Brasil). Memorias.
- [4] Rodriguez Salvador - Marisela. La inteligencia tecnológica: elaboración de mapas tecnológicos para la identificación de líneas recientes de investigación en materiales avanzados y sinterización, tesis (Doctorado en Administración y Dirección de Empresas), España, Universidad Politécnica De Cataluña, 1999, 180 p.
- [5] Cisneros, M y Olave, G. Redacción y publicación de artículos científicos: enfoque discursivo, 1a ed., Bogotá, Editorial ECOE, 2012, pp. 139.
- [6] Rivera, F. y García Rojo, M. La búsqueda de bibliografía: nuevas soluciones para un viejo problema. *Nefrología*, 23 (6), pp. 487-496, 2003.
- [7] Rojas-Sola, J. I., Fernández-Sora, A., Serrano-Tierz, A Y Hernández-Díaz, D. Una revisión histórica: desde el dibujo en ingeniería hacia la ingeniería del diseño, *Revista Dyna*, 78 (167), pp. 17-26, 2011.
- [8] Bedoya, A., Castrillón, J. C., Ramírez, J. E., Vásquez, J. E Y Zabala, M. A. Producción biológica de hidrógeno: una aproximación al estado del arte, *Revista Dyna*, 75 (154), pp. 137-157, 2008.
- [9] White, H. D And Mccain, K. W. Visualizing a discipline: an author co-citation analysis of information science, *Journal of the American Society of Information Sciences*, 49 (4), pp. 327-355, 1998.
- [10] Salton G. Automatic indexing using bibliographic citations, *Journal of Documentation*, 27 (2), pp. 98-110, 1971.
- [11] Gómez-Luna, E., Aponte, G., González-García, C. And Pleite, J. Current Status and Future Trends in the Frequency Response Analysis (FRA) with the Transformer in Service, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28 (2), pp. 1024-1031, 2013.



Wireless surveillance system for greenhouse crops Sistema inalámbrico de monitorización para cultivos en invernadero

Alejandro Cama-Pinto ^a, Francisco Gil-Montoya ^b, Julio Gómez-López ^c, Amos García-Cruz ^d
& Francisco Manzano-Agugliaro ^e

^a Ingeniero de telecomunicaciones. Universidad de la Costa. Barranquilla-Colombia. Facultad de Ingeniería. acama1@cuc.edu.co

^b Doctor. Profesor del dpto. de Ingeniería, Universidad de Almería. España pagilm@ual.es

^c Doctor Ingeniero Informático. Universidad de Almería. España jgomez@ual.es

^d Doctor Profesor del dpto. de Ingeniería, Universidad de Almería. España amos@ual.es

^e Doctor Profesor del dpto. de Ingeniería, Universidad de Almería. España fmanzano@ual.es

Received: February 7th, 2013. Received in revised form: August 20th, 2013. Accepted: November 4th, 2013

Abstract:

The agriculture in the southeast Spain has experimented important changes in the last years due to the greenhouse crops. In this kind of crops is very important the use of advanced techniques and new technologies to improve the crop efficiency. This work presents an advanced system to monitor the variables applied on greenhouse crops. The monitoring system uses a wireless sensor network (WSN) that works with 6LoWPAN and RPL as the routing protocol. It measures humidity, temperature, light, and volumetric water content in the soil. The WSN sends the recollected data to an embedded device which stores the information on a data base, so it is possible to visualize in real time the values obtained of crops as a graphic. The developed system allows installation flexibility and adaptation to any greenhouse. Because it is based on: Wireless technology, nodes can establish links automatically, and have implemented a function for saving energy which can extend the life of the batteries enough for a crop year without maintenance.

Keywords: Wireless Sensor Network, greenhouse, surveillance, 6LoWPAN.

Resumen

La agricultura del sureste español ha experimentado uno de los cambios más importantes que se han producido en los últimos años gracias a los cultivos de invernadero. En este tipo de cultivos es muy importante la utilización de técnicas avanzadas y tecnologías novedosas para mejorar el rendimiento de los cultivos. Este trabajo presenta un sistema avanzado para la monitorización de variables aplicadas a la agricultura intensiva. El sistema usa una red de sensores inalámbricos (WSN) que funciona con 6LoWPAN y RPL como el protocolo de enrutamiento, mide humedad, temperatura, luz y el contenido volumétrico de agua en el suelo. La WSN envía los datos recolectados a un dispositivo embebido que almacena la información en una base de datos a fin de visualizar de forma gráfica y en tiempo real los valores obtenidos en los cultivos. El sistema desarrollado permite una gran flexibilidad de instalación y de adaptación a cualquier invernadero, ya que se basa en tecnología inalámbrica, que los nodos pueden establecer las rutas de los enlaces entre ellos automáticamente, y tienen implementada una función de ahorro de energía que le permite alargar la vida útil de las baterías lo suficiente para una campaña agrícola sin necesidad de mantenimiento.

Palabras clave: Red de Sensores inalámbricos, Invernaderos, monitorización, 6LoWPAN.

1. Introducción

El Mediterráneo es el segundo lugar a nivel mundial en superficie total de invernaderos tras China [1]. En España el 70% están concentrados en el sureste peninsular, siendo Almería la provincia que presenta la mayor concentración de estos con aproximadamente 37500 ha [2]. A pesar de ser uno de los lugares más secos de Europa [3,4] es a la vez una de las regiones agrícolas más productivas del continente. Uno de los principales retos actuales de los invernaderos es el control del clima para lograr mayor eficacia en el aprovechamiento de los recursos hídricos [5]. Destaca de manera muy significativa el coste del agua y de la energía

eléctrica asociada, debido al bombeo que se realiza para obtener la presión necesaria en el riego por goteo [6].

De forma general, el control de irrigación se realiza con simples temporizadores configurados por los propios agricultores y según su propia experiencia. Lo habitual son sistemas avanzados que programan ciclos de irrigación teniendo en cuenta únicamente el tiempo, sin información de posibles sensores de humedad.

Aunque estos métodos intuitivos para la programación de la irrigación pueden dar buenos resultados con la experiencia, tienden a ser muy subjetivos con diferentes operadores. Por otro lado, esta práctica se ve reforzada debido a que los costes de irrigación han sido bajos respecto

al total de los costes de producción. Por consiguiente, la cantidad de agua aplicada se decide en base a la disponibilidad, más que a las necesidades reales del cultivo [7]. Otros factores que no se tienen en cuenta son la calidad del agua y la disponibilidad de la misma en el suelo. Por todo ello se hace necesario plantear un sistema de monitorización que permita recoger estas variables y ofrecerlas al usuario en tiempo real y a zonas alejadas del invernadero, por ejemplo vía Web. Hasta ahora los sistemas de monitorización existentes en invernadero se basaban en sistemas cableados [8], lo cual los hace engorrosos de instalar y caros de mantener, además están limitados a estar siempre en el mismo sitio.

En los últimos años se han propuesto aplicaciones de monitorización en diversos sectores como la salud [9], la industria [10], o la preservación de espacios naturales como el amazonas [11]. También se ha visto que las redes de sensores inalámbricos (WSN – Wireless Sensor Network) pueden jugar un papel muy importante en la monitorización de los invernaderos [12]. Con la tecnología inalámbrica se proporciona flexibilidad en la instalación de los sensores, robustez en la red, mientras que se reduce el coste y la complejidad de su mantenimiento.

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar y desplegar un sistema de monitorización avanzado utilizando la tecnología WSN para el entorno agrícola y en ambiente agresivo como el del invernadero, que ayude al agricultor a la toma de decisiones para mejorar el rendimiento del cultivo.

Los objetivos específicos son:

- Diseñar una red de sensores inalámbricos para monitorizar en invernadero: humedad, temperatura, luz y contenido volumétrico de agua del suelo.
- Diseñar un sistema que permita la recolección de los datos de la red de sensores, los almacene en una base de datos y permita mostrarlos a través de una interfaz Web.
- Evaluar el rendimiento de la WSN.

2. Materiales y métodos

2.1. Variables agronómicas estudiadas

Para mejorar la productividad de los cultivos de invernadero es fundamental tener información sobre las variables agronómicas del ambiente y del suelo [13].

2.1.1. Parámetros del ambiente

Los parámetros del ambiente que se van a controlar son los siguientes:

- Humedad relativa y temperatura. La humedad relativa indica que porcentaje de la máxima cantidad de humedad está presente en el ambiente. La humedad relativa que necesitan cultivos de invernadero para la fotosíntesis se sitúa entre el 60% y 85%, y no debería de ser menor de 40% ni mayor de 90%. Como los invernaderos son ambientes bastante cerrados, se debe prestar especial atención a las estaciones frías del año

porque la humedad relativa suele aumentar con frecuencia al 90% y 100% a raíz de que se evita el intercambio de aire con el exterior para preservar el calor [14, 15].

- Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR). En diversos cultivos la insuficiencia de luz limita el crecimiento. Esto motiva que a veces para mantener el ritmo de crecimiento de los cultivos, los agricultores proporcionen una iluminación suplementaria con objeto de incrementar el total de la PAR diaria. La sumatoria de luz total recibida en un día se le denominada Luz Integral Diaria (DLI). Así, incrementando el DLI se puede aumentar la tasa de crecimiento de las especies adaptadas al sol, reduciendo el tiempo necesario para entrar en producción un cultivo. Esta práctica contribuye a la rentabilidad pues un factor clave en el precio de los productos hortícolas es su precocidad [16].

2.1.2. Parámetros del suelo

El agua es uno de los elementos indispensables a controlar para el adecuado crecimiento y mantenimiento del cultivo. El estudio del contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC) indica cuánta agua está presente en el substrato. De acuerdo al análisis gravimétrico puede ser expresado como: Masa de agua dividido por la Masa del material sólido.

2.2. Redes de sensores

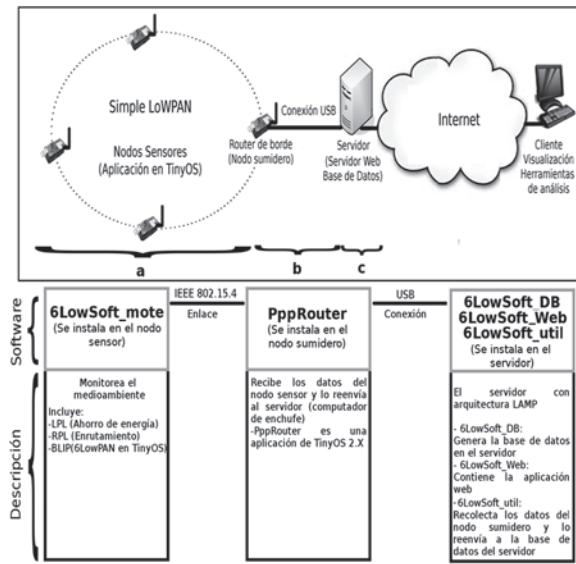
La red de sensores inalámbricos (WSN) está compuesta por varios dispositivos llamados nodos sensores que son capaces de medir cambios en el ambiente, almacenando los datos y transmiéndolos al nodo vecino a través de redes multi-salto (protocolo RPL o routing protocol). Para finalmente ser mostrados en una interfaz gráfica al usuario, por ejemplo vía Web.

Algunos de los grandes proyectos de monitorización de variables agronómicas como son COMMON-Sense [17] o Sensorscope [18], son proyectos que emplean los estándares 802.15.4 para la WSN, y 802.11 para (WiFi). Dada que la tendencia mundial es trabajar con direcciones IP, en lo denominado Internet de las cosas (IoT) donde los objetos (en nuestro caso los sensores) tienen funcionalidad digital y pueden ser identificados y rastreados automáticamente [19]. Cualquier contribución en el avance de IoT tiene que ser el resultado de las actividades sinérgicas realizados en diferentes campos del conocimiento, como las telecomunicaciones, la informática y la electrónica [20].

Nuestro estudio para estar a la vanguardia tecnológica y en consonancia con la IoT, emplea 6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks) en WSN, que dota de direcciones IP a los nodos sensores. Esta tecnología ha demostrado su utilidad también en aplicaciones ambientales a larga distancia [11].

3. Diseño del sistema

El sistema está compuesto por tres elementos (figura 1): a) los sensores que leen la información ambiental, b) enlace que transporta los datos desde el nodo sumidero al servidor; y c) el servidor que recibe, almacena y muestra los datos.



3.1. Sensores

Los sensores son los encargados de recolectar los valores de las variables ambientales y del suelo de la zona de cultivo, y transportarlos hasta el nodo sumidero. Se emplean los sensores integrados en los nodos inalámbricos y sensores externos de suelo que se acoplan a los nodos. Están basados en LoWPAN (Low-Power Wireless Personal Area Networks), que es un conjunto de nodos 6LoWPAN que comparten en común un prefijo de dirección IPv6. De los tres tipos de LoWPANs que hay, nuestro estudio está enfocado al llamado "Simple LoWPAN" [21].

3.2. Red de sensores

La WSN está formada por los nodos sensores que envían la información recolectada al nodo sumidero (multipoint-to-point) que cumple también la función de router de borde.

Si los nodos están alejados del nodo sumidero a una distancia mayor de 320 m [22] es necesario realizar multisaltos y para este fin se utiliza el protocolo de enrutamiento RPL.

3.3. El servidor

El servidor se encarga de almacenar en una base de datos la información recolectada por la WSN para poder mostrarla a los clientes, a través de la Web, de una forma cómoda y sencilla.

4. Descripción del hardware

La elección del hardware está basada en trabajos previos donde las condiciones ambientales son muy exigentes, como es el caso de la amazonia [11]. En nuestro presente también condiciones de elevada humedad y temperatura, como es el caso del microclima de un invernadero. A continuación se describe el hardware utilizado en el sistema.

4.1. Nodo TelosB

Para el despliegue de la WSN se han empleado nodos de diseño de código abierto basadas en la plataforma "TelosB" con antenas de 5 dBi de ganancia.

Estas se encargan de la recolección y transporte de los datos del suelo, así mismo tienen integrados sensores de humedad, temperatura y dos de luz para medir la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar total. Para leer la salida analógica del sensor de suelo se necesita una resolución mínima de 12 bits, siendo éste uno de los motivos por el cual se emplea el nodo TelosB. El tiempo de muestreo que se utiliza es de 5 minutos.

4.2. Sensor de suelo

Entre los sensores de humedad de suelo más utilizados y estudiados actualmente se encuentran los fabricados por la empresa Decagon. Cuenta con varios modelos (EC-5, EC-10 y EC-20) cuya principal diferencia es el tamaño del sensor del suelo. Se utiliza el modelo EC-20 principalmente por su bajo consumo de energía que es alrededor de 2mA a 2.5V. Aspecto relevante cuando trabaja en conjunto con la WSN pues se comunica y alimenta directamente del nodo, de ese modo al tener un menor consumo de energía permite un mayor tiempo de vida de la batería del nodo.

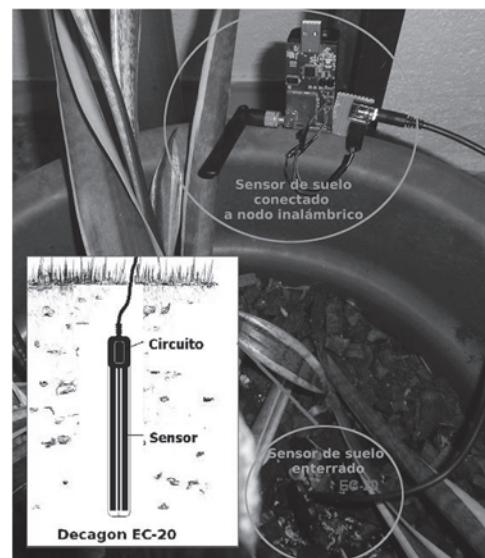


Figura 2. El sensor de suelo conectado a uno de los nodos de la WSN.

El sensor de suelo Decagon EC-20 mide el contenido volumétrico de agua y se conecta con los conectores de expansión de 6 y 10 pines del nodo. El hilo de tierra del

sensor de suelo se conecta con el pin de tierra del nodo, el de excitación con el pin GIO y su salida analógica con el pin ADC (figura 2). Dado que el sensor de suelo tiene un conector de audio, se utiliza un jack de audio como interfaz para la interconexión entre el sensor de suelo y el nodo.

4.3. Servidor

Aunque se puede emplear cualquier equipo que cumpla la función de servidor, se ha optado por un equipo con arquitectura embebida por tener más portabilidad, una mejor integración en el invernadero y un mayor ahorro de energía. Se emplea la "computadora de enchufe" Sheevaplug (figura 3) que opera con un procesador ARM de 1,2 GHz y un sistema GNU/Linux embebido (Debian 6.0).

Inicialmente el Sheevaplug tiene una memoria interna de 512 MB, pero para aumentar la capacidad de almacenamiento de la Base de Datos se utiliza una tarjeta SD de 8GB.



Figura 3. Servidor "Sheevaplug (a modo de comparación se muestra una moneda de 5 céntimos de euro).

5. Descripción del software

5.1. Implementación en TinyOS

Los nodos utilizan el sistema operativo de código abierto TinyOS [23] por ser uno de los más difundidos y con mayor documentación. Utiliza la pila de protocolos 6LoWPAN implementada por TinyOS denominada BLIP en todos los nodos de la red [24, 25]. A cada uno de ellos se le asigna una dirección IPv6, y la comunicación se realiza por enlaces de un sólo salto, o multi-saltos si la cobertura inalámbrica se encuentra fuera de su alcance.

5.1.1. El nodo Sumidero

El nodo sumidero tiene instalado la aplicación PppRouter que le permite actuar como un router de borde

pues hace que una de sus interfaces se comunique por el enlace serie con el servidor y la otra con la WSN.

5.1.2. Los Nodos Sensores

La aplicación desarrollada (6LoWSoft) se instala en los nodos sensores. Se basa en el proyecto [26], en la aplicación [27] y está programada para obtener los valores del sensor de suelo externo Decagon EC-20 y de los sensores integrados en los nodos.

La comunicación entre los datos de humedad recogidos por el sensor de suelo y el nodo se lleva a cabo a través del componente Msp430Adc12ClientC y su correspondiente interfaz. Así, por ejemplo, se establece en el código fuente al pin ADC0, para que reciba los datos de la salida analógica del sensor de suelo.

De acuerdo con la hoja de datos del sensor de suelo, este trabaja correctamente mientras el voltaje de la batería supere los 2.0 V. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el voltaje mínimo necesario del nodo para que opere correctamente su radio es de 2.1 V.

5.1.3. Ahorro de energía

El ahorro de energía es una variable importante en cualquier dispositivo [28], y más aun si el dispositivo funciona con baterías pues se reduce el mantenimiento. Para controlar el ciclo de trabajo en las radios de los nodos se añade la función LPL (Low Power Listening) [29] en todos los nodos. De esta manera se consigue mayor tiempo en la autonomía de las baterías. Esto se debe a que el mayor consumo de energía de los nodos se produce cuando la radio está operando, y es de 17.4 mA ó 19.7 mA en la transmisión y recepción respectivamente. Con LPL, un nodo enciende su radio el tiempo suficiente para detectar una portadora en el canal. Si detecta la señal portadora mantiene la radio encendida durante el tiempo que se recibe un paquete. En LPL el parámetro sleep_interval se configura como el intervalo de tiempo que la radio duerme hasta que se enciende para detectar la portadora, y está dado en ms.

5.1.4. Enrutamiento

Por tratarse de una red que puede trabajar con enlaces multi-saltos se emplea para el enrutamiento el protocolo RPL [30] (IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks). El prototipo de implementación en TinyOS 2.x es denominada TinyRPL [24]. Las pruebas realizadas muestran que tiene un funcionamiento comparable con CTP (Collection Tree Protocol) el protocolo de enrutamiento de facto de TinyOS [25].

TinyRPL encuentra las rutas de forma automática sin la necesidad de crearlas manualmente. Esto le da un enfoque realista al momento de implementarlo en cualquier invernadero, ya que no importa la posición de los nodos (siempre que cuenten con visibilidad entre ellos). Así el proyecto se puede replicar en cualquier campo agrícola sin tener en cuenta la distribución de la WSN.

5.2. La aplicación web

La aplicación Web se ha dividido en cuatro secciones: Home, Valores, Graficas y GraficaRT.

En la sección "Home" se muestra una breve descripción del proyecto con algunas imágenes y esquemas del mismo. En la sección "Valores" (figura 4) se muestran los datos en tablas mientras que en la sección "Graficas" se muestran los datos gráficamente (figura 5).

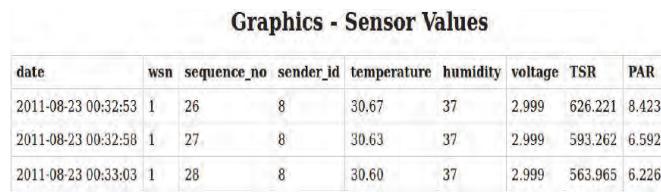


Figura 4. Ejemplo de valores registrados dentro de un período de tiempo especificado por el usuario.

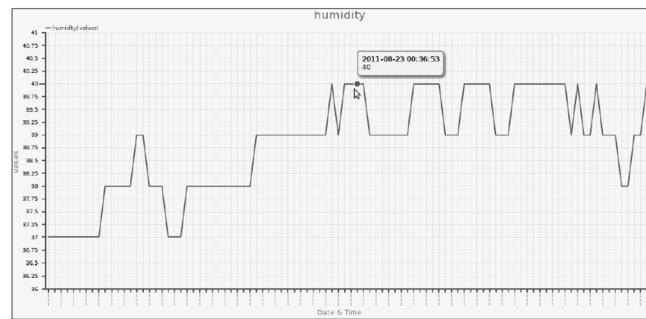


Figura 5. Gráfica de los valores de humedad dentro de un período de tiempo especificado por el usuario.

En ambos casos primero se indica el ID del nodo, la variable ambiental que desea analizar (temperatura, humedad ambiente, voltaje, PAR o VWC). Para la visualización de los datos es posible especificar un intervalo de tiempo a través de dos calendarios y horarios. De manera similar, la sección "GraficaRT" (figura 6) muestra en tiempo real los valores obtenidos por un sensor para una determinada variable.

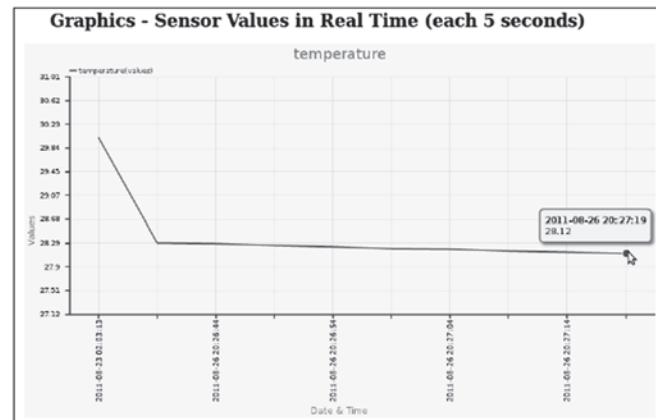


Figura 6. Gráfica actualizándose con la llegada de los valores de temperatura.

5.3. El servidor

El servidor trabaja con la estructura LAMP (Linux, Apache, MySQL y PHP como lenguaje de programación Web). Este almacena la información procedente de los sensores de la red en una base de datos y exhibe los datos a través de páginas web dinámicas desarrolladas en PHP que muestra los valores obtenidos de una manera fácil y cómoda a los usuarios a través de Internet.

Los datos que se envían desde el nodo sumidero al servidor se reciben a través de un socket UDP (User Data Protocol). Un script recoge los datos en bruto y los convierte a sus respectivas unidades de medida (por ejemplo, la temperatura se guarda en grados centígrados).

Para la generación de gráficos se utiliza Open Flash Chart que es una herramienta de gráficos basada en Flash, personalizable y basado en código abierto. Se utiliza para mostrar los valores almacenados en la base de datos en forma de gráficos estadísticos facilitando su comprensión. Por ejemplo, permitiendo ver las fechas de las muestras a lo largo de toda la gráfica mientras mueve el ratón sobre ellos. Así mismo se utiliza Ajax para dar un mayor dinamismo a la web y mostrar los datos en tiempo real. Por último, se ha creado un script que se inicia automáticamente, y que se comunica con el nodo sumidero y almacena la información de la WSN en la base de datos.

6. RESULTADOS

Dado que uno de los objetivos de diseño del sistema era que fuese autónomo durante el mayor tiempo posible. Así, se facilita la puesta en funcionamiento en invernaderos, con un mantenimiento lo más bajo posible.

Las pruebas de duración de las baterías sin LPL, fueron de 4.5 días para Alcalinas y de 6.5 días para las de Litio [11], ya que las radios están en modo de escucha el 100 % del tiempo. Para este trabajo se ha evaluado como reducir el consumo de energía de los nodos mediante la función LPL en función del intervalo de latencia o sleep_interval. La Tabla 1 muestra la duración en días, variando el sleep_interval de 512 a 2048 ms. Se observa que el rango de días útiles está entre los 75 y 625 días dependiendo de este parámetro y del tipo de batería empleada.

Tabla 1.
Duración (días) en función del tipo de baterías e intervalo de latencia (Sleep_interval).

Sleep_interval (ms)	Duración (días)	
	2 Alcalina (Duracell MN1500)	2 Litio (Energizer L91)
512	75	156
1024	145	312
2048	291	625

Pero los valores obtenidos pueden variar en función de los saltos que deban realizarse. Por ello se han analizado los datos durante una hora, para un único salto (Tabla 2), y con sensores a una distancia de 100 y de 200 m. En ambos casos se han obtenido un rendimiento óptimo del sistema teniendo una latencia media de 70.51 ms y una tasa de recepción del paquete (PRR) del 99.67% para ambas configuraciones.

Tabla 2.
Rendimiento de TinyRPL en 1 salto.

	Distancia (m)		Nº de saltos
	100	200	
Latencia (ms)	69.34	71.68	
PRR (%)	99.67	99.67	

Para enlaces multi-salto, con cada salto de 50 m. Los resultados obtenidos muestran también un comportamiento estable del sistema (véase la Tabla 3)

Tabla 3.
Rendimiento de TinyRPL en función del número de saltos y 50 m de distancia de enlace.

	Nº de saltos		
	1	2	3
Latencia (ms)	70.38	110.29	178.44
PRR (%)	99.52	99.54	98.44

Tras añadir la funcionalidad LPL al TinyRPL (TinyRPL + LPL) en todos los nodos de la red, se analiza su impacto en la latencia del sistema y en la tasa de recepción de paquetes. En la Tabla 4 se muestra el rendimiento del sistema con una red de un salto ubicando los sensores a una distancia de 100 y 200 m. Como se pueden apreciar en los resultados, el rendimiento del sistema es peor con LPL, ofreciendo una latencia media de 312.90 ms (LPL) frente a los 70.51 ms (sin LPL). Además, la PRR es más baja, de media el 91.75 % (TinyRPL + LPL) frente a una media de 99.67 % anterior (TinyRPL).

Tabla 4.
Mediciones con TinyRPL + LPL para un salto con un "sleep_interval" de 512 ms.

	Distancia (m)		Nº de saltos
	100	200	
Latencia (ms)	310.69	315.10	
PRR (%)	97.1	86.4	

En las pruebas con enlaces multi-salto (tabla 5), donde cada salto es de 50 m (con un "sleep_interval" de 512 ms) se obtiene una latencia similar para el enlace de un salto a 100 m (Tabla 4). Además se observa que la PRR va disminuyendo a medida que se incrementan los saltos (Tabla 5).

Tabla 5.

Rendimiento de TinyRPL + LPL en función del número de saltos y 50 m de distancia de enlace.

	Nº de saltos		
	1	2	3
Latencia (ms)	307.16	829.34	1106.33
PRR (%)	94.50	92.00	75.21

7. Discusión

Dado que lo ideal es que la latencia sea lo más baja posible y que la PRR lo más cercana al 100 %. En las tablas anteriores se aprecia que, tiene el uso de TinyRPL en nuestra aplicación, tanto en enlaces de un salto como en multi-salto una PRR aproximado del 99% en todos los casos. Respecto de la latencia, se observa que aumenta cuando se opera en multi-salto, esto es debido al procesado que se realiza en cada nodo, no obstante sigue siendo muy bueno.

Respecto al empleo de TinyRPL en combinación con LPL (TinyRPL + LPL), se ha observado que disminuye el rendimiento de la PRR en un salto. Y empeora en el segundo y tercer salto, del 92% y del 75% respectivamente. No obstante, los valores son también aceptables para el tipo de mediciones que se realizan ya que se encuentran muy por encima del 50%, esto no sería aceptable para aplicaciones relacionadas con la salud, donde se consideraba aceptable a partir del con un 95 % [9].

Dado que sin LPL, las baterías duran sólo menos de una semana para ambos tipos de baterías (Alcalina o Litio), la función LPL se hace imprescindible en esta aplicación, ya que se alarga la vida de las baterías lo suficiente para una campaña agrícola sin necesidad de mantenimiento.

8. Conclusiones

El presente trabajo contribuye a la tecnificación de la agricultura de invernadero mediante la monitorización de variables agronómicas en tiempo real. Para ello se ha desarrollado una plataforma completa y basada en software libre. Destaca sobre todo que el sistema es inalámbrico (WSN) lo que le permite una gran flexibilidad de instalación y de adaptación a cualquier explotación agrícola. Además se han seleccionado hardware, altamente resistente a condiciones ambientales agresivas de alta humedad y temperatura. Respecto a la WSN, se aprecia que con el uso de TinyRPL se puede establecer las rutas de los enlaces automáticamente, y añadiéndole la opción de ahorro de energía (LPL) se le puede dar un mayor tiempo de vida útil a las baterías (que puede ser superior a 1 año) además con una tasa de recepción de paquete alta. Con este sistema se pueden cubrir perfectamente áreas con radios superiores a los 200 m en enlaces de un salto, y de 400 ó 600 m en enlaces multi-saltos, lo cual es suficiente para cualquier tipo de invernadero ya que no suelen superar estas dimensiones. Por último, todo el software desarrollado se ha liberado a la comunidad [31] para darle una mayor difusión y continuación al proyecto.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado bajo el proyecto de investigación “Estudio para la sostenibilidad económica y medio ambiental en la planificación, construcción y mantenimiento de campos de golf en clima mediterráneo” del Consejo Superior de Deportes del Ministerio de Educación, Cultura y Deportes con referencia 190/UPB10/12. Así mismo los autores desean agradecer la colaboración del Dr. Jacques-Olivier Panchard (École polytechnique fédérale de Lausanne - EPFL) por proveer información para este trabajo.

Referencias

- [1] Marquez, A.L. Baños, R., Gil, C., Montoya, M.G., Manzano-Agugliaro, F., y Montoya, F.G. Multi-objective crop planning using pareto-based evolutionary algorithms. *Agricultural Economics* 42 (6), pp. 649-656, 2011.
- [2] Clement, J., Novas, N., y Gazquez, J.-A., Manzano-Agugliaro, F. An active contour computer algorithm for the classification of cucumbers. *Computers and Electronics in Agriculture* 92, pp. 75-81, 2013
- [3] Callejón-Ferre, A., Velázquez-Martí, B., López-Martínez, J.A., y Manzano-Agugliaro, F. Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2) , pp. 948-955, 2011.
- [4] Callejón-Ferre,A., Manzano-Agugliaro, F., Díaz-Pérez, M., Carreño-Ortega, A., y Pérez-Alonso, J. Effect of shading with aluminised screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) under greenhouse conditions. *Spanish Journal of Agricultural Research* 7 (1) , pp. 41-49, 2009.
- [5] López, A., Valera, D.L., Molina-Aiz, F.D., y Peña, A. Sonic anemometry measurements to determine airflow patterns in multi-tunnel greenhouse. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10 (3) , pp. 631-642, 2012.
- [6] Manzano-Agugliaro, F., Cañero-León R. Economics and environmental analysis of mediterranean greenhouse crops. *African Journal of Agricultural Research* 5(22) pp. 3009-3016, 2010.
- [7] Bacci L., Battista P., and Rapi., B. An integrated method for irrigation scheduling of potted plants. *Scientia Horticulturae* 116(1) pp. 89-97, 2008.
- [8] Manzano-Agugliaro, F., García-Cruz, A. Time study techniques applied to labor management in greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivation. *Agrociencia* 43(3) pp. 267-277, 2009.
- [9] Castellano, N.N., Parra, J.A.G., Rodríguez, J.F.L., y Manzano-Agugliaro, F. Sistema de telemetría para la transmisión de datos desde ambulancia. *DYNA* (Colombia) 79 (175), pp. 43-51, 2012.
- [10] Manzano-Agugliaro, F., Alcayde-García, A., Gil-Montoya, F., and Montero-Rodríguez, M.A. On Line temperature measurement system in the laying of high-voltage power-line conductors by topographic surveying. *Dyna* 86 (1), pp. 89-94, 2011.
- [11] Cama, A., Montoya, F.G., Gómez, J., and de la Cruz, J.L., Manzano-Agugliaro,F. Integration of communication technologies in sensor networks to monitor the Amazon environment. *Journal of Cleaner Production* 59(15), pp. 32-42, 2013.
- [12] Jiménez, A., Jiménez, S., Lozada, P., and Jiménez, C. Wireless sensors network in the efficient management of greenhouse crops. *Proceedings of the 9th International Conference on Information Technology, ITNG 2012* , art. no. 6209170 , pp. 680-685, 2012.
- [13] Postolache O, Pereira JM, Girão PS, and Monteiro AA. “Greenhouse environment: Air and water monitoring”. *Lecture Notes in Electrical Engineering* 146 pp. 81-102, 2012.
- [14] Gruber, J.K., Guzmán, J.L., Rodríguez, F., Bordons, C., Berenguel, M., and Sánchez, J.A. Nonlinear mpc based on a volterra series model for greenhouse temperature control using natural ventilation. *Control Engineering Practice* 19(4), pp. 354-366, 2011.
- [15] Li, Z., Wei, F., and Liu, W. Manufacture on building blocks of humidity-controlling composite materials used in greenhouse. En: *Proceedings International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*, (Shanghai, China, Mayo 2011), Vol.2, p. 1125-1128. 2011.
- [16] Garland, K.F., Burnett, S.E., Day, M.E., and van Iersel, M.W. Influence of substrate water content and daily light integral on photosynthesis, water use efficiency, and morphology of *Heuchera americana*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 137(1), pp. 57-67, 2012.
- [17] Panchard, J., Prabhakar T. V., Hubaux, J., and Jamadagni, H. S. Commonsense net: A wireless sensor network for resource-poor agriculture in the semiarid areas of developing countries. *Information Technologies & International Development* 4(1), pp.51-67, 2007.
- [18] Barrenetxea, G., Ingelrest, F., Schaefer, G., and Vetterli, M. Wireless sensor networks for environmental monitoring: The sensor scope experience. En: *IEEE International Seminar on Communications*, (Zurich 12-14 Marzo 2008), P. 98-101. 2008.
- [19] Kranz, M., Holleis, P., and Schmidt, A. Embedded interaction: Interacting with the internet of things. *IEEE Internet Computing* 14 (2), pp. 46-53, 2010.
- [20] Atzori, L., Iera, A., and Morabito, G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks* 54 (15), pp. 2787-2805, 2010.
- [21] Shelby, Z., Bormann, C. *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. Chapter 1.2, p. 13-14. John Wiley and Sons. Chichester (UK), 2009.
- [22] Afanasyev, M., O'Rourke, D., Kusy, B., and Hu, W. Heterogeneous traffic performance comparison for 6lowpan enabled low-power transceivers. En: *Proceedings of the 6th Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors*, New York (USA), 2010.
- [23] Levis P, Madden S, Polastre J, and Szewczyk R, TinyOS: An operating system for sensor networks. *Ambient intelligence* 35, pp. 115-148, 2005
- [24] Ko, J., Terzis, A., Dawson-Haggerty, S., Culler, D., Hui, J., Levis, P. Connecting low-power and lossy networks to the internet. *IEEE Communications Magazine* 49 (4), art. no. 5741163, pp. 96-101, 2011.
- [25] Ko, J., Dawson-Haggerty, S., Gnawali, O., Culler, D., Terzis, A. Evaluating the Performance of RPL and 6LoWPAN in TinyOS. En: *Proceedings Workshop on Extending the Internet to Low power and Lossy Networks (IP+ SN)*, Chicago, (USA), 2011.
- [26] Panchard, J., Rao, S., Prabhakar, T.V., Jamadagni, H.S., Hubaux, J.-P. Common-sense net: Improved water management for resource-poor farmers via sensor networks. *International Conference on Information and Communication Technology and Development*, ICTD2006, art. no. 4085509 , pp. 22-33, 2006.
- [27] Markus Becker, “UDP Echo With Measurements Application”. Disponible: <http://tinyos cvs.sourceforge.net/viewvc/tinyos/tinyos-2.x-contrib/uob/apps/UDPEchoWithMeasurements> [citado 10 de Octubre de 2013]
- [28] Montoya, F.G., Manzano-Agugliaro, F., López, J.G., Alguacil, P.S. Power quality research techniques: Advantages and disadvantages. *DYNA* (Colombia) 79 (173 PART I), pp. 66-74, 2012.
- [29] Moss D, J. Hui J, Klues K, Low Power Listening, Core Working Group, TEP 105.
- [30] Winter, T., Thubert, P., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, J.P. Alexander, R. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low power and Lossy Networks. *IETF RFC 6550*, 2012.
- [31] Universidad de Almería. 6lowsoft. Disponible: <http://pareto.ual.es/6LoWSoft/>

Procedure of organization of the production for a company of drinks and sodas

Procedimiento de organización de la producción para una empresa de bebidas y refrescos

Iresis Borrero-Tinón ^a, Rafael Espín-Andrade ^b & Francis Hevia-Lanier ^c

^a Ingeniero docente, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba iresis@ind.cujae.edu.cu

^b Doctor, docente, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba espín@ind.cujae.edu.cu

^c Doctor, docente Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba, fithl@ind.cujae.edu.cu

Received: April 23th, 2013. Received in revised form: October 15th, 2013. Accepted: November 20th, 2013.

Abstract

The organization of the production constitutes a way of elevating the level of efficiency and effectiveness in the companies. The crisis economic world cup has resulted in a depression in the market of drinks. For what becomes necessary a better organization of the production in this sector to optimize the resources to use and to achieve the proposed objectives. Keeping in mind it this work intends as general objective: to design a procedure of organization of the production for this sector. As a result main of the work they are obtained: a procedure of the organization of the production focused in the client's necessities, being recognized in the organization the necessity of the integrity of all the parts of the system to achieve the effectiveness and the efficiency. This it was applied in the Company of Drinks and Sodas of Havana, Cuba with a remarkable impact in the sales.

Keywords: Organization of the production, Management of the Production, Logistics.

Resumen

La organización de la producción constituye un modo de elevar el nivel de eficiencia y eficacia en las empresas. La crisis económica mundial ha traído como consecuencia una depresión en el mercado de bebidas. Por lo que se hace necesaria una mejor organización de la producción en este sector para optimizar los recursos a utilizar y alcanzar los objetivos propuestos. Teniendo en cuenta ello este trabajo se propone como objetivo general: diseñar un procedimiento de organización de la producción para este sector. Como resultado principal del trabajo se obtiene: un procedimiento de la organización de la producción enfocado en las necesidades del cliente, reconociéndose en la organización la necesidad de la integridad de todas las partes del sistema para lograr la eficacia y la eficiencia. Este se aplicó en la Empresa de Bebidas y Refrescos de la Habana, Cuba con un impacto notable en las ventas.

Palabras Clave: Organización de la producción, Gestión de la Producción, Logística.

1. Introducción

En el presente, las empresas actúan en un medio que le formula cada vez mayores exigencias, es por esto que organizar la producción es tarea actual de cada miembro integrador de cada una de sus partes. Una vez definido el objetivo a alcanzar debe definirse que partes del sistema productivo deben estudiarse para lograr tal fin, delimitando en dichos sistemas las características de sus elementos y el tipo de sistema existente y el que se deba adoptar con lo cual se puede delimitar los elementos que deben modificarse [1].

La organización de la producción permite a la empresa adoptar aquellas medidas, métodos y procedimientos que se requieren para la mejor gestión de procesos posible, procurando regular la mayor cantidad de acciones del

sistema productivo a través de métodos, lo cual tiende a optimizar su funcionamiento y a disminuir la carga de las actividades desde la dirección de la misma [2].

Investigadores de diversas latitudes destacando la importancia de la planificación, organización y control de la producción así como al análisis del nivel técnico – organizativo, que comprende el estudio de indicadores específicos de eficiencia, la preparación técnica de la producción, la tecnología empleada, la organización del flujo productivo, el grado de especialización y cooperación de la producción, la estructura organizativa de la entidad, incluyendo la dirección y la organización de la planificación, el registro y el control[3-8].

El sector de la producción de bebidas y refrescos en Cuba ha adquirido gran auge en la última década. Sin embargo no

existe un procedimiento de organización de la producción que se adapte a las características de este sector en la Cuba. Es el caso de la Empresa de Bebidas y Refrescos de la Habana (EMBER) donde la Contraloría General de la República de Cuba ha detectado que el incumplimiento del plan de ventas desde los años 2009 hasta el presente es fundamentalmente por una ineficiente organización de la producción por lo que este trabajo se trazó como objetivo fundamental contribuir a dar solución a esta problemática con el diseño y aplicación de un procedimiento de organización de la producción para esta empresa.

2. Materiales y métodos

Para la creación del procedimiento se tuvieron en cuenta las siguientes bases teóricas:

1. Enfoque en Sistema: al considerar la dirección de la empresa como un sistema complejo de relaciones que trabaja para dar respuesta a las demandas del entorno, a partir de la integración de sus subsistemas con la estrategia de la empresa, para obtener un resultado de alto impacto económico y social [9].
2. Método de estudio de la gestión de producción: Se concibe que la gestión de la producción en la empresa va dirigido a cambiar el sistema de producción con vistas a elevar la satisfacción de las exigencias del medio con la máxima eficiencia económica y social posible. Al proyectar el perfeccionamiento de la gestión de producción se hace necesario argumentarlo con la eficiencia económica y social del mismo con un criterio de garantizar la eficiencia final del sistema productivo y no de uno de sus elementos, características o variables [3].
3. Sistema de organización de la producción de bienes y servicios: La organización de la producción de bienes y servicios se materializa con la actividad sistemática del colectivo laboral de la empresa; aplicando un conjunto de métodos y procedimientos y utilizando de forma racional los objetos de trabajo, los medios de trabajo y fuerza de trabajo lo que asegura el cumplimiento cualitativo y cuantitativo de los objetivos trazado [10].
4. Sistemas de Gestión de la calidad: La empresa organiza su proceso de producción para la satisfacción de las necesidades de la sociedad y de sus clientes, sobre la base de ofrecer productos y servicios que cumplan los requisitos establecidos, en la cantidad solicitada, en el momento

adecuado, con el menor costo y la mayor eficacia[11].

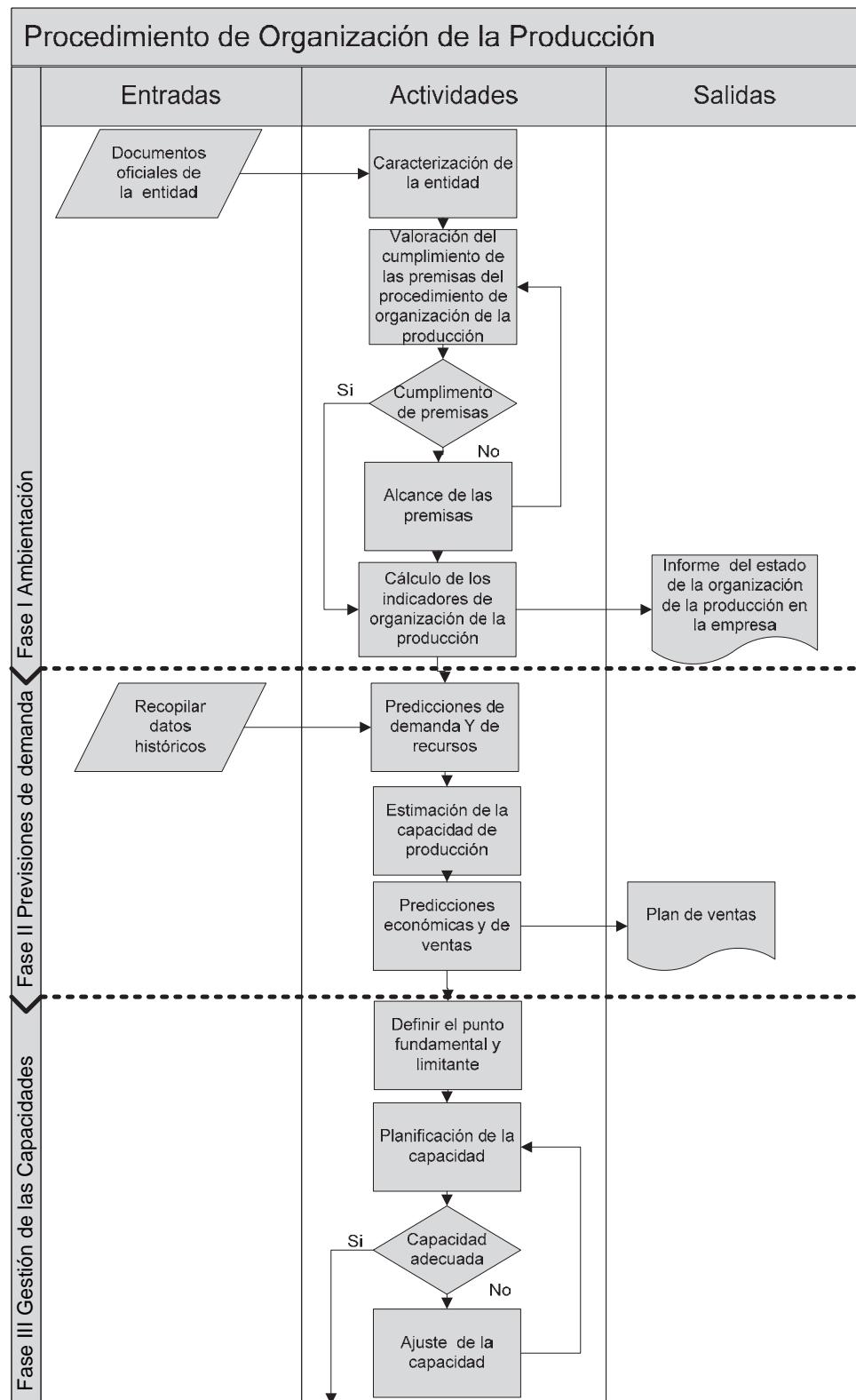
El procedimiento de organización de la producción se desarrolla en seis fases. La primera fase es de ambientación la cual tiene como objetivo preparar las condiciones en la empresa para aplicar el procedimiento de organización de la producción. En esta fase se caracteriza la entidad y se comprueban las premisas planteadas para la aplicación del procedimiento, la segunda fase es la realización de las previsiones de demanda con el objetivo de establecer un pronóstico de las ventas, los recursos necesarios y las planeaciones de capacidad de producción.

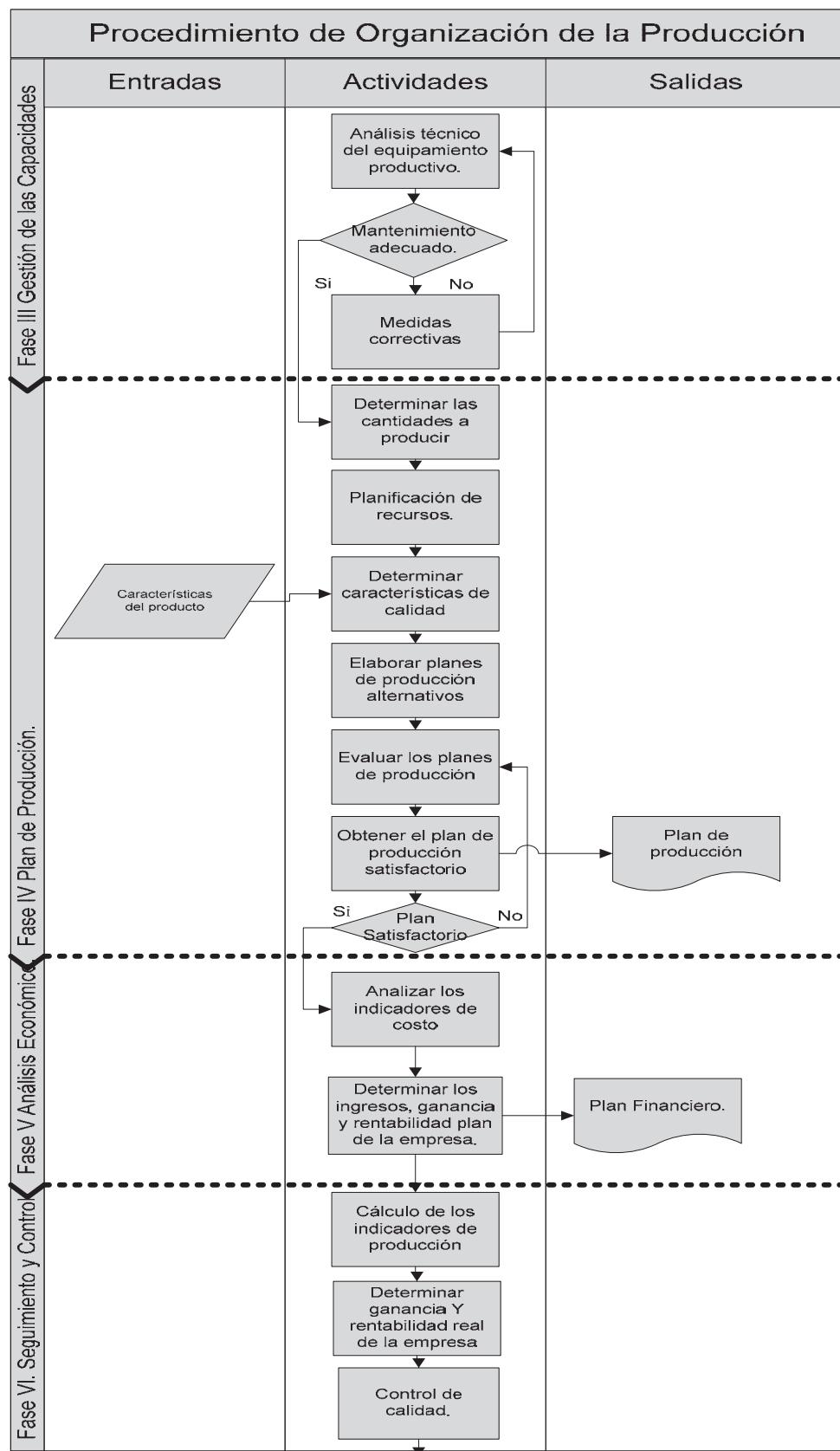
En la tercera fase se gestionan las capacidades de producción de la empresa con el objetivo de conocer las capacidades reales que tiene la empresa para satisfacer la demanda prevista, para esto se define el punto fundamental y el punto limitante del sistema productivo, se planea la capacidad y se realiza el análisis técnico del equipamiento productivo.

En la cuarta fase se elabora un plan de producción con el objetivo de determinar lo que va a realizar la empresa anual, mensual o diariamente de acuerdo a la planificación de la producción en ambientes de incertidumbre [12], para esto se determinaran las cantidades a producir, la planificación de materiales, las características de calidad del producto y se elaboraran planes de producción alternativos, para luego evaluarlos y obtener un plan satisfactorio.

En la quinta fase se realiza un análisis económico con el objetivo de establecer los parámetros de la actividad económica y definir las potencialidades de la empresa para planificar los ingresos, ganancias y la rentabilidad que la empresa puede obtener, analizando los indicadores de costo, analizando los ingresos, determinando los planes de ganancia y rentabilidad y en la sexta

En la última fase se lleva a cabo el seguimiento y control del procedimiento re calculando los indicadores de organización de la producción y calculando las ganancias reales de la empresa y su rentabilidad, luego se controla la calidad del producto final, si la calidad no es acertada se emplean medidas correctivas y si lo es, se procede a medir el grado de satisfacción del cliente, en caso de insatisfacción se determinan las causas y se toman medidas correctoras, de estar satisfecho se determinan las reservas de aumento de la producción y para concluir el procedimiento se realiza el informe de producción para el próximo año. En la figura 1 se representan las fases y actividades del procedimiento de organización de la producción.





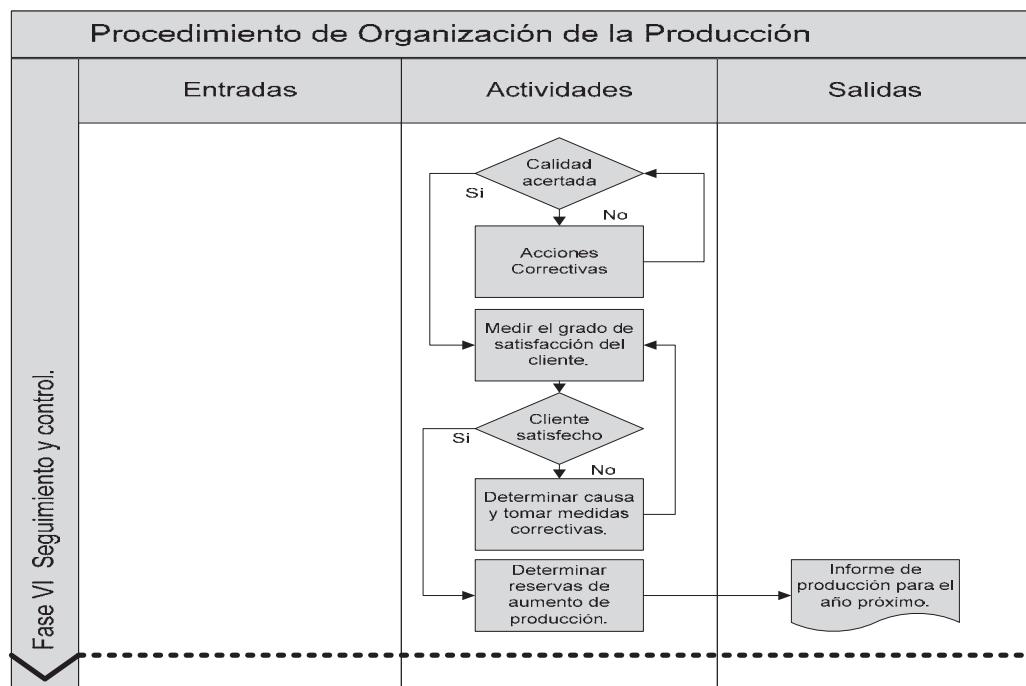


Figura 1. Procedimiento de Organización de la producción para EMBER.

Este procedimiento, brinda un marco de trabajo para la organización de la producción, cuyo efecto es la combinación racional y armónica de los elementos del proceso de producción en tiempo y espacio, con el fin de cumplir las tareas previstas por el plan con la máxima eficiencia económica y bienestar social.

2. Resultados

A continuación se muestran los principales resultados de la aplicación de las fases 1, 2, 3 y 4 en EMBER organizados por los diferentes pasos que las componen.

Como **resultado de la aplicación de la Fase 1** se determinó el estado de la organización de la producción de la empresa.

En esta fase se comprobó el cumplimiento de las premisas del procedimiento determinándose que existe compromiso de la dirección, miembros de la empresa y personal capacitado para orientarla hacia el alcance de los indicadores de organización de la producción. Posteriormente se calcularon los indicadores de organización de la producción obteniéndose como resultado que la capacidad de reacción es desfavorable (35%), no hay fluctuación laboral y no hay accidentabilidad.

La estabilidad, flexibilidad y carácter rítmico son insuficientes (35, 8.43 y 35 %) respectivamente. La continuidad y proporcionalidad, son aceptables, con valor de 82 y 87 % respectivamente, y la fiabilidad para los surtidos del 50% y los plazos del 33%.

Resultados de la aplicación de la Fase II del procedimiento de organización de la producción.

Para realizar las predicciones de la demanda para el año 2012 se tomaron como referencia los datos de la demanda de los años 2009, 2010 y del 2011, los contratos ya existentes con los clientes, la situación de incertidumbre del

mercado así como un análisis riguroso de los compradores actuales de bebidas y refrescos en la Isla, empleando el método de suavizado exponencial [12]. Los resultados se muestran en la Tabla 1

Tabla 1.
Predicción de demanda para el año 2012.

Clientes	Demanda 2012(litros/año)
Casa Fiesta	806 400
Comercio y gastronomía	1 460 000
Refresco Granel	19 948 000
Total	22 214 400

EMBER cuenta con el equipamiento necesario, así como mano de obra para obtener la producción que se demanda. Se estima que por falta de suministro de materias primas y materiales se deja de producir como promedio más de 50 000 litros/año, y por el incorrecto sistema de mantenimiento que afecta el sistema productivo se deja de producir como promedio 124 000 litros/año. De esta forma se prevé que no se venderá todo lo que pide el mercado. Las ventas se afectarán en un 4% como promedio de forma general, si se mantiene la misma situación.

Para prever las ventas se tomaron además los datos de capacidad de producción y la producción posible de EMBER. Según este análisis se pronostica que se pueden vender todas las unidades demandadas por los clientes, donde el cumplimiento del plan de ventas se afecta por la falta de suministro de materias primas y materiales y el incorrecto sistema de mantenimiento.

Resultados de la aplicación de la Fase III del procedimiento de organización de la producción.

El punto fundamental en la línea de embotellado está determinado por la llenadora- tapadora, con capacidad de producción 10960000 litros/año. El refresco granel no pasa por la línea de embotellado, por lo que su capacidad de

producción está dada por los tanques de elaboración del sirope que es de 45532224 litros/año.

A través del balance demanda-capacidad, se determinó que el punto limitante está dado por la retractiladora en la línea de embotellado, que marca la producción posible de la producción de embotellado 7891200 litros/año.

Para la planificación de la capacidad se delimitó el punto fundamental y el punto limitante como se mostró en los pasos anteriores. A partir de estos resultados se compara las necesidades de los clientes con las disponibilidades de la empresa, en cuanto a la producción posible que puede obtener la empresa determinada por el punto limitante. De esta comparación se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 3.

Tabla 2.
Balance de capacidad para satisfacer las necesidades del cliente.

	Necesidades (litros/año)	Disponibilidades de capacidad(litros/año)
Embotellado	2 266 400.	7 891 200
Refresco Granel	19 948 000.	45 532 224

Por lo que EMBER tiene la capacidad para satisfacer las necesidades del mercado que consumen sus productos. La línea de embotellado cuenta con 4 equipos productivos:

- UNIMIX (Mezcladora).
- Llenadora – Tapadora.
- Etiquetadora.
- Retractiladora.

Al realizarse el estudio del análisis técnico del equipamiento productivo, se obtuvo como resultado:

Tabla 3.
Análisis Técnico del equipamiento productivo.

Parámetro Técnico	Resultado
Grado de automatización	25%
Grado de mecanización	83,3%
Grado de renovación de los equipos	0%

Se detectaron deficiencias en el sistema de mantenimiento que afectaron el cumplimiento del plan de producción total de EMBER, en un mes de incumplimiento por falta de mantenimiento se dejan de producir aproximadamente de 40 000 litros, en un día que pare la producción de refresco se deja de producir alrededor de 2000 litros.

Se propone como **programa de mejora** para el mantenimiento del equipo productivo cambios en el mismo para prevenir las roturas del equipamiento productivo.

En la empresa no se ha realizado un mantenimiento general o reparación general de los equipos productivos los mismos tienen 11 años de comprados, y la carencia de un correcto sistema de mantenimiento afecta en su funcionamiento.

El plan de mantenimiento debe comenzar por una reparación general de los equipos productivos con costos de \$ 21 948 para aumentar el rendimiento de los equipos productivos que actualmente se encuentran produciendo al 14%, según la producción posible de la línea de embotellado y evitar paros en la producción, a partir de esta

reparación general se define el ciclo de mantenimiento de 12 años. El Mantenimiento Preventivo Planificado (MPP), se compone por revisiones y reparaciones periódicas. En el año se realizarán 4 revisiones periódicas, 3 reparaciones pequeñas (\$ 7 316,25/ reparación) y una mediana (\$80 478,75), mensualmente se engrasarán y revisarán los equipos productivos. Es de destacar que todos los valores están dados en pesos cubanos.

Resultados de la aplicación de la Fase IV del procedimiento de organización de la producción.

Luego de aplicadas las medidas correctivas para un mantenimiento adecuado, se procede a determinar las cantidades a producir, basada en las cantidades demandadas por los clientes. Se procederá a planificar al menos 200 litros de excedentes para imprevistos. Los meses de mayor producción serán julio, agosto y diciembre.

Los sabores a tener en cuenta para la planificación de la producción serán: cola, limón, naranja y piña. Para el Embotellado se obtuvo como resultado (litros/año), 700 500, 566 600, 566 600, 465 560, respectivamente y para el Refresco Granel, (litros/año), 560 000 000, 456 640 000, 500 450 000, 230 690 000, respectivamente.

Para la planificación de los recursos se tuvo en cuenta fundamentalmente el modelo general de la planificación y programación de materiales, con los métodos clásicos de la empresa conjunto con el directivo del área de producción y logística. Como inconveniente principal se tiene:

1. No existe diversidad en los proveedores de las materias primas fundamentales.
2. Los clientes no definen una estructura y una gestión de pedido ordenada.

2.1 Análisis del impacto del programa de mejoras.

Al cumplirse el sistema de mantenimiento propuesto y realizar la reparación general, las ventas aumentaron por concepto de disminución de paro productivo y aumento de la productividad de los equipos para en año 2012 a un 107% para Casa Fiesta, 95% Comercio y Gastronomía y a un 109,4% para el Refresco Granel.

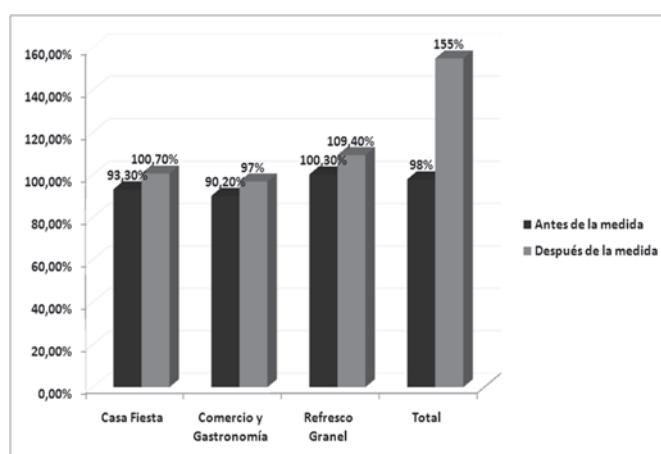


Figura 2. Impacto del programa de mejoras en las ventas de la empresa en el año 2012.

3. Discusión

Con una efectiva organización de la producción, se beneficia toda la cadena de valor dígase los proveedores, empresa y el cliente. De la aplicación parcial de este procedimiento se concluyen ventajas como:

1. La producción se incrementa por la optimización del uso de las capacidades.
2. Se pueden hacer previsiones de las necesidades de materias primas, mano de obra y equipos.
3. Se conocen las necesidades del cliente debido a las predicciones de la demanda.

Con el procedimiento de organización de la producción propuesto para la EMBER, se puede profundizar en los elementos de planificación, logística y calidad así como en el método de la planificación de materias primas y materiales de gran utilidad para este tipo de empresa.

4. Conclusiones

En la teoría existente acerca de la Gestión de la Producción se reconoce la necesidad actual de la aplicación de la Organización de la Producción dirigida al logro de un desempeño laboral superior y especialmente al incremento de la productividad del trabajo así como la importancia del cumplimiento de sus principios y exigencias técnico-organizativas para lograr la eficacia y eficiencia en las organizaciones.

En el procedimiento propuesto, se brinda un marco de trabajo para la organización de la producción de la Unidad Empresarial de Base Metropolitano, cuyo efecto es la combinación racional y armónica de los elementos del proceso de producción en tiempo y espacio, con el fin de cumplir las tareas previstas por el plan con la máxima eficiencia económica y bienestar social.

Referencias

- [1] Acevedo, J., Gómez, M.; ET AL. La Logística Moderna en la Empresa. Logicuba, La Habana, 2007.
- [2] Argoneto, P., Renna P., Brucolieri, M., ET AL. Production Planning in Production Networks. Models for Medium and Short-term Planning, Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [3] Chiavenato, I. Gestión del talento humano. Primera Edición. Editorial Prentice, Bogotá. Hall, 2002.
- [4] COMITÉ EJECUTIVO DEL CONSEJO DE ESTADO DE CUBA. Decreto Ley-No 252 sobre la continuidad y el fortalecimiento del Sistema de Dirección y Gestión Empresarial Cubano. Editora Política, La Habana, 2007.
- [5] Fernie, J., and Sparks, L. Eds Logistics and retail management: insights into current practice and trends from leading experts. London and Sterling VA London, 2004.
- [6] Zandin, K. Ed. Maynard's Industrial Engineering Handbook. Quinta Edición. USA: McGraw-Hill, 2004.
- [7] Juran, M. Juran's quality handbook. McGraw-Hill, USA, 1999.
- [8] Martin, J. W. Operational excellence: using lean six sigma to translate customer value through global supply chains. Taylor & Francis Group, Boca de Ratón, 2008.
- [9] Meyer, U. B., Creux, S. E., and Weber, A. K. Process oriented analysis: design and optimization of industrial production systems. Taylor & Francis Group, Boca de Ratón, 2007.
- [10] Schönsleben, P. Integral logistics management: planning and control of comprehensive supply chains London, CRC Press LLC, 2004.
- [11] Torres, L., and Urquiaga, A. Fundamentos Teóricos sobre Gestión de la Producción. Félix Varela, La Habana, 2007.
- [12] Arango, M D., Vergara, C., and Gaviria, H. Modelización difusa para la planificación agregada de la producción en ambientes de incertidumbre. Medellín Colombia. Dyna. 2010.

Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria

Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación

Sergio Morales ^a, Laura Corredor ^b, Julio Paba ^c & Leonardo Pacheco ^d

^a Esp. Ingeniero en Energía. GIRES, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia smorales@unab.edu.co

^b M.Sc Ing. Química. Instituto Colombiano del Petróleo Colombia. laura.corredor@ecopetrol.com.co

^c M.Sc GIRES, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Colombia jpaba@unab.edu.co

^d PhD. GIRES, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia lpacheco560@unab.edu.co

Received: September 3th, 2013. Received in revised form: December 17th, 2013. Accepted: February 25th, 2014.

Abstract

The purpose of this article is to review and analyze the context and basic requirements to be considered to implement projects of Small Hydro Power, which was performed by collecting information and reviewing of the current state of technology in the country and worldwide, as well as the most efficient and suitable technologies for its implementation. Finally, it raises some stages and engineering studies to follow for successful development of an SHP project and defines the relevant conclusions of the analysis.

Keywords: electricity generation, small hydropower, hydraulic turbines, Renewable energy, distributed generation, rural electrification.

Resumen

El propósito del presente artículo es realizar una revisión y análisis contextual y de requerimientos básicos a tener en cuenta para implementar proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, para lo cual se realizó una recopilación de información y una revisión bibliográfica que permitió conocer la situación actual de la técnica a nivel nacional e internacional, así como las tecnologías más eficientes y aptas para su implementación. Por último, se plantean unas etapas y estudios de ingeniería a seguir para lograr con éxito el desarrollo de un proyecto de PCH y se definen las conclusiones pertinentes del análisis realizado.

Palabras Claves: generación eléctrica, pequeñas centrales hidroeléctricas, turbinas hidráulicas, energía no convencional, generación distribuida, electrificación rural.

1. Introducción

El Sistema Eléctrico Colombiano posee grandes ventajas en el suministro del servicio de energía eléctrica debido a su robustez. Una gran deficiencia se presenta al garantizar la calidad y cobertura del servicio en las regiones no interconectadas. Para suplir los requerimientos energéticos de éstas regiones se utilizan combustibles fósiles, los cuales proveen un suministro deficiente e irregular de la energía además de ser contaminantes y muy costosos. Teniendo en cuenta lo anterior, se están implementando tecnologías alternativas de producción de energía como la energía solar, la eólica y las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).

Colombia, debido a su situación privilegiada desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos de generación hidroeléctrica. Este potencial ha sido ampliamente explorado en proyectos de gran envergadura (construcción de grandes hidroeléctricas), beneficiando a las regiones interconectadas, y marginando a las regiones no

interconectadas. En dichas regiones donde se presta el servicio, este se da en promedio por 8 horas diarias [1].

En este contexto, las PCH ofrecen una alternativa para las zonas no interconectadas debido a que aprovechan pequeños saltos y caudales de agua y debido a su fácil manipulación pueden ser operadas por personal local.

2. Contexto y situación actual

Durante el año 2010, las plantas hidroeléctricas suministraron alrededor del 16% de la electricidad mundial y su capacidad instalada a finales del mismo año era de 1010 GW, lo cual las convierte en una de las fuentes de energía renovable más relevantes para la producción de electricidad [2]. Asia es el continente con mayor capacidad instalada de PCH en el mundo con más de 40 GW, Europa se ubica en el Segundo lugar con 13 GW y en tercer lugar se ubica América (Norte, Centro y Sur [3]). Según REN21 [3], los países con mayor capacidad instalada en PCH son:

China con 33GW, Japón con 4 GW, EE.UU con 3 GW y Alemania, Brasil, España e India con 2 GW

La Figura 1 muestra la producción de electricidad a nivel mundial por tipo de fuente [2].

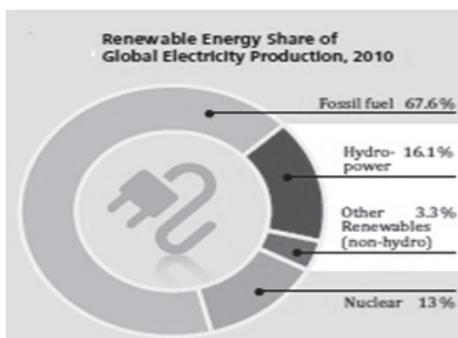


Figura 1. Producción de energía por fuentes a nivel mundial [13]

Los siguientes factores resultaron ser los principales contribuyentes en la expansión de las PCH en China:

Políticas gubernamentales preferenciales: El gobierno chino ha tomado medidas para fomentar el desarrollo de PCH. Estas incluyen la reducción de impuestos, el otorgamiento de créditos blandos y subvenciones, la promoción para que las empresas privadas inviertan en la construcción de PCH y las políticas para proteger las zonas de suministro y la propiedad privada [4-8]

Capacidad de fabricación con mano de obra local: el Gobierno Chino ordenó a ciertos condados y provincias que desarrollaran sus propios equipos para PCH y luego siguió promoviendo la producción local para reducir los costos generales. Actualmente, existen convenios de cooperación tecnológica entre China y la Unión Europea con el fin de mejorar la calidad de fabricación China y acomodarlo a los estándares Europeos [4,5], [9-11].

Reconocimiento de las ventajas de las PCH sobre las grandes hidroeléctricas: China ha tenido en cuenta que las PCH tienen beneficios que no pueden ser alcanzados con grandes hidroeléctricas, por ejemplo la construcción de PCH tiene un bajo impacto ambiental y no requiere el desplazamiento de la población local. Adicionalmente, la tecnología utilizada en PCH no es muy compleja y puede ser entendida y transferida a un gran número de comunidades. Como la mayoría de las PCH tienen sus propias zonas de abastecimiento y redes locales, pueden suministrar electricidad a la población local así como conectarse al sistema eléctrico. Esto permite a las plantas maximizar las ganancias por compra de electricidad del sistema eléctrico en tiempos de baja generación y venderla cuando haya exceso en la capacidad de generación [4,5].

Generación de energía descentralizada: El desarrollo de las PCH en China se ha dado en función de los recursos de las comunidades locales, promoviendo un enfoque de autosuficiencia e independencia en el suministro de energía en las zonas rurales, teniendo los “condados” como unidad base y contando con el apoyo de la red nacional, la red local y las PCH aisladas [7,8], [12].

Actualmente, la potencia instalada en PCH en China crece en promedio 2000 MW anualmente (7%) y brinda

energía a más de 300 millones de personas. Finalmente, se puede decir que la experiencia de China sirve como referencia para impulsar el desarrollo de proyectos de PCH teniendo en cuenta los aspectos que facilitaron su implementación [4,5], [9], [12].

En cuanto a Suramérica, según Tapia [13] el país con la mayor experiencia en PCH es Brasil. Esto se debe a que posee un gran potencial estimado en más de 9,5 GW y una capacidad instalada de 2 GW, la más grande de Suramérica. Esto ha sido posible gracias al impulso que se le da a las PCH por medio de diversas iniciativas como la financiación e incentivos como el del Banco Nacional de Desarrollo de Brasil (BNDES) y el Programa de Desarrollo y Comercialización de Energía de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH-COM).

En el contexto nacional, las centrales hidroeléctricas representan el 82% de la capacidad instalada en plantas menores. Actualmente existen más de 200 PCH de las cuales más de 70 se encuentran conectadas a la red eléctrica [14]. Es importante mencionar que en Colombia el desarrollo de las PCH se ha dado con mayor fuerza en las Zonas no Interconectadas (ZNI) debido a que el aprovechamiento de pequeñas caídas y caudales es una de las soluciones más prácticas para satisfacer las necesidades energéticas de la población que habita en dichas zonas. Sin embargo, estas no representan gran importancia para el SIN ya que su área de influencia es muy reducida.

A pesar de contar con entidades que financian proyectos de PCH como El Fondo Nacional de Regalías (FNR), Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas No Interconectadas (FAZNI) y el IPSE (Instituto de Promoción de Soluciones Energéticas), no existen incentivos específicos para proyectos de PCH por parte del Gobierno. Sin embargo, a este tipo de proyectos se le aplican los incentivos existentes para proyectos de energía renovable de menos de 20 MW y los que se gestionen como Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Colciencias propone un incentivo para desarrollo, de cuantificar la renta exenta como 125% del valor invertido por innovación tecnológica a las empresas emprendedoras. La mayor parte del financiamiento a las energías renovables (incluyendo las PCH) por parte de entidades como el IPSE, se realizan para atender proyectos de pequeñas potencias en ZNI [15].

Como se evidencia el desarrollo económico de las regiones apartadas o de difícil acceso está fuertemente ligado a su disponibilidad energética. La disponibilidad energética ha sido ampliamente re-evaluada con la descentralización de la generación de energía y con los proyectos de diversificación energética. Desde esta perspectiva las PCH se pueden convertir en grandes impulsadoras del desarrollo de las regiones aisladas que no cuentan con un suministro firme y continuo de energía.

3. Clasificación de las PCH

Una pequeña central hidroeléctrica es el conjunto de obras civiles y equipos electromecánicos e hidráulicos cuyo objetivo es transformar la energía potencial y cinética de un curso de agua en energía eléctrica útil, cuyo destino es, su

autoconsumo en el mismo lugar de producción, o bien, su venta a la red eléctrica comercial con el fin de obtener una ganancia económica [16-19].

Como se muestra en las tablas 1 y 2, las PCH se clasifican bajo dos criterios: según la potencia instalada o según la altura de la caída del agua [16], [20-22]. El principal componente de la PCH es el grupo turbina-generador. La turbina es la responsable de la transformación de la energía potencial y cinética disponible en la caída de agua en trabajo mecánico rotacional. Un análisis de las diferentes turbinas hidráulicas y su posible utilización en las PCH es presentado en el siguiente numeral.

4. Turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es el principal componente de una PCH, responsable de transformar la energía cinética y potencial contenida en la caída de agua, en un movimiento rotacional que se transfiere al generador eléctrico. Existen diferentes tipos de turbinas hidráulicas. Los criterios más importantes a tener en cuenta para la selección del tipo de turbina óptimo de un proyecto dado, son las condiciones topográficas e hidrológicas del sitio. Las condiciones de mayor impacto sobre la selección son el caudal y la caída de agua disponibles [23].

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar según el modo en que transforman la energía cinética en mecánica, en turbinas de acción o de reacción.

Tabla 1.
Clasificación de las PCH según su potencia [16], [20-22]

TIPOS	POTENCIA (MW)
Microcentrales	Menores a 0,1
Minicentrales	De 0,1 a 1
PCH	De 1 a 10

Tabla 2.
Clasificación de las PCH según la altura de la caída del agua [16], [21]

	Baja (m)	Media (m)	Alta (m)
Micro	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequeña	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Turbinas de Reacción o Sobrepresión: Son aquellas en las que el sentido de giro del rodete no coincide con las direcciones de entrada y de salida del agua, de tal modo que las láminas de fluido que se forman con el paso del agua a través de las paletas fijas, no se proyectan directamente en los álabes de las turbinas. Por el contrario se busca un deslizamiento del agua sobre los álabes [24-26].

Existen diversos tipos de turbinas de reacción: Francis, Kaplan, Hélice, Tubular, Deriaz, Bulbo entre otras, pero este artículo se enfoca en las más utilizadas en Colombia. La tabla 3 muestra los parámetros operacionales de las turbinas de reacción más comunes descritas en la literatura: Francis, Kaplan y Bulbo [27]. La Tabla 4 muestra una síntesis de las principales ventajas y desventajas de las turbinas de reacción evaluando aspectos diferentes a sus rangos de operación [27, 28].

Tabla 3.

Rangos de operación de las turbinas de reacción [27]

RPM	Francis Normal y Rápida			
	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)	E(%)
150-250	0,5-100	2-750	1-7,5*105	80-93
250-400	0,5-100	2-750	1-7,5*105	80-93
		Kaplan		
300-800	0,8-1000	5-80	2-2*105	88-93
		Bulbo		
300-800	1-750	2-30	25-1*105	90-93

Turbinas de Acción o de Impulso: La potencia transferida al rotor de este tipo de turbinas depende principalmente de la energía cinética que posee el fluido. En ellas la presión estática permanece constante entre la entrada y salida del rodete y sólo se modifica el vector de velocidad del fluido. El movimiento del rodete se produce cuando el chorro de agua proveniente del inyector (colocado al final de la tubería de presión) golpea uno de sus alabes a muy alta velocidad, provocando un par de giro en la misma dirección [26,29].

La Tabla 5 muestra los parámetros de operación más relevantes de las turbinas de acción: Pelton, Turgo, Michell-Banki [27,30]. En la Tabla 6 se comparan las principales ventajas y desventajas de las turbinas de acción, evaluando otros aspectos diferentes a sus rangos de operación [30-31].

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las turbinas de reacción o sobrepresión [27-28]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Francis
Bajas pérdidas hidráulicas, alta eficiencia, alta velocidad específica, bajos costos en operación a grandes rangos de alturas y caudales	Problemas de cavitación. Bajo rendimiento a cargas parciales. Alto desgaste de erosión por su geometría
	Kaplan
Alta velocidad específica, los alabes del rodete y distribuidor pueden adaptarse a cambios de salto y caudal. Su alta velocidad de rotación permite reducir su tamaño.	Altas velocidades de embalamiento. Los sistemas de regulación aumentan su costo considerablemente. Presenta alto riesgo de cavitación.
	Bulbo
Turbina-generador dentro del bulbo, bajo costo de obras civiles.	Fabricación y mantenimiento complejo y costoso

Los cuadros comparativos mostrados permiten concluir que las turbinas de acción son la opción más adecuada a ser implementada en las PCH. Esto se debe a su buen rendimiento operando bajo cargas parciales [32,33]. Este es un aspecto muy importante a tener en cuenta ya que normalmente las PCH se construyen “a filo de agua”, es decir que su caudal no es regulado y está sujeto a grandes variaciones debido a los períodos climáticos propios de la región tropical.

Tabla 5.

Rangos de operación de las turbinas de acción [27, 30]

Pelton de 1,2,4 y 6 Inyectores				
RPM	Q (m ³ /s)	h (m)	P (kW)	E(%)
30	0,05-50	30-2000	0,1- $3*10^5$	70-91
30-50	0,05-50	30-2000	0,1- $3*10^5$	70-91
40-60	0,05-50	30-2000	0,1- $3*10^5$	70-91
50-70	0,05-50	30-2000	0,1- $3*10^5$	70-91
Turgo				
60-260	0,025-10	15-300	$5-1*10^4$	85-90
Michell-Banki (Flujo Cruzado)				
40-200	0,05-5	10-250	$1-2*10^3$	65-84

La Figura 2 resume los rangos de operación de los diferentes tipos de turbinas hidráulicas donde se relaciona el caudal (m³/s) en función de la altura de caída salto (m) para diferentes potencias instaladas (kw) [34, 35]. La Figura 2 se utiliza para pre-selecciónar la turbina a instalar, teniendo como única información el caudal de diseño y la altura del salto.

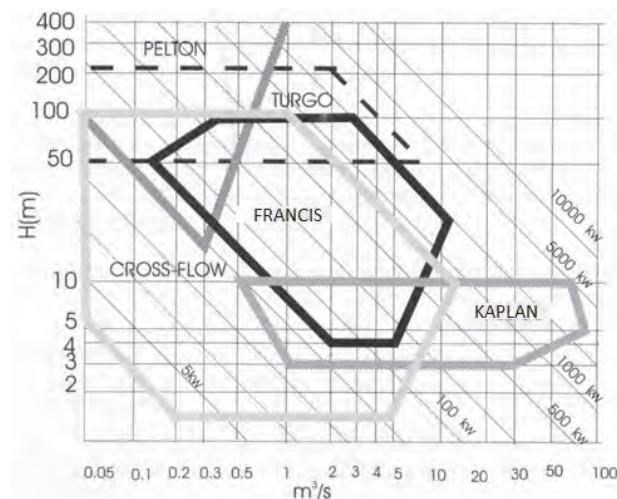


Figura 2. Diagrama con rangos de utilización de los diferentes tipos de turbinas [34, 35]

Las turbinas Turgo y Michell-Banki admiten caudales más grandes que la turbina Pelton, por lo tanto tienen mayores velocidades de rotación y rodetes más pequeños. En potencias mayores a 1000 kW la turbina Michell-Banki deja de ser competitiva. A estas potencias turbinas Pelton y Turgo presentan una eficiencia mayor.

Cuando el salto es bajo y el caudal alto, las turbinas de reacción tipo Kaplan, y Bulbo se presentan como una opción ya que se obtienen buenos rendimientos a cargas parciales.

Por otro lado, la turbina Francis también es muy utilizada debido a sus pequeñas dimensiones en relación a la potencia generada, lo cual es muy importante porque el tamaño de los equipos afecta directamente el costo del proyecto.

Por ejemplo en las zonas de coincidencia de las diferentes turbinas de acción (Pelton, Turgo y Flujo cruzado o Michell-Banki) mostradas en la Figura 2, se deben tener en

cuenta aspectos como la potencia a instalar, el costo inicial y de mantenimiento, el rendimiento en cargas parciales, problemas de cavitación y la velocidad de rotación para seleccionar la turbina más adecuada para la correcta evaluación de factibilidad del proyecto energético.

Tabla 6.

Ventajas y desventajas de las turbinas de acción [30, 31]

VENTAJAS	DESVENTAJAS	
Pelton	Requiere de múltiples inyectores para hacer frente a grandes caudales. Baja velocidad de operación, lo cual incrementa los costos respecto las turbinas de reacción. Para potencias altas, requiere grandes áreas debido a su gran rodamiento.	
Turgo	Baja probabilidad de cavitación. Reducción considerable del diámetro (hasta la mitad del de una Pelton). Menor número de inyectores, llevando a una simplificación en el sistema de control de velocidad. Permite acoplamiento directo al generador debido a su mayor velocidad angular.	Debe soportar grandes cargas axiales sobre los cojinetes debido al chorro inclinado. Su eficiencia (aprox. 85%) es menor que la de una turbina Pelton (91%). Fabricación compleja, debido a la complejidad de sus alabes los cuales se superponen y son más frágiles.
Michell-Banki	Construcción sencilla, pocas piezas móviles. Facilita el mantenimiento. Sencilla instalación, bajos costos de obra. Más económica que los demás tipos de turbinas utilizadas en PCH. Permite fabricación local.	Baja eficiencia (65%-84%) con respecto a la de las demás turbinas tanto de acción como de reacción. Bajas eficiencias a potencias superiores a 1000kW.

5. Generalidades de las PCH

Como ya se ha mencionado entre las diferentes ventajas las PCH presentan bajo costo de operación y fácil mantenimiento; e inversión, tiempo de planeación y tiempo de construcción menor que una central hidroeléctrica convencional [36-43]. Por otro lado, este tipo de proyectos mitigan los impactos ambientales asociados a los sistemas de producción de electricidad debido a que no requieren la inundación de grandes terrenos ni produce residuos contaminantes [44-47]. Los impactos generados en su construcción son fácilmente minimizables, incluso muchos se pueden evitar si se toman las medidas adecuadas (escaleras para peces, caudal ecológico, etc). Otro punto importante desde el punto de vista ambiental es el uso no consumutivo del agua, ya que ésta se recoge del río en un punto y se devuelve al cauce en una cota inferior sin sufrir contaminación alguna [44]. Las características topográficas y climatológicas del país evidencian un potencial para la masificación de las PCH y su aprovechamiento. Como grandes ventajas técnicas las PCH presentan una alta eficiencia (75%-90%) y larga vida útil (alrededor de 50 años) debida a su robustez [44, 48, 49].

Como la tecnología utilizada en las PCH depende de las condiciones hidrológicas y topográficas se debe prever que esta tecnología no está disponible en los sitios de ejecución

del proyecto. La posible expansión de la cobertura del proyecto a largo plazo está limitada por el recurso hídrico del sitio ya que su producción máxima depende de éste. Además los periodos climáticos impactan directamente la energía generada, lo cual limita la cobertura en todos los períodos del año [44, 48].

Como se puede observar las PCH presentan grandes ventajas operativas y ambientales frente a sistemas de generación térmicos, especialmente en ZNI, lo cual las convierte en la mejor alternativa a implementarse para solucionar la falta de energía eléctrica en regiones donde se tienen las condiciones topográficas e hidrológicas aptas para su implementación. Teniendo en cuenta el gran potencial hídrico que existe en Colombia para el desarrollo de las PCH, en el párrafo siguiente se discuten las etapas a tener en cuenta en la ejecución de proyectos de puesta en marcha de las PCH.

6. Etapas de un proyecto de PCH

Los niveles de estudio que se requieren para la concepción de una PCH son [16, 50]:

Inventory: Está orientado hacia el estudio de poblaciones que no tienen servicios de energía eléctrica, con el fin de determinar aquéllas en las cuales se presentan condiciones adecuadas para la instalación de una pequeña central hidroeléctrica.

Reconocimiento: En esta etapa se realizan visitas a la población involucrada y a los lugares posibles de emplazamientos de las obras; se debe considerar que en muchos casos no será posible obtener cartas topográficas ni fotografías aéreas, ya sea porque no se dispone de esta información o porque se trata de proyectos muy delimitados a zonas de pequeña extensión.

Prefactibilidad: este estudio evalúa el potencial de desarrollo de toda la cuenca, estudia la diversidad de las caídas de agua existentes y efectúa una estimación de los costos de cada aprovechamiento. De esta forma, da impulso para desarrollar el proyecto o recomienda que se terminen las investigaciones, si no presentan condiciones favorables.

Factibilidad: Los estudios de factibilidad tienen como objetivo establecer la factibilidad o justificación de un proyecto tanto en su conjunto como en sus dimensiones principales: técnicas, económicas, financieras, sociales y ambientales. El propósito del análisis es determinar si una idea dada de proyecto es suficientemente buena para continuar con ella, y llegar a la mejor solución de acuerdo con las circunstancias.

Diseño: La etapa de diseño final inicia una vez se define la mejor alternativa desde el punto de vista técnico y económico. En esta etapa se dimensionan las diferentes obras del proyecto. Estos diseños deben responder a las exigencias de resistencia, estabilidad, larga duración y fácil explotación.

Construcción: En esta etapa se inicia la construcción de las obras dimensionadas de acuerdo al cronograma de obra establecido previamente.

Puesta en marcha: Finalmente, se realizan las pruebas de funcionamiento de la central con el fin de verificar que esté lista para entrar en operación.

7. Estudios básicos

Según Ortiz [16] para la construcción de una PCH es necesario realizar varios estudios con el fin de identificar los posibles aprovechamientos hídricos, seleccionarlos y optar por el mejor. Estos estudios se ejecutan en las etapas de prefactibilidad y factibilidad, previas al diseño, construcción y puesta en marcha de la planta.

Estudio de la Demanda: El análisis de la demanda es una de las partes fundamentales para el estudio de una PCH; sus resultados deben aportar el consumo actual de la población a la que se desea suministrar energía y con él, proyectar la demanda durante un periodo, que bien puede ser 5, 10, 15, 20 o más años, según la necesidad.

Estudio Cartográfico y Topográfico: En una PCH la energía potencial del agua se transforma en energía cinética y posteriormente en energía eléctrica, esto hace que para disponer de una potencia, se necesite una caída de agua (cabeza), la cual se determina con base en mapas cartográficos de la región en estudio. Por lo general, las zonas aisladas no disponen de mapas cartográficos adecuados al estudio, de ahí que se realice un estudio topográfico que permita obtener los datos necesarios de la zona y conocer la caída aprovechable, para determinar la potencia del recurso hidro-energético.

Estudio Geotécnico: El estudio geotécnico permite conocer las características del terreno en el cual se va a realizar el proyecto. El origen geológico de los materiales del suelo en el aprovechamiento desempeña un papel esencial pues éste determina sus características físicas. Esto es muy importante para definir la localización de las obras del proyecto.

Estudio Hidrológico y Pluviométrico: Determina los caudales disponibles en el río recolectando datos estadísticos de caudal durante un tiempo (generalmente varios años). Debido a que en la mayoría de los casos no se cuenta con datos hídricos suficientes para seleccionar el caudal, debe recurrirse a información pluviométrica para determinar el caudal de manera aproximada.

Estudio de Potencial Hidro-energético: Con los datos de caudal, caída neta y rendimiento de turbina y generador, se puede obtener la potencia que puede ser generada. La selección de la potencia de diseño está condicionada por factores como el costo de la obra, el de la energía producida, las medidas ambientales y los parámetros operacionales de las turbinas y el generador.

Estudio de Impacto Ambiental: Este análisis permitirá evaluar el impacto que el proyecto podría generar sobre el medio ambiente y definir las medidas que permitan reducirlo, mitigarlo o evitarlo. Deberá hacerse de acuerdo con las normas ambientales vigentes.

Estudio Socioeconómico: Normalmente los proyectos PCH tienen un gran componente social, el cual da al proyecto un enfoque para el análisis de su evaluación en este sentido; deben entonces considerarse los efectos indirectos y de valorización social, de beneficios y costos que conlleva su implementación. Sin embargo, una evaluación financiera del proyecto ofrece indicadores de viabilidad para su realización. La mayoría de este tipo de

proyectos no constituye un atractivo económico, lo cual hace necesario establecer incentivos o fondos especiales para su financiamiento.

8. Discusión

El grupo turbina-generador tiene gran importancia en la transformación de la energía cinética y potencial del agua en energía eléctrica. En primer lugar se realiza un estudio detallado presentando cuadros comparativos de los distintos tipos de turbinas hidráulicas que existen. Este tipo de estudios son relevantes cuando se decide evaluar técnico-económicamente la viabilidad de un proyecto de PCH. Este estudio permite conocer los distintos tipos de turbinas existentes, sus rangos de operación, y las ventajas y desventajas de cada tipo. Esto permite tomar la decisión más apropiada acorde con las condiciones de cada proyecto. Considerando los posibles proyectos, las posibilidades de construcción y la continuidad de los datos, se podría concluir que las turbinas de acción son la opción más adecuada a ser implementada en PCH. Su buen rendimiento operando a cargas parciales, cargas a las cuales normalmente operan las PCH, ya que estas típicamente se construyen “a filo de agua” es decir que su caudal está sujeto a grandes variaciones climáticas durante el año.

Por otro lado, el análisis del contexto internacional permitió identificar los países con mayor capacidad son China, Japón y EE.UU [2]. Esto comprueba que los países que más invierten en PCH son algunas de las economías más importantes del mundo, que ven a las PCH como una oportunidad para impulsar el desarrollo de las regiones aisladas de sus centros de consumo porque está comprobado que el desarrollo de un país o región está fuertemente ligado a la disponibilidad energética [51, 52]. A nivel nacional se comprobó que existe un gran potencial hidro-energético disponible para la implementación de PCH. Este tipo de proyectos se encuentran en etapa exploratoria en algunas regiones, otras presentan un desconocimiento total del potencial que poseen. Por lo tanto, es necesario establecer en Colombia mecanismos legales y políticos específicos para el desarrollo de PCH como incentivos por inversión, mecanismos de financiación, etc. ya que estas iniciativas fueron las que permitieron la masificación de las PCH en los países industrializados y de economías emergentes, obteniendo beneficios a nivel de mejora en la calidad de vida de la población y en su industria.

9. Conclusiones

Con base en la información presentada acerca de las PCH en el artículo se puede concluir:

El gran auge que han tenido las PCH en países como China, Japón, EE.UU, Alemania, Brasil, España e India, que son algunas de las economías más importantes del mundo, se debe a los incentivos (como Feed-in-tarif, exención arancelaria) y facilidades ofrecidas por sus Gobiernos, los cuales reconocen a las PCH como fuente de desarrollo y crecimiento de sus regiones aisladas donde no se cuenta con un suministro firme de energía.

En Colombia no existen incentivos específicos para proyectos de PCH, pero pueden aplicar los existentes sobre energías renovables de menos de 20 MW (los cuales son otorgados por entidades como el IPSE y gobiernos departamentales), exenciones de impuestos al clasificarse como proyectos de innovación y desarrollo, y bonos MDL.

Las turbinas hidráulicas que ofrecen mayores ventajas operativas en PCH a filo de agua son las turbinas de acción debido a su excelente rendimiento con cargas parciales, lo cual es una condición típica de las PCH. Sin embargo, el tipo de turbina a seleccionarse dependerá de las condiciones específicas de cada proyecto y no se descartan las demás turbinas.

El planteamiento de las etapas a tener en cuenta para la ejecución de proyectos de puesta en marcha de las PCH permitió establecer que la etapa más importante en la realización de un proyecto de PCH es la de estudios básicos de ingeniería y planteamiento del diseño, que aunque son las menos costosas (alrededor de 10% de la inversión total), son las que determinan si el proyecto será exitoso en la etapa de construcción y puesta en marcha. Si no se le da la suficiente importancia y profundidad a estos estudios, se tendrá un sobrecosto que puede afectar la rentabilidad del proyecto o peor aún, ocasionar que se abandone la iniciativa.

El futuro de las PCH en Colombia es prometedor debido al gran potencial hidro-energético existente. Sin embargo, es necesario que el Gobierno establezca mecanismos legales y políticos que permitan atraer la atención de posibles inversionistas a este tipo de proyectos tanto en el Sistema Eléctrico Nacional como en zonas rurales no interconectadas.

Agradecimientos

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a las empresas ICP-ECOPETROL S.A y AMBIOCOOP LTDA por el apoyo brindado en la redacción de este artículo.

Referencias

- [1] Franco C, Dyner I, Hoyos S. Contribución de la energía al desarrollo de comunidades aisladas no interconectadas: un caso de aplicación de la dinámica de sistemas y los medios de vida sostenibles en el suroccidente colombiano. Revista DYNA. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia, 75(154), pp. 199-214, marzo, 2008.
- [2] Renewable Energy POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Renewables Global Status Report Year 2010. Edición 2010. Paris, Francia. Disponible en Web: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf [Consultada: 5-9-2012].
- [3] RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Renewables Global Status Report Year 2011. Edición 2012. Paris, Francia. Disponible en Web: <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/GSR2011/tabid/56142/Default.aspx> [Consultada: 5-9-2012]
- [4] Taylor, S.D.B; Upadhyay, D. Small Hydropower for Developing Countries. Bruselas, Bélgica: Thematic Network on Small Hydropower Project. Disponible en web: <http://www.ren21.net/REN21Activities/Publications/GlobalStatusReport/GSR2011/tabid/56142/Default.aspx> [Consultada: 5-9-2012]

- http://www.esha.be/fileadmin/eha_files/documents/publications/publications/Brochure_SHP_for_Developing_Countries.pdf [Consultada: 5-9-2012]
- [5] Taylor, S.D.B; Upadhyay, D. Sustainable Markets for Small Hydro in Developing Countries. En: *Hydropower & Dams*, Ed 3, pp 62-66, 2005.
- [6] Martinot, E; Akanksha, C; Lew, D; Moreira, J.R; Wamukonya, N. Renewable energy markets in developing countries. *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol 27, pp 309-348, 2002.
- [7] Singal, S.K. Planning and Implementation of Small Hydropower (SHP) Projects. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*, Ed 5, pp 21-25, 2009.
- [8] Sinha, S.M. Private Participation and State Policies in Developing Small Hydro as Alternate Source of Energy in Developing Countries. *International Conference on Small Hydropower*. Oct. 22-24, 2007. Disponible en web: <http://www.ahec.org.in/links/International%20conference%20on%20SHP%20Kandy%20Srilanka%20All%20Details%5CPapers%5CPolicy,%20Investor%20&%20Operational%20Aspects-C%5CC15.pdf> [Consultada: 5-9-2012].
- [9] Zhiwu, Li. China's Small Hydropower in Rural Energy Development. National Research Institute for Rural Electrification, China Hangzhou regional (Asia & Pacific) Center for Small Hydropower. Disponible en web: <http://ebookbrowse.com/4-prof-zhiwu-li-china-s-small-hydropower-in-rural-energy-development-pdf-d386475731> [Consultada: 5-9-2012]
- [10] Martinot, E. Renewable power for China: Past, present, and future. En: *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*. Vol. 4, (3) pp. 287-294, 2010.
- [11] Wallace, W.L; Wu, H; Wang, Z.Y. Experience for sustainable development of rural energy in China. *Proceedings of the Great Wall Renewable Energy Forum*.NDRC/UNDP/GEF Project Management Office, 2006. Disponible en web: http://www.martinot.info/Wallace_et_al_rural_GWREF2006.pdf [Consultada: 5-9-2012].
- [12] Tong, J. Some Features of China's Small Hydropower. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*. Ed 4, pp 11-14, 2009.
- [13] Tapia, G. Financiación de Tecnologías Limpias XXVIII Jornadas Nacionales de Administración Financiera, Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires, 2008. Disponible en web: <http://greenventi.com/wp-content/uploads/2011/10/XXVIII-J-Tapia-Financiacion-de-tecnologia-limpia.pdf> [Consultada: 12-9-2012]
- [14] XM S.A. E.S.P. Descripción del Sistema Eléctrico Colombiano. Disponible en: <http://www.xm.com.co/Pages/DescripciondelSistemaElectricoColombiano.aspx> [Consultada 12-9-2012]
- [15] CORPOEMA – UPME. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) Avance 1, 2010. Disponible en web: http://www.upme.gov.co/Sigic/Informes/Informe_Avance_01.pdf [Consultada: 12-9-2012].
- [16] Ortiz-Florez, R. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Primera Edición. Colombia: Editorial McGraw Hill, 2001.
- [17] PALACIOS, M. Estudio de Prefactibilidad para la Construcción y Operación de la Pequeña Central Hidroeléctrica Río La Virgen en el Municipio de Masagua, Escuintla, Guatemala. [Tesis Maestría]: Guatemala: Universidad de San Carlos, 2009.
- [18] Nava, F.J. Factibilidad de Generación de Energía Eléctrica en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Doctor Enrique Bourgoín. [Tesis pregrado]. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes de Mérida, 2008.
- [19] Purohit, P. Small hydro power projects under clean development mechanism in India: A preliminary assessment. *Energy Policy*, Vol 36(6), pp 2000-2015, 2008.
- [20] UPME. Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos Finales. Disponible en web:
- <http://www.corpoema.com/Informacion%20FNCE/Eolico/Cartilla%20ER%20col.pdf> [Consultada: 12-9-2012].
- [21] Sierra, F.; Sierra, A.; Guerro, C. Pequeñas y micro centrales hidroeléctricas: Alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico*. Ed 75, pp 73-85, 2011.
- [22] TNSHP. Guide on How to Develop a Small hydropower Plan. Bruselas, Bélgica. ESHA, 2004. Disponible en web:
- http://www.esha.be/fileadmin/eha_files/documents/publications/GUIDES/GUIDE_SHP/GUIDE_SHP_EN.pdf [Consultada: 30-9-2012].
- [23] Paish, O. Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 6 (6). pp 537-556, 2002.
- [24] Chiyembekezo, K.; Kimambo, C.; Nielsen, Torbjorn, N. Potential of Small-Scale Hydropower for Electricity Generation in Sub-Saharan Africa. *ISRN Renewable Energy*. Vol 2012, 15 paginas, 2012.
- [25] IBERDROLA RENOVABLES. Energías Renovables para todos: Hidráulica. Madrid, España. Haya Comunicación. 2007. Disponible en web: https://www.iberdrola.es/webibd/gc/prod/es/doc/cli_renovables_todos.pdf [Consultada: 30-9-2012].
- [26] Suescún, I. Centrales hidráulicas: Turbinas. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, 2005. Disponible en web: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf> [Consultada: 30-9-2012].
- [27] Gazzoni, D. Oportunidades de Negocio con Energías Renovables. Asunción, Paraguay, 2010 Disponible en web: http://www.slidefinder.net/g/geopol%C3%ADtica_energ%C3%ADA_demo_graf%C3%ADa_econom%C3%ADa_energ%C3%ADa/33011943 [Consultada: 30-9-2012]
- [28] Dávila, C.; Vilar, D.; Villanueva, G.; Quiroz, L.. Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de microcentrales hidroeléctricas. Lima: Soluciones Prácticas, 2010. ISBN: 978-9972-47-210-5.
- [29] Santos, J.A. Estudio para la implementación de una pequeña hidroeléctrica, en un beneficio húmedo de café. [Tesis Pregrado]. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006.
- [30] Marchegiani, A. Turbomáquinas: Las Turbinas Hidráulicas. II Curso internacional de especialización en micro y minicentrales hidroeléctricas. Cajamarca, Peru, 2004.
- [31] Cobb, B.; Sharp, K.; Impulse (Turgo and Pelton) turbine performance characteristics and their impact on pico-hydro installations. *Renewable Energy Journal*, Vol 50, pp 959-964, 2013.
- [32] Sinhg, D. Micro Hydropower Resource Assessment Handbook. Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology of the United Nations – Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP), 2009.
- [33] NATURAL RESOURCES CANADA. Micro hydropower systems: a buyer's guide, 2004. ISBN 0-662-35880-5. Disponible en web: <http://canmetenergy.nrcan.gc.ca/sites/canmetenergy.nrcan.gc.ca/files/files/pubs/buyersguidehydroeng.pdf> [Consultada: 12-12-2012].
- [34] IDAE. Manuales de Energías Renovables: Minicentrales Hidroeléctrica. Madrid, España, 2006. Disponible en web: <http://www.idae.es/index.php/idpag.16/relmenu.301/mod.pags/mem.detalle> [Consultada: 12-12-2012].
- [35] Brussa, A.; Guarnone, E. Energía Minihidráulica: Proyecto RES & RUE Dissemination. CECU. Disponible en: <http://www.cecuhuesca.es/campañas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/Indice.htm> [Consultada: 27-12-2012]
- [36] Rojanamon, P; Chaisomphob, T; Bureekul, T. Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economic/environmental criteria and social impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13(9). pp 2336-2348, 2009.

- [37] Dudhani, S.; Sinha A.; Inamdar, S. Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in India. *Energy Policy*, Vol. 34 (17), pp 3195-3205, 2006.
- [38] Ramachandra, TV; JHA, R.K; Krishan, V; Shruthi, B.V. Spatial decision support system for assessing micro, mini and small hydro potential. *Journal of Applied Sciences*. Ed 4, pp 596-604, 2004.
- [39] BHA (British Hydropower Association). A guide to UK mini-hydro developments Version 1.2, 2006. Disponible en web: <http://www.british-hydro.org/mini-hydro/download.pdf> [Consultada: 12-12-2012]
- [40] Bakis, R. The current status and future opportunities of hydroelectricity. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, Vol 2,(3). pp 259-266, 2007.
- [41] Borota, M. Mini hydro power plants 'Green' power for uses. Belgrado, Serbia, 2008. Disponible en web:http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-903.pdf [Consultada: 17-12-2012].
- [42] Evans, A; Strezov, V; Evans, T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol 13(5). pp 1082–1088, 2009.
- [43] Furukawa, A; Watanabe, S; Matsushita, D; Okuma, K. Development of ducted Darrieus turbine for low head hydropower utilization. *Current Applied Physics*. Vol 10 (2). pp S128-S132, 2010.
- [44] BUNCA. Manuales sobre energía renovable: hidráulica a pequeña escala. Primera Edición. San José, Costa Rica, 2002. ISBN: 9968-9708-8-3. Disponible en web: www.bun-ca.org/publicaciones/HIDRA.pdf [Consultada: 17-12-2012].
- [45] Dursun, B; Gokcol, C. The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy Journal*, Vol 36 (4). pp 1227-1235, 2011.
- [46] Kosnik L. The potential of water power in the fight against global warming in the US. *Energy Policy*. Vol 36 (9). pp 3252-3265, 2008.
- [47] Blanco, C; Secretan, Y; Mesquita, A. Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. *Energy for Sustainable Development*. Vol. 12 (3). pp 25-33, 2008.
- [48] ESHA. State of the Art of Small Hydropower in EU-25. Bruselas, Bélgica, 2005. Disponible en web: http://www.esha.be/fileadmin/esha_files/documents/publications/publications/State_of_the_Art.pdf [Consultada: 27-12-2012].
- [49] Paish, O. Micro-hydropower: Status and prospects. *Journal of Power and Energy*, Vol 216, pp 31-40, 2002.
- [50] Mora, D; Hurtado, J. Guía para estudios de viabilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos. [Tesis Pregrado]. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana, 2004.
- [51] Prado, G; ITDG. Estudio de Scaling Up en Micro Centrales Hidroeléctricas. Lima, Peru, 2006. Disponible en web: http://practicalaction.org/docs/energy/prado_estudio_de_scaling_up_en_mcbs.pdf [Consultada: 27-12-2012].
- [52] Ghosh, A.; Majumdar, S.; Kaur, A. Steady growth in small hydro power; however significant, challenges remain. ICRA (Investment Information and Credit Rating Agency of India Limited) Rating Feature. Disponible en web: <http://www.icra.in/Files/ticker/SHP%20note-.pdf> [Consultada: 27-12-2012].

Model-driven software development in the institutional repositories El desarrollo de software dirigido por modelos en los repositorios institucionales

Jose Texier ^a, Marisa De Giusti ^b & Silvia Gordillo ^c

^a MSc. Profesor de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela jtexier@unet.edu.ve

^b Ing. Profesora de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina marisa.degiusti@sedici.unlp.edu.ar

^c Dra. Profesora de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina gordillo@lifia.info.unlp.edu.ar

Received: February 15th, 2013. Received in revised form: September 10th, 2013. Accepted: November 6th, 2013.

Abstract

The Institutional Repositories (IR) have been consolidated into the academy, the proof of this is the growth in number of records in existing directories made by various means, such as self-archiving by authors and the incorporation of material by librarians. In this paper, a bibliographic survey about the use of the Model-Driven Software Development approach is done (MDD) in the IR systems in order to establish a relationship between them. The MDD is a paradigm for building software that assigns a central role to the models and originates models that range from the most abstract to the most concrete. This paradigm also provides a framework that allows the interested ones to share their points of view and directly manipulate the representations of the domain entities from IR. In conclusion, the monitoring of the various researches, and what is expressed here, allow to encourage the implementation of software for IR.

Keywords: institutional repositories, Model-Driven Software Development, MDD, metamodels

Resumen

Los Repositorios Institucionales (RI) se han consolidado en la academia, prueba de ello es el crecimiento en número de registros en los directorios existentes realizado por diferentes vías: autoarchivo por parte de autores, la incorporación de material a cargo de bibliotecarios, entre otras. En este trabajo se hace un relevamiento bibliográfico sobre el uso del enfoque de Desarrollo de Software Dirigido por Modelos (MDD) en los sistemas de RI con el propósito de establecer una relación entre ellos. El MDD es un paradigma de construcción de software que asigna a los modelos un rol central y se derivan modelos que van desde los más abstractos a los más concretos. Este paradigma, además, proporciona un marco de trabajo que permite a los interesados compartir sus puntos de vista y manipular las representaciones de las entidades del dominio. En conclusión, el seguimiento de las diferentes investigaciones relevadas y lo aquí expuesto permiten incentivar implementaciones de software para los RI.

Palabras Clave: repositorios institucionales, desarrollo de software dirigido por modelos, MDD, metamodelos.

1. Introducción

Los Repositorios Digitales están teniendo un gran auge en las comunidades universitarias, de manera especial, por su capacidad para difundir y preservar las actividades académicas y científicas, y, normalmente, se registran en los llamados "directorios de repositorios", por ejemplo, OpenDOAR [1] o ROAR [2]. El crecimiento de uso de estas estructuras web interoperables queda evidenciado en los depósitos diarios de artículos o documentos realizados por varias vías, tales como el autoarchivo por parte de los usuarios registrados, las catalogaciones por parte de los bibliotecarios, entre otras. Los repositorios tienen como propósito recopilar, catalogar, gestionar, acceder, difundir y preservar los recursos científicos, académicos y administrativos, descritos por medio de un conjunto de datos específicos (metadatos) [3], [4]. Es necesario aclarar

que en este trabajo se utilizan indistintamente los términos Repositorios Institucionales (RI) y Bibliotecas Digitales (BD), ya que gracias a la evolución de los servicios e infraestructuras web, principalmente en los RI, se puede decir que un Repositorio Institucional es una Biblioteca Digital y una Biblioteca Digital es un Repositorio Institucional [5]–[7]. De igual forma, los RI también son conocidos como Repositorios Digitales [8].

El diseño y desarrollo de repositorios requiere que las diferentes partes interesadas: desarrolladores, dueños del negocio y expertos del dominio, se pongan de acuerdo sobre un lenguaje neutral y de alto nivel para describir, discutir y negociar los servicios que se pueden ofrecer, motivo por el cual es deseable que la construcción de sistemas o aplicaciones para el dominio de los repositorios se realice



bajo metodologías de construcción de software, con el fin de obtener productos de mayor calidad y reuso [9]. Una metodología en crecimiento y soportada por tecnologías abiertas es el Desarrollo de Software Dirigido por Modelos (MDD) [10].

Para noviembre de 2012, existían alrededor de 2900 repositorios en el mundo [1], los cuales se han implementado y desarrollado con base en modelos conceptuales creados en los últimos 25 años, a saber: DELOS, FRBR, Norma ISO 14721, entre otros [11], [12]. Lo ideal para consolidar los sistemas de repositorios es contar con un modelo general a partir de las virtudes de los modelos conceptuales más destacados –adicional al aporte propio– y formalizado bajo una metodología de desarrollo de software. Por ello, este trabajo se centra en el MDD en los RI, los cuales se han convertido en sistemas de información complejos que están basados en tecnologías y características de diferentes áreas tales como bibliotecas, sistemas de información, recuperación de información, representación de información e interacción persona-computador [13]; y, el MDD es una metodología para la construcción de software que permite involucrar diversas tecnologías, facilita el reuso del software (unión de esfuerzos) y está dirigido por modelos [9].

La interrogante que este artículo pretende responder es, ¿cuál es la relación entre el MDD y los RI? Para ello, se ha organizado el trabajo de la siguiente manera: en la segunda sección se expone el estado del arte del trabajo y un relevamiento bibliográfico del tema; en la tercera sección se describen los resultados y el aporte del trabajo presentado; y, finalmente, en la cuarta sección se presentan unas conclusiones y trabajos futuros derivados de la experiencia del Servicio de Difusión de la Creación Intelectual (SEDICI) [14], repositorio central de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

2. Estado del arte

2.1. Modelos conceptuales en los repositorios

La comunidad de desarrolladores de software ha comenzado a tomar conciencia de la necesidad de formalizar la construcción de componentes de software y guiar tales desarrollos a través de modelos, definidos como un conjunto de elementos que sirven para demostrar la consistencia de una teoría, es decir, representan con detalle un sistema dado [15]. Los sistemas de repositorios están caracterizados por problemas originados por la representación de los recursos y por la diversidad de soluciones tecnológicas en distintos módulos, tales como: almacenamiento, catalogación, indexación, infraestructura de la plataforma de software y preservación de los recursos [11], [12], [16].

La propuesta de enfocar el desarrollo de software en los repositorios con la metodología MDD, hace necesario relevar el elemento principal de esa metodología para la

construcción del software: los modelos conceptuales de los repositorios [9]. Por tanto, se realizó una búsqueda de documentos (*article* o *review*) en la base de datos bibliográfica de Scopus desde 1990 hasta la fecha (25 de noviembre de 2012), con los términos de descriptores truncados “*Model of Digital Librar**” o “*Model for Digital Librar**” presentes en el título, resumen y/o palabras clave con el propósito de identificar los modelos conceptuales existentes de sistemas de repositorios. Se obtuvieron 20 resultados de los cuales se descartaron 18 trabajos por estar vinculados a la evaluación de las bibliotecas digitales, preservación, tecnologías grid, ontologías, entre otros, y no a modelos conceptuales en relación con el dominio tratado. Por ende, surgieron dos indagaciones relacionadas con el objeto de estudio, a saber:

1. El modelo formal propuesto por Goncalves *et al.* en el 2004, conocido como “*Streams, Structures, Spaces, Scenarios, Societies*” (5S) [11]. Se basa en cinco abstracciones fundamentales: Streams, Structures, Spaces, Scenarios and Societies, las cuales ayudan a definir, relacionar y unir conceptos de objetos digitales, metadatos, colecciones y servicios, requeridos para formalizar las bibliotecas digitales. Las relaciones de las 5S con los objetivos de una biblioteca digital son: **los flujos** se refieren a la comunicación y al consumo de información por parte de los usuarios; **las estructuras** apoyan la organización de la información en formas útiles y significativas; **los espacios** tratan de la presentación y del acceso a la información en formas útiles y eficaces; **los escenarios** proporcionan apoyo para la definición y diseño de diferentes tipos de servicios; y, **las sociedades** definen la forma de una biblioteca digital ayudando a satisfacer las necesidades de información de sus usuarios.
2. El modelo general DELOS [12], de Candela *et al.* en el 2007, proponen un modelo para las bibliotecas digitales donde se identifican los conceptos que pasan a ser la piedra angular de este dominio. Por ello, establecen un framework llamado Three Tier Framework, con tres sistemas: Digital Library (DL), Digital Library System (DLS) y Digital Library Management System (DLMS). El primero de los sistemas, DL, es la organización que recoge, gestiona y preserva a largo plazo los contenidos digitales y que también los ofrece a las distintas comunidades de usuario. El sistema DLS es básicamente el sistema de software, la arquitectura requerida para brindar la funcionalidad de la biblioteca. Finalmente, el DLMS es la plataforma en sí: sistema operativo, bases de datos, interfaz de usuario que brinda la funcionalidad básica y la integración con el software especializado. Mientras que el concepto de DL es abstracto, el DLS y el DLMS capturan realizaciones concretas de sistemas de software.

Por tanto, el hallazgo de dos trabajos permite afirmar que se cuenta con un corpus muy limitado de modelos conceptuales de repositorios que sirvan de base para soluciones en el área bajo el paradigma de construcción de

software MDD. Los trabajos reseñados dan cuenta de unos modelos que pueden servir de insumo para el diseño de modelos conceptuales a usar en MDD.

2.2. Desarrollo de software dirigido por modelos (MDD)

El desarrollo de software dirigido por modelos, conocido en inglés como *Model Driven Development* (MDD), es un paradigma de construcción de software cuyas motivaciones principales son la independencia de los productores de software a través de estandarizaciones y la portabilidad de los sistemas de software [9]. El objetivo de MDD es separar el diseño del sistema de la arquitectura de las tecnologías, para que puedan ser modificados independientemente. Para lograr esto, se asigna a los modelos un rol central y activo bajo el cual se derivan modelos que van desde los más abstractos a los concretos, este proceso se realiza a través de transformaciones sucesivas e iteraciones. La mayor importancia de este paradigma radica en que todo debe girar sobre la base de modelos, definidos a partir de metamodelos, que ayudan al computador a entenderlos y a transformarlos [17]. El Model Driven Architecture (MDA o Arquitectura Dirigida por Modelos) es una propuesta de MDD definida por Object Management Group (OMG). En ocasiones, el término MDA se intercambia con el de MDD, ya que MDA se refiere a las actividades que llevan a cabo los desarrolladores, mientras que MDD hace referencia a su definición formal [10], por tanto, bajo este contexto, es indistinto hacer referencia a MDA o a MDD.

2.2.1. Ciclo de vida del MDD

El ciclo de vida de desarrollo de software en MDD (Fig. 1) basa su funcionalidad en tres modelos [18]. Un **modelo computacional independiente** (Computation Independent Model o CIM) que es una vista del sistema que no muestra detalles de su estructura y se le puede conocer como el modelo del dominio; esto corresponde tradicionalmente a las etapas de captura de requisitos y análisis [9]. El **modelo independiente de la plataforma** (Platform Independent Model o PIM) definido a través de un lenguaje específico para el dominio en cuestión e independiente de cualquier tecnología. El modelo PIM puede traducirse a uno o más **modelos específicos de la plataforma** (Platform Specific Model o PSM). Las implementaciones de los PSM, pueden estar basadas en lenguajes específicos del dominio o lenguajes de propósito general como Java, C, base de datos relacionales (SQL), Python, etc. Luego de definir cada uno de estos modelos, se realiza la implementación del código fuente (Implementation Model o IM) a partir de cada uno de los PSM desarrollados. Es importante destacar que los PIM o PSM pueden contener varios modelos correspondientes a distintos puntos de vista del sistema [18].

Este paradigma de desarrollo de software, que plantea una metodología basada en la generación de modelos (PIM y PSM) que pueden transformarse en otros modelos

sucesivamente hasta obtener una representación final (usualmente código ejecutable), está soportado sobre un lenguaje que a su vez está definido a partir de un metalenguaje [10], lo cual genera la idea de sucesivas capas recursivas y estructuradas en 4 capas o niveles de modelado, de acuerdo con lo establecido en la OMG [18].

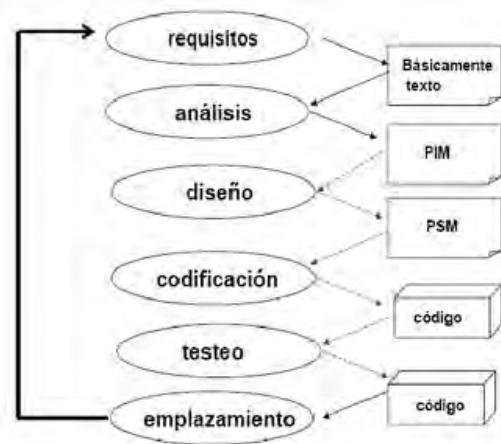


Figura 1. Ciclo de vida de MDD. Fuente: Kleppe et al. [19]

2.2.2. Antecedentes de MDD en los repositorios

Con el fin de conocer los *trabajos que existen sobre el dominio de los repositorios con el enfoque Model Driven* [20] se realizó una búsqueda en Scopus (1990-2012) con los términos de descriptores truncados: “*Model Driven* *” AND “*Institutional Repository* *”, o “*Model Driven* *” AND “*Digital Library* *”. Esta búsqueda se realizó sobre los campos título, resumen y palabras clave. Se encontraron 7 resultados, de los cuales 5 fueron tomados en cuenta porque muestran la línea de investigación de Malizia *et al.* [21]–[24], y la investigación de Paganelli *et al.* [25]. Los otros dos trabajos hallados fueron descartados porque se relacionan con transformaciones formales de modelos orientados a la preservación [26] y con la integración de funciones de modelos dirigidos por datos XML [27]. Tomando en cuenta que Scopus indexa la mayoría de los artículos presentes en las bases de datos bibliográficas IEEE y Springer [28], [29], se realizó otra búsqueda con el fin de cruzar datos y verificar que los resultados coincidían y/o divergían. La búsqueda se realizó bajo los mismos criterios y se obtuvieron tres resultados: dos que coincidieron con la búsqueda anterior [21], [27] y un nuevo tercer trabajo que se descartó porque describe un framework para servicios web en las bibliotecas digitales [30]. Con el propósito de ampliar el corpus, se realizaron búsquedas en las conferencias más importantes sobre los RI y BD [31], dominio también conocido como LIS (Library and Information Sciences) [32]–[36], y en las conferencias referentes de la Ingeniería de Software, específicamente, en las áreas de generación automática de código y el enfoque dirigido por modelo

(Model Driven) [37]–[41]. En ambas búsquedas no se obtuvieron resultados.

Los trabajos hallados en el relevamiento descrito previamente se resumen en el de Paganelli *et al.* en el 2005 [25] y el de Malizia *et al.* en el 2010 [22]. El primero de ellos, explica cómo los enfoques dirigidos por modelos pueden ayudar a los sistemas de gestión de documentos basados en modelos de información en XML. También describe las características de los documentos, los requerimientos para estos sistemas y un framework de desarrollo. El trabajo de Malizia *et al.*, describe un framework basado en un metamodelo y un lenguaje visual. Este framework, llamado por los autores CRADLE (Cooperative-Relational Approach to Digital Library Environments), es una definición de conceptos y servicios relacionados con el desarrollo de bibliotecas digitales compuesto por cinco entidades: actor, colección, servicios, estructura y documento. Este artículo reseña los antecedentes del enfoque dirigido por modelos en las BD, luego describen la arquitectura y el metamodelo del framework. Las características principales de este framework están en contar con un lenguaje visual que ayuda a las partes interesadas integrando el modelado con la generación de código y en la definición de metadatos. Finalmente estos autores presentan cómo es la generación de sistemas en este dominio y su evaluación. De igual forma, en el relevamiento anterior de Scopus, se encontraron 3 trabajos [21], [23], [24] que fueron investigaciones previas que están resumidas en el trabajo descrito de Malizia *et al.* [22].

Por tanto, la revisión de la literatura realizada permite concluir que el MDD no ha sido determinante en el diseño e implementación de sistemas de repositorios, ya sea por ser un paradigma nuevo o por no haber sido (aún) adoptado por la comunidad de informáticos.

En definitiva, los párrafos anteriores dan cuenta de dos relevamientos a partir de la búsqueda en bases de datos bibliográficas y de conferencias referentes del dominio LIS y de la Ingeniería de Software que se consideraron necesarios para conocer el estado del arte de un tema novedoso y con mucho campo en lo científico para la búsqueda de soluciones al dominio LIS, en beneficio de los usuarios principalmente. Asimismo, estos resultados reflejan un área de vacancia entre los modelos conceptuales para repositorios digitales y el desarrollo de software dirigido por modelos.

3. Resultados y aporte

3.1. MDD para el desarrollo de sistemas de repositorios

Lo ideal para consolidar el desarrollo de sistemas de repositorios es disponer de un modelo que represente a los recursos y diferentes servicios del repositorio para poder desarrollar aplicaciones de este dominio bajo metodologías dirigidas por modelos. Por ende, el paradigma MDD brinda un marco que permite a los interesados compartir sus puntos de vista y manipular directamente las representaciones de las entidades de este dominio [9]. A continuación, se

presenta una serie de beneficios para los tres actores presentes, del dominio de los repositorios, en el desarrollo de software que se pueden tomar tanto de la aplicación del paradigma como de su implementación en el contexto de los repositorios:

3.1.1. Los desarrolladores y/o diseñadores:

son los responsables de hacer realidad los requerimientos del sistema a desarrollar, cuyos beneficios son:

- Un menor número de líneas de código escritas, ya que los niveles de abstracción de MDD a través de los modelos y metamodelos diseñados fomentan el reuso del código y de los modelos.
- Alto nivel de abstracción para escribir aplicaciones y artefactos de software a través de la arquitectura de niveles del metamodelado y las capas de modelado de MDA. Este beneficio favorece diseñar una aplicación o artefactos de software partiendo de lo más general a lo más concreto, es decir, son independientes de la tecnología. Por ejemplo, los objetos del repositorio se pueden abstraer a un formato general propio de los RI, además de establecer relaciones entre ellos. Algunos ejemplos de objetos son: documentos, autores, instituciones, tesoros, sistemas de clasificación, áreas temáticas, etc.
- Especificación de requisitos de usuario a varios niveles obteniendo un sistema flexible a los cambios. La flexibilidad de estos sistemas se observa si la funcionalidad que se desea agregar es posible implementarla a través de los modelos correspondientes y evidentemente en el código generado.
- Evitar la adopción de una única tecnología de hardware particular gracias a los niveles de abstracción presentes sin generar un vínculo particular, por tanto, los metamodelos se convierten en el eje central, porque representan el modelo del sistema de manera independiente a la tecnología.
- Interoperabilidad entre los objetos en los sistemas de RI en un entorno multiplataforma. Esto se logra por los niveles de abstracción que permiten representar en un modelo general las relaciones entre objetos del RI en diversas plataformas.

3.1.2. Dueños del negocio:

son los encargados de coordinar y/o financiar el proyecto de desarrollo e implementación del sistema dentro de la organización o institución, y los beneficios los dueños del negocio pueden coordinar son:

- Desarrollo de componentes de software para los sistemas de repositorios. Este beneficio se evidencia por las fases del MDD, que van del CIM a la generación de código, ayudando a los desarrolladores a crear diseños de artefactos correctos sin causar problemas en el sistema general con el fin de incrementar la

productividad y calidad del mismo. Esos artefactos pueden ser indicadores para evaluar el uso del sistema, por ejemplo, recursos descargados y visitados, tiempo de permanencia en vistas de los objetos, etc.

- Preservación digital de los recursos y/o de los objetos generando estrategias que parten de los niveles altos de abstracción, como son los PIM. La importancia de la preservación radica en garantizar la perpetuidad en el tiempo del recurso almacenado.
- Generación de código para plataformas previamente especificadas a través de la funcionalidad que ofrece el paradigma, ya que los artefactos de software se generan en los PSM que luego se transformarán en el código deseado.
- Reducción de costes en el desarrollo de aplicaciones debido a la disminución del recurso humano requerido, de las horas hombre y del tiempo invertido en las diferentes actividades relacionadas.
- Documentación de todo el proceso de desarrollo de software, representado básicamente en el modelo PIM, documentación de alto nivel que se necesita para cualquier sistema de software.

3.1.3. Expertos del dominio:

representan a los especialistas presentes en las fases del mundo de los RI. Los beneficios en los que los expertos pueden interactuar son:

- Permitir la revisión de modelos por parte de los distintos expertos del dominio, a diferencia de los desarrolladores que se concentran en los detalles técnicos a través de transformaciones de los modelos partiendo desde los PIM hasta la generación de código.
- Generación de lenguajes específicos del dominio en las fases de la implementación de los RI bajo MDD, tales como: modelo de datos, modelo de la arquitectura, modelo de las entidades abstractas, interfaz de usuario, entre otros. Este beneficio se obtiene en el desarrollo de modelos correspondientes a diferentes puntos de vista para las fases principales del paradigma, PIM y PSM, al mismo tiempo la posibilidad de implementar lenguajes específicos del dominio para esos puntos de vista garantizando el reuso de los conceptos.
- Interoperabilidad entre los distintos modelos PSM principalmente, ya que pueden pertenecer a distintas tecnologías (plataformas). Esta interoperabilidad se logra a través de puentes construidos por las herramientas de transformación de modelos garantizando los conceptos definidos.

Estos beneficios ayudan a que todo el entorno del dominio de los RI se concentre en implementaciones de software más formales, generando una consolidación de tales sistemas, cuyos principales beneficiarios serán los usuarios finales a través de los diferentes servicios que son y serán ofrecidos por estos sistemas.

3.2. ¿Por qué MDD en los sistemas de repositorios?

El ideal para los actores involucrados (desarrolladores, dueños del negocio y expertos del dominio) en el diseño y desarrollo de un sistema para repositorios, es que exista un lenguaje neutral y de alto nivel que permita que las partes se pongan de acuerdo y que les sirva de apoyo para describir, discutir y negociar los servicios (destinados a recopilar, catalogar, gestionar, acceder, difundir y preservar) que el repositorio debe ofrecer. Por ello, el paradigma MDD brinda el marco que permite a los interesados compartir sus puntos de vista y manipular directamente las representaciones de las entidades de este dominio. Además, este paradigma ofrece algunas ventajas como: incremento en la productividad (errores, costos, código), adaptación a cambios tecnológicos, reuso de software, mejora en la comunicación con usuarios y desarrolladores, asignación de roles, entre otros [9].

La utilidad del metamodelo en MDD está centrada en definir lenguajes de modelado sin ambigüedades, en contar con herramientas de transformación para leer y entender los modelos, en tener reglas de transformación claras que describen cómo un modelo en un lenguaje fuente va a ser transformado a un modelo en un lenguaje destino y en el uso de definiciones formales obtenidas por la sintaxis de los lenguajes, facilitando su automatización.

La aplicación del paradigma MDD al complejo sistema de información de los Repositorios Institucionales permite trasladar las ventajas del MDD y la utilidad del metamodelado al desarrollo de los sistemas de repositorios, que involucran tecnologías y características de áreas como: bibliotecas, sistemas de información, recuperación de información, representación de información e interacción persona-computador [13]. Estos beneficios son capitalizados a su vez en los diferentes procesos presentes en los RI proporcionando a los desarrolladores conceptos del dominio sin ambigüedades.

4. Conclusiones y trabajos futuros

La idea de aplicar el Desarrollo de Software Dirigido por Modelos en sistemas y aplicaciones para RI que se ha expuesto en este trabajo, se tomaron en cuenta a partir del relevamiento bibliográfico realizado de los modelos conceptuales más importantes y de las experiencias de usar la metodología MDD en el mundo de los Repositorios. Los resultados obtenidos con el relevamiento evidencian la limitada literatura al respecto y demuestra cómo el MDD para RI/BD es un área de vacancia que requiere de más estudios y converge en un tema novedoso.

Por otra parte, se muestra en los modelos conceptuales cómo el concepto de los Repositorios ha evolucionado y se ha relacionado con el concepto de una Biblioteca Digital. Además, se destaca el gran auge que han tenido los RI en los últimos años de acuerdo con los directorios de repositorios existentes y con el afianzamiento de la filosofía

del acceso abierto en la comunidad de investigadores y académicos. Todas estas realidades incentivan el estudio de este dominio así como también el desarrollo de aplicaciones y componentes de software. De igual manera, se recomienda que todos los trabajos, investigaciones y desarrollos de metamodelos, modelos y artefactos de software, sean desarrollados bajo la filosofía del *open source* para que exista un crecimiento y una constante retroalimentación de los múltiples productos generados, de esta manera se podrá extender un poco más la poca bibliografía existente.

La construcción de software es aconsejable realizarla en el marco de alguna metodología, por ello, este trabajo se centró en el Desarrollo de Software Dirigido por Modelos. Se expuso una definición y una breve descripción de la metodología, de igual manera se encontraron trabajos que afirman la consolidación de enfoques dirigidos por modelos y de los diversos beneficios de la aplicación de este enfoque y de otros, que surgen de la implementación del paradigma en este contexto.

Evidentemente, se debe seguir ampliando el tema y profundizando en determinados aspectos, por ello, desde SEDICI se desea dar continuidad al trabajo presentado complementándolo con los siguientes tópicos:

- Análisis, evaluación y comparación de las diferentes metodologías dirigidas por modelos que pueden aplicarse para las aplicaciones y/o artefactos de software del dominio tratado en este trabajo.
- Diseño de un modelo flexible que mejore la representación de recursos dentro de los RI/BD y bajo el paradigma del Desarrollo de Software Dirigido por Modelos propuesto por OMG.

Referencias

- [1] OpenDOAR, OpenDOAR - Home Page - Directory of Open Access Repositories, 2013. [Online]. Available: <http://www.opendoar.org/>. [Accessed: 21-Feb-2013].
- [2] ROAR, Registry of Open Access Repositories (ROAR), 2013. [Online]. Available: <http://roar.eprints.org/>. [Accessed: 21-Feb-2013].
- [3] C. A. Lynch, Institutional Repositories: Essential Infrastructure for Scholarship in the Digital Age, ARL: Feb-2003. [Online]. Available: <http://www.arl.org/resources/pubs/br226/br226ir.shtml>. [Accessed: 28-Feb-2013].
- [4] H. Van de Sompel, S. Payette, J. Erickson, C. Lagoze, and S. Warner, Rethinking Scholarly Communication D-Lib Magazine, . 10. (9), Sep. 2004.
- [5] D. Waters, What Are Digital Libraries?, CLIR Issues, vol. 4, 1998.
- [6] C. L. Borgman, What Are Digital Libraries? Competing Visions., Information Processing & Management, 35. (3), pp. 227–243, 1999.
- [7] J. Xia and D. B. Opperman, Current Trends in Institutional Repositories for Institutions Offering Master's and Baccalaureate Degrees, Serials Review, 36, (1), pp. 10–18, Mar. 2010.
- [8] G. G. Chowdhury and S. Chowdhury, Digital library research: major issues and trends, Journal of Documentation, .55, (4), pp. 409–448, Jan. 1999.
- [9] C. Pons, R. Giandini, and G. Pérez, Desarrollo de Software Dirigido por Modelos. La Plata, Argentina: Mc Graw Hill, 2010.
- [10] A. Navarro, J. Cristóbal, C. Fernández-Chamizo, and A. Fernández-Valmayor, "Architecture of a multiplatform virtual campus," Software: Practice and Experience, Sep. 2011.
- [11] M. A. Gonçalves, E. A. Fox, L. T. Watson, and N. A. Kipp, Streams, structures, spaces, scenarios, societies (5s): A formal model for digital libraries, ACM Trans. Inf. Syst., 22, (2), pp. 270–312, Apr. 2004.
- [12] Leonardo Candela, Castelli, Y. Ioannidis, S. Ross, C. Thanos, P. Pagano, G. Koutrika, H.-J. Schek, and H. Schuldt, "Setting the Foundations of Digital Libraries," D-Lib, 13, (3/4), Mar. 2007.
- [13] L. Guo, "On construction of digital libraries in universities," in 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT), vol. 1, pp. 452–456. 2010.
- [14] M. De Giusti, N. Oviedo, A. Lira, A. Sobrado, J. Martínez, and A. Pinto, SEDICI – Desafíos y experiencias en la vida de un repositorio digital, RENATA, 1, (2), pp. 16–33, Aug. 2011.
- [15] J. Whittle, T. Clark, and T. Kühne, Eds., Model Driven Engineering Languages and Systems 14th International Conference, MODELS 2011, Wellington, New Zealand, October pp.16-21, 2011. Proceedings. .
- [16] D. Bawden and I. Rowlands, Digital libraries: Developing a conceptual framework, New Review of Information Networking, 5, (1), pp. 71–89, 1999.
- [17] P. Gaona, C. Montenegro, J. Cueva, and O. Sanjuan, Aplicación de ingeniería dirigida por modelos (MDA), para la construcción de una herramienta de modelado de dominio específico (DSM) y la creación de módulos en sistemas de gestión de aprendizaje (LMS) independientes de la plataforma, DYNA, 169 (78), pp 43-52. 2011.
- [18] OMG, MDA Guide Version 1.0.1, 2003.
- [19] A. Kleppe, J. Warmer, and W. Bast, MDA Explained: The Model Driven Architecture(TM): Practice and Promise. Addison-Wesley Professional, 2003.
- [20] C. Challiol, Desarrollo dirigido por modelos de aplicaciones de hipermedia móvil, Tesis, Facultad de Informática, 2011.
- [21] A. Malizia, P. Bottoni, S. Levialdi, and F. Astorga-Paliza, A Cooperative-Relational Approach to Digital Libraries, in Research and Advanced Technology for Digital Libraries, L. Kovács, N. Fuhr, and C. Meghini, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 75–86.
- [22] A. Malizia, P. Bottoni, and S. Levialdi, Generating Collaborative Systems for Digital Libraries: a Model-Driven Approach, Information Technology & Libraries, vol. 29, Dec. 2010.
- [23] E. Guerra, J. D. Lara, and A. Malizia, Model driven development of digital libraries-Validation, analysis and code generation, in Webist 2007 - 3rd International Conference on Web Information Systems and Technologies, Proceedings, 2007, vol. WIA, pp. 35–42.
- [24] E. Guerra, J. de Lara, A. Malizia, and P. Díaz, Supporting user-oriented analysis for multi-view domain-specific visual languages, Information and Software Technology, 51,(4), pp. 769–784, Apr. 2009.
- [25] F. Paganelli and M. C. Pettenati, A Model-driven Method for the Design and Deployment of Web-based Document Management Systems, Journal of Digital Information, 6, (3), Jan. 2006.
- [26] T. Triebsees and U. M. Borghoff, A Theory for Model-Based Transformation Applied to Computer-Supported Preservation in Digital Archives, in Engineering of Computer-Based Systems, 2007. ECBS '07. 14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the, pp. 359–370. 2007
- [27] M. A. Martínez-Prieto, P. de la Fuente, J. Vegas, and J. Adiego, Integrating Functionality and Appearance with the Electronic Work

- Logical Structure, in Web Conference, 2007. LA-WEB 2007. Latin American, pp. 84–91. 2007
- [28]J. Texier, Notas metodológicas para cubrir la etapa de documentar una investigación, Proyecto de Enlace de Bibliotecas (PrEBi), Aug. 2011.
- [29]CRL, Welcome to ADAT | Academic Database Assessment Tool. [Online]. Available: <http://adat.crl.edu/>. [Accessed: 01-Feb-2013].
- [30]H. Skogsrød, B. Benatallah, and F. Casati, A trust negotiation system for digital library Web services, *Int J Digit Libr*, 4, (3), pp. 185–207, Nov. 2004.
- [31]C. L. Liew, Digital library research 1997-2007: Organisational and people issues, *Journal of Documentation*, 65, (2), pp. 245–266, Jun. 2009.
- [32]JCDL, Joint Conference on Digital Library - Home. [Online]. Available: <http://www.jcdl.org/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [33] ECDL, European Conference on Digital Libraries. [Online]. Available: <http://ecdlconference.isti.cnr.it/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [34]TPDL, Theory and Practice of Digital Libraries. [Online]. Available: <http://www.tpdleu.eu/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [35] ICADL, International Conference on Asian Digital Libraries. [Online]. Available: <http://www.icadl.org/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [36]Open Repositories 2012. [Online]. Available: <http://or2012.ed.ac.uk/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [37]Code Generation 2013. [Online]. Available: <http://www.codegeneration.net/cg2013/index.php>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [38]ICMT, International Conference in Model Trasformation. [Online]. Available: <http://www.model-transformation.org/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [39]ICWE, International Conference on Web Engineering. [Online]. Available: <http://icwe2013.webengineering.org/>. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [40]MDWE, Model Driven Web Engineering. [Online]. Available: http://mdwe2012.pst_ifi.lmu.de/. [Accessed: 14-Feb-2013].
- [41]MODELS, Model Driven Engineering Languages and Systems. [Online]. Available: <http://www.modelsconference.org/>. [Accessed: 14-Feb-2013].

Systems characterization and classification, a needed step for processes management and improvement. The specifics of health care organizations

La caracterización y clasificación de sistemas, un paso necesario en la gestión y mejora de procesos. Particularidades en organizaciones hospitalarias

Arialys Hernández-Nariño ^a, Alberto Medina-León ^b, Dianelys Nogueira-Rivera ^c, Ernesto Negrín-Sosa ^d & Maylin Marqués-León ^e

^a PhD, Universidad de Matanzas, Cuba. arialys.hernandez@umcc.cu

^b PhD, Universidad de Matanzas, Cuba. alberto.medina@umcc.cu

^c PhD, Universidad de Matanzas, Cuba. dianelys.nogueira@umcc.cu

^d PhD, Universidad de Matanzas, Cuba. ernesto.negrin@umcc.cu

^e PhD, Universidad de Matanzas, Cuba. maylin.marques@umcc.cu

Received: February 20th, 2013. Received in revised form: February 13th, 2014. Accepted: March 18th, 2014.

Resumen

El presente trabajo aborda la importancia de la caracterización y clasificación de sistemas y procesos para la gestión y mejora organizacional. Para ello, se recurre a exposición teórica de métodos para caracterizar y clasificar sistemas y procesos, con énfasis en los servicios hospitalarios y el desarrollo e un procedimiento para la gestión y mejora de sus procesos. Para demostrar, el carácter práctico y la pertinencia de esta temática, en el mundo organizacional actual se establece un caso de aplicación práctica en una organización de salud.

Palabras Clave: caracterización y clasificación, mejora de procesos, organizaciones hospitalarias.

Abstract

The present paper discusses the importance of system and processes characterization and classification for organizational management and improvement. In order to do so, the article shows a theoretical overview on methods to characterize and classify systems and processes, putting special emphasis on health care services and the conception of a procedure for managing and improving process in such environment, with the use of the methods exposed. So as to demonstrate the relevance of this topic, it is illustrated a case study in a particular health care organization.

Keywords: characterization and classification, processes improvement, health care organizations.

1. Introducción

La gestión y mejora de procesos resulta una de las buenas prácticas reconocidas, en la actualidad, en el campo de la gestión empresarial y así se evidencia en los postulados de las normas ISO, el modelo EFQM (*European Foundation for Quality Management*), y herramientas como el Cuadro de Mando Integral, el *Benchmarking* y la filosofía HACCP (Análisis de Riesgos y Puntos Críticos de Control) [1].

Para abordar la mejora de procesos, el estado del arte denota la existencia de procedimientos como los propuestos por Negrín Sosa (2003), Claveranne y Pascal (2004), Nogueira Rivera, Medina León y Nogueira Rivera (2004) [2; 3; 4] que abordan, en cierto modo, la caracterización y clasificación de los sistemas y procesos organizacionales.

En este trabajo se presentan un conjunto de criterios,

probados en la práctica social, que permiten la caracterización de procesos, necesaria para la posterior selección de los métodos de mejora adecuados, de una manera lógica, ordenada y sistemática.

2. Aspectos conceptuales alrededor de la caracterización y clasificación de sistemas

La temática sugiere comenzar por el desarrollo de algunos conceptos necesarios: producción, sistema productivo y proceso.

Producción se considera como el proceso de transformación técnica y económica en condiciones de un diseño racional, planificado y controlado de unos *inputs* o factores de producción (mano de obra, tecnología, materias primas, información, maquinarias, instalaciones y energía) en *outputs* o productos resultantes (bienes materiales,

servicio y/o residuos), que provoca un incremento de utilidad o valor (Figura 1).

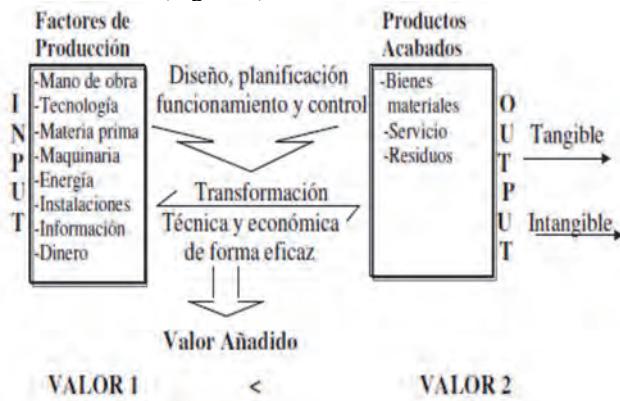


Figura 1. Representación del concepto de producción Fuente: [5]

La consideración de un enfoque de sistemas cobra cada día mayor importancia. Estos necesitan lograr una coordinación eficaz y eficiente entre los recursos (humanos, materiales, financieros y de tiempo) que utiliza para poder subsistir dentro del ambiente político, legal, económico, ecológico y social en que se desenvuelven.

Companys Pascual y Corominas Subias (1993) [6] consideran que un **sistema productivo** es un conjunto de elementos materiales y conceptuales que realizan la transformación. Las entradas están compuestas esencialmente por trabajo humano, energía, materiales, dinero en forma generalmente de maquinaria e instalaciones, sin desdeñar la información tanto en forma de conocimiento tecnológico (*know-how*) y tecnología propiamente dicha (ingeniería del producto y de los procesos) como de conocimiento gerencial y de datos sobre la situación del entorno y del sistema productivo.

Los procesos se consideran la base operativa de las organizaciones y su papel preponderante se atribuye, en parte, a la necesidad de alinear los resultados organizacionales a las exigencias y expectativas de los clientes [7].

El estudio conceptual de este término, a través de la revisión bibliográfica [4; 8; 9; 10], permite concluir que un **proceso** es una:

Secuencia ordenada de actividades repetitivas que se realizan en la organización por una persona, grupo o departamento, con la capacidad de transformar unas entradas (inputs) en salidas o resultados programados (outputs) para un destinatario (dentro o fuera de la empresa que lo ha solicitado y que son los clientes de cada proceso) ejecutado de una manera eficaz y eficiente para obtener un valor agregado.

Medina León *et al.* (2010) añaden que generalmente, cruzan repetidamente la barreras funcionales, están centrados en las expectativas de los clientes, las metas de la organización, son dinámicos, variables y el punto de concreción de los indicadores diseñados para el control [1].

Existen diferentes herramientas para la caracterización de los sistemas. La propuesta por Fernández Sánchez (1993) [11] permite un análisis integral y parte del hecho de que los sistemas

productivos son abiertos, por tanto están en constante interacción con el entorno, y precisamente constituye el punto de partida para el despliegue de trece variables que responden a exigencias actuales en la gestión de las organizaciones. Estas son:

1. Límite o frontera

Delimita físicamente el sistema y lo separa de su medio externo, estableciendo el dominio de sus actividades. Los límites de un sistema abierto son flexibles y variables en el tiempo de acuerdo con sus actividades y funciones.

2. Medio o entorno

Este incluye variables de interacción sistema-medio que se consideran incontrolables para la organización pero determinan su forma de comportamiento. Existen dos tipos de medios que se deben considerar: el genérico y el específico. El primero engloba el conjunto de cambios económicos, sociales, legales y tecnológicos que afectan directamente los *inputs*, productos o sistemas de transformación. El medio específico abarca los departamentos de la organización.

3. Análisis estratégico

El análisis estratégico comprende la definición de metas y la misión, que conlleven a la concreción de objetivos globales y específicos, conductores de su accionar, a partir de los cuales se elaboran las estrategias. Estos factores juegan un papel importante por cuanto su carácter dinámico e interactivo determina en parte el desempeño de la organización.

4. Cartera de productos/ servicios

La cartera de productos y servicios que la organización ofrece a sus clientes, es caracterizada en función de su valor o importancia para la producción, por ejemplo rentabilidad, margen de beneficios, mercado que satisface. Más ambiciosamente, se incluye en el análisis aquellos productos potenciales o nuevos productos que la organización pudiera ofrecer.

5. Estudio de procesos organizacionales

Este estudio comprende la identificación y determinación de los procesos. Permite darle un carácter más concreto a la identificación del banco de problemas que pueden incidir en el desempeño, además de caracterizar las distintas actividades que conforman estos procesos así como su secuencia y relación directa con los resultados planificados.

6. Transformación

La transformación debe ser entendida como el proceso de conversión de inputs en outputs; este entendimiento debe conducirse en un sentido amplio, o sea, que abarque cualquier tipo de cambio en los recursos.

7. Recursos

Son los factores necesarios para realizar las actividades que permiten alcanzar los objetivos; son de tres tipos: los creativos permiten configurar un proceso de transformación capaz de realizar, con la máxima economía y eficacia, las funciones que contribuyen a obtener el producto; los directivos se centran en la dirección del proceso productivo y pretenden el buen funcionamiento de este; los elementales son los inputs necesarios para obtener el output o producto; para conocer la actuación de la empresa y detectar los cambios o variaciones en el sistema a partir de la comparación entre objetivos y resultados.

8. Resultados

Son los productos obtenidos, contemplando también los subproductos no planificados, como la contaminación ambiental, desperdicios tóxicos o las influencias socioculturales que ejerza la empresa sobre sus trabajadores y clientes. Hay cuatro resultados importantes en este entorno: precio, cantidad, calidad y tiempo de entrega.

9. Retroalimentación y control

Es el mecanismo de los sistemas para informarse del grado de cumplimiento de los objetivos y metas. Este sistema de retroalimentación y control se apropia de indicadores de estado portadores de información documental, sobre entradas, salidas, operaciones y relaciones de cada proceso o actividad de la organización, e indicadores de control portadores de información de decisiones.

10. Estabilidad

La estabilidad u homeostasis dinámica es la tendencia a mantener los procesos de transformación dentro de ciertos límites, con el fin de sobrevivir. Existen dos mecanismos de estabilidad que a menudo entran en conflicto: los de mantenimiento que aseguran que el sistema esté equilibrado con su medio, a través de prevenir los cambios que originan el desequilibrio; y los mecanismos de adaptación, necesarios para suministrar un equilibrio dinámico en el tiempo.

11. Flexibilidad

Es la capacidad de adelantarse a los cambios que impone el entorno, y mantener los estándares de desempeño. Es por eso que es muy importante gestionar el cambio para asegurar la inserción del sistema en el entorno cambiante.

12. Inercia

Esta variable tiene un gran vínculo con la estabilidad y significa la posibilidad de la empresa de mantener su actuación o cultura organizacional bajo condiciones de cambio brusco. La inercia puede incidir en dos sentidos:

negativo cuando el cambio es desfavorable, o sea el nuevo estilo de dirección es negativo, y positivo cuando este estilo impulsa o enriquece la cultura organizacional; en este caso se debe gestionar el cambio del estado anterior al actual en el menor tiempo posible.

13. Jerarquía

Estudia la composición del sistema organizacional, si la estructura es plana o no, si favorece enfoques de gestión más descentralizados y horizontales o de lo contrario es más funcional y departamentalizada.

2.1. Criterios de clasificación de sistemas y procesos

Para la clasificación de los sistemas empresariales, se reconocen diversos criterios; entre ellos resalta en primera instancia, la posibilidad de dividir a las empresas en cuatro grandes grupos [6]:

- Manufacturero: En función de la creación física de bienes. Aquí se incluyen sistemas de extracción, fabricación, montaje y construcción.
- Transporte: Analizando el cambio de ubicación, este se subdivide en el transporte aéreo, el terrestre, y el marítimo.
- Suministro: Teniendo en cuenta el cambio que pueda ocurrir en el diseño, lo analiza en la distribución, el almacenaje, la venta y el corretaje.
- Servicio: Esta clasificación está en correspondencia con el criterio grado de contacto propuesto subdividiéndose en alto y bajo contacto.

Para clasificar los servicios se propone una matriz que combina dos criterios: grado de interacción y adaptación, y grado de intensidad de la mano de obra, y ubica a las organizaciones en cuatro cuadrantes como resultado de esta combinación, estos son: taller de servicio, fábrica de servicios, servicios profesionales y servicios masivos. Dicha clasificación es similar a la utilizada para categorizar los sistemas de manufactura en lineal, intermitente y por proyecto junto a la fabricación por pedido o contra inventario [12].

Esta clasificación es útil para identificar tipos de procesos y tomar decisiones sobre la gestión del componente humano, la intensidad de los mecanismos de control, el diseño de estrategias de diferenciación y de servicio al cliente, la gestión de los costos y la tecnología, entre otras tareas gerenciales.

En la actualidad, ante la relevancia que ha adquirido el enfoque de procesos, para mejorar los resultados de las organizaciones, estos también son clasificados, según Negrín Sosa (2003), Nogueira Rivera et al. (2004), ISO 9000 (2008) y Amozarrain (1999) [2; 4; 7; 8], como:

- Estratégicos: aquellos que aportan directrices a todos los demás procesos
- Operativos, claves o del flujo esencial: relacionados directamente con la realización del producto o servicio.

Tienen un impacto directo en el cliente creando valor para este.

- De apoyo o soporte: dan apoyo a los procesos claves.

Una de las organizaciones consideradas dentro del cuadrante taller de servicio de la matriz propuesta por Schroeder (1992)[12], es el hospital. La gestión de los procesos en estas organizaciones es compleja debido a las altas interacciones con los clientes (pacientes y acompañantes), lo que redunda en la existencia de distintas secuencias de actividades de acuerdo a las patologías atendidas; ello incide en los costos del servicio y la calidad percibida, en coincidencia con Serrano Gómez y Ortiz Pimiento (2012)[13]. Por otro lado, la baja intensidad de la mano de obra, apunta hacia buscar mecanismos de gestión de la demanda y la capacidad, por lo costoso que puede representar una cama no ocupada, un salón quirúrgico subutilizado o tiempos alargados de estadía de los pacientes.

En estos servicios existen diferencias que acentúan o suavizan lo aspectos vistos anteriormente. La Tabla 1 resume clasificaciones en servicios de salud cubanos, dentro de los cuales se distinguen los hospitales.

Tabla 1.
Algunas clasificaciones de servicios de salud. Fuente:[14]

Criterio	Clasificación
Servicios de salud	
Complejidad y especialización de los servicios.	Primario: resuelve el 80% o más de los problemas de salud de la población con las especialidades básicas Secundario: resuelve cerca del 15% de los problemas de salud de la población con un número mayor de especialidades Terciario: resuelve un pequeño porcentaje de los problemas de la población con especialidades de perfil muy estrecho.
Necesidad de cuidados médicos del paciente.	Ambulatoria: no es necesario internar al paciente Urgente: el estado del paciente exige rápida atención médica Hospitalaria: se requiere hospitalización por necesidades diagnóstico-terapéuticas o de rehabilitación.
Servicios hospitalarios	
Perfil.	General (más de dos especialidades); Clínico-quirúrgico; Pediátrico; Especializado; Gineco-obstétrico; Materno-infantil.
Localización territorial.	Rural; Local; Municipal; Provincial; Nacional.
Categoría de acuerdo al número de camas.	0-300 camas-nivel 3; 300-600 camas-nivel 2; Más de 600 camas-nivel 1.
Actividad docente.	Hospital docente.
Tipo de servicio.	Programado (consulta médica); Por eventualidad (emergencia); Pasivo (estancia del paciente); De Suministro (farmacia); Eventos (operación quirúrgica).

Estos criterios ayudan a interpretar la situación del hospital, de acuerdo a sus indicadores fundamentales; favorecen la comparación de la actuación de hospitales de similar perfil y número de cama [13]. También están asociados a un aspecto conocido como complejidad del *case mix* (en español casuística hospitalaria), que posee relación

con las diferentes combinaciones que se producen al atender pacientes de diversas patologías y tratamientos terapéuticos. Para ello existen cuatro niveles: intensiva, alta, media y baja complejidad [15].

3. Metodología

Las consideraciones teóricas sobre la gestión y mejora de procesos y la clasificación de sistemas, permiten desplegar un procedimiento que posee cuatro fases: caracterización y diagnóstico del sistema hospitalario, análisis de los procesos, mejora de procesos, y seguimiento y control [14] (Figura 2).

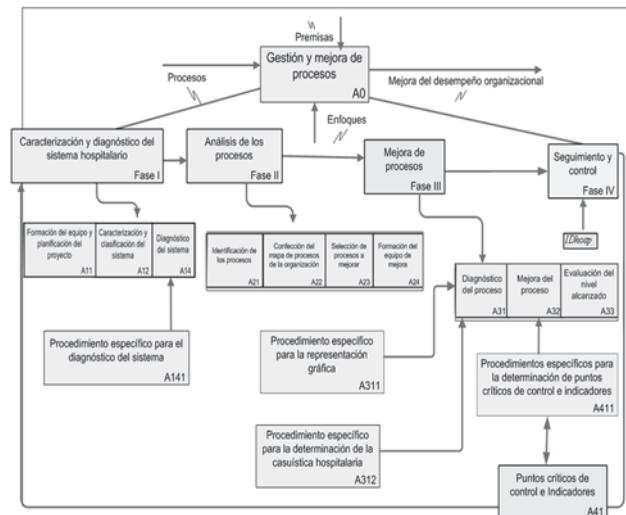


Figura 2. Procedimiento para la gestión y mejora de procesos hospitalarios. Fuente:[14]

Para la Fase I (Caracterización y diagnóstico) se constituye el equipo de trabajo, tal que se garantice la representatividad de las áreas de resultados clave del hospital. Posteriormente, la caracterización y clasificación constituye la vía para familiarizarse con la actividad esencial de la organización y tener una idea inicial de hacia dónde debe apuntar la gestión de sus procesos, para ello se utilizan las trece variables adaptadas de Fernández Sánchez (1993)[11] y expuestas anteriormente. Esta fase culmina con el diagnóstico del sistema, sustentado en el triángulo de los servicios [12].

En la Fase II (Análisis de los procesos), primero se clasifican los procesos en operativos o clave, estratégicos y de apoyo, para su ilustración en el mapa de procesos, luego se identifican los procesos relevantes por el método del coeficiente de concordancia de Kendall; de ellos se seleccionan aquellos prioritarios para la mejora, considerando criterios como su alineación a los objetivos estratégicos, su impacto en la satisfacción de los pacientes, su variabilidad o la probabilidad de obtener beneficios a corto plazo tal como proponen Claveranne y Pascal (2004), Nogueira Rivera et al. (2004) y Amozarain (1999) [3; 4; 8], y valiéndose de la

técnica Proceso Analítico de Jerarquía [16].

En la Fase III (mejora de los procesos), se describe el proceso objeto de estudio, a través de técnicas de representación gráfica como los diagramas As Is [17] o los mapas IDEF0 [18] y ficha de procesos que registra aspectos de interés para la gestión y el control. Finalmente se detectaron las oportunidades de mejora con el uso de herramientas cuya selección y ajuste dependió de la caracterización y clasificación del proceso, previamente realizadas en las fases anteriores.

Estas técnicas fueron: **análisis de la casuística hospitalaria**, para identificar los principales grupos de pacientes y su influencia en el diseño del servicio [19], sirvió de apoyo el uso de procedimientos de muestreo de historias clínicas durante cuatro años; **evaluación de entradas y proveedores** para evaluar ¿cuáles son las entradas del proceso?, ¿qué requerimientos deben cumplir?, y ¿qué evaluación se le confiere a cada proveedor en el cumplimiento de esos requerimientos? [20]; **análisis de valor añadido** para determinar el aporte de valor de las actividades del proceso a través de su incidencia en los objetivos, su contribución a las expectativas de los grupos de interés, su impacto en las características de calidad y si esta actividad constituye un momento de la verdad o no [1; 17]; y **determinación de los tiempos** [21], para visualizar reservas de eficiencia en su uso.

En la Fase IV (Seguimiento y control) se diseña un índice integral para evaluar el desempeño de los procesos hospitalarios (IDhosp). Para su construcción, fue útil una revisión de la literatura sobre indicadores de evaluación de la actividad hospitalaria [22; 23], en una revisión documental se identificaron los indicadores principales en la gestión del desempeño de instituciones hospitalarias cubanas de diferente clasificación y; finalmente, se seleccionaron los indicadores que caracterizan la gestión del hospital con ayuda de expertos previamente seleccionados de acuerdo a la metodología de Frías Jiménez et al. (2008) [24].

A partir de la caracterización del hospital, se normalizó la evaluación del comportamiento de los indicadores que componen el índice integral.

4. Resultados

El procedimiento propuesto fue inicialmente aplicado en tres instituciones que responden a las clasificaciones siguientes: hospital tipo I, clínico quirúrgico, de carácter municipal, docente, con 126 camas (tercer nivel); hospital Tipo II, clínico-quirúrgico, de carácter provincial, docente, especializado en servicios de urgencia y emergencias, con un total de 292 camas (tercer nivel); hospital Tipo III, Gineco-obstétrico, de carácter provincial, docente, con un total de 156 camas (tercer nivel).

A continuación se presentan los resultados en el hospital tipo I, cuya caracterización permitió entender de manera general, el tipo de actividad que lleva a cabo éste. La Tabla 2 muestra las ocho variables de mayor alcance en el objeto de estudio.

Tabla 2.
Caracterización de un hospital clínico-quirúrgico. Fuente:[14]

Variables	Caracterización
Límite y frontera.	Institución de salud pública, ubicada en el municipio Matanzas. Fundada el 7 de enero de 1958 con el objetivo de garantizar la asistencia médica preventiva-curativa y de rehabilitación básicamente al universo de pacientes del territorio. Entre las áreas constructivas más importantes del hospital se encuentran, separadas por bloques constructivos: área administrativa, cuerpo de guardia, hospitalización, servicios ambulatorios, aseguramiento y almacenes.
Medio o entorno.	Principales proveedores: empresa mayorista de medicamentos, Entume Provincial, Taller de electromedicina, Dirección Provincial de Salud, Sección (EMEC) de Logística, y Empresa Provincial de Acopio. Principales pacientes: población de siete comunidades más cercanas, de centros escolares y universitarios enclavados en el territorio.
Ánálisis estratégico.	Misión "Líder de los servicios especializados de salud en el nivel secundario que se ofrecen a militares y población civil seleccionada y planificada de la Provincia de Matanzas, así como el desarrollo de actividades docentes e investigativos, basado en principios éticos, profesionales y revolucionarios"
Procesos.	Los principales procesos son clínicos, generales (considerados también asistenciales) y centrales y en ellos recaen los principales servicios que presta el hospital. Al hacer una analogía con las clasificaciones estudiadas previamente, estos son operativos y de apoyo respectivamente.
Cartera de servicios.	Cirugía General, Urología, Gineco -Obstetricia, Medicina Interna, Otorrinolaringología, Sala (L), Gastroenterología, Cardiología, Higiene y epidemiología, Ortopedia, Anestesiología, Dermatología, Examen Médico Control de Salud, Angiología, Oftalmología, Estomatología, Terapia intensiva, Psiquiatría, Medicina Tradicional, Laboratorio Clínico, Laboratorio de Microbiología, Imagenología, Anatomía Patológica.
Transformación.	Se realiza a través de la curación, tratamiento, profilaxis, investigación y docencia.
Recursos del sistema.	Medicamentos, instrumental médico y no médico, material de oficina, alimentos, energía, presupuesto, equipamiento médico y no médico.
Resultados.	Pacientes curados, traslado o remisión hospitalaria, fallecimientos, otros tratamientos, residuos hospitalarios, diagnósticos.

El hospital atiende diariamente, como promedio, 67 pacientes en consulta externa y 53 en cuerpo de guardia. En su mayoría corresponden al sexo masculino. La edad cuya atención predomina es de 15 a 59 años, lo que se complementa con el análisis de las enfermedades más frecuentes; éstas son: Hipertensión Arterial (HTA), Sacrolombalgia, Enfermedades Respiratorias Agudas, Asma Bronquial y Diabetes Mellitus, lo que denota la gran implicación de servicios clínicos y médicos.

Una vez identificados los procesos presentes en la organización (Gestión económica, gobierno hospitalario, gestión de calidad, gestión del conocimiento, gestión del capital humano, gestión de la defensa, hospitalización, servicios externos, atención a urgencias y emergencias, apoyo asistencial, gestión del sistema informativo,

transporte, intendencia, abastecimiento médico, servicios generales, central de esterilización, ingeniería, construcción y alojamiento, y electromedicina), con el conocimiento de las actividades generales y su descripción, se procedió a su clasificación y ubicación dentro de la matriz de servicios.

Las clasificaciones que predominan son las de taller de servicio y fábrica de servicios; lo que significa que los procesos directamente implicados en la asistencia se caracterizan por alto grado de interacción, requieren de gran calificación del personal y operan de forma similar a sistemas productivos que atienden pedidos diversos.

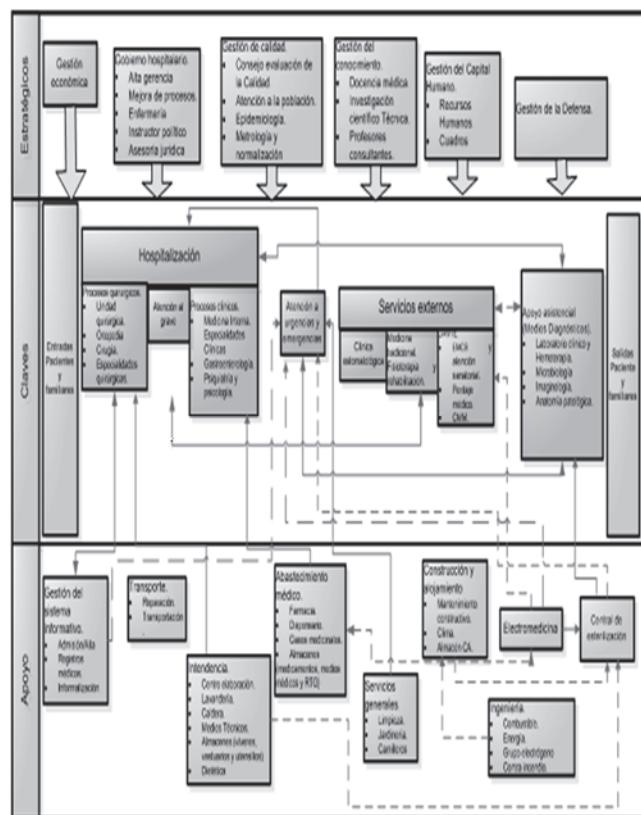


Figura 3. Mapa de procesos de un hospital clínico-quirúrgico. Fuente:[14]

El mapa de procesos revela las interrelaciones existentes entre estos procesos e ilustra en cuáles se decide el cumplimiento de la misión y la satisfacción de los pacientes y acompañantes (operativos), cuales definen las estrategias de la organización (estratégicos) y los que garantizan el funcionamiento de los operativos (de apoyo) (Figura 3).

Uno de los procesos seleccionados como prioritarios para la mejora, fue Hospitalización, compuesto por subprocesos clínicos, quirúrgicos y una unidad quirúrgica. Dentro de estos subprocesos clínicos se encuentra medicina interna, clasificado como proceso de alto grado de contacto (en el 60 % de sus actividades se establece contacto con el paciente), de relativamente baja intensidad de la mano de obra y alta adaptación, lo que lo define como taller de servicio, que en analogía a los procesos industriales, significa intermitencia en las actividades, pues su ejecución

responde a las complejidades clínicas de los pacientes. La Tabla 3 muestra las características fundamentales para su gestión.

Tabla 3.

Ficha del proceso medicina interna. Fuente:[14]

Responsable: Jefe del Servicio **Tipo de Proceso:** Clave Medicina Interna

Finalidad del Proceso: Estudiar y prevenir las enfermedades clínicas y quirúrgicas, urgentes y no urgentes de todo el organismo. Es el encargado de la definición diagnóstica y terapéutica de las afecciones que le corresponden como especialista y una vez concluido el estudio se encarga del seguimiento y/o revisión.

Objetivos: Prestar atención a los casos hospitalizados y realizar estudio para determinar enfermedades.

Proveedores: Abastecimiento General, Cocina-Comedor, Vestuario, Lavandería, Central de Esterilización, Laboratorio Fitofármacos, Electromedicina, Medios diagnósticos, Mantenimiento, Servicios Generales, Patología, Farmacia.

Clientes: Pacientes ingresados y acompañantes, pacientes de consulta externa, servicio de urgencias, Atención primaria de salud, Policlínicos de: Canímar, Guanábana, Playa, Reparto Reynol García, Reparto 2 de Diciembre y Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".

Entradas: pacientes, medicamentos, material e instrumental gastable y estéril, médicos, enfermeras, técnicos, historia clínica, hojas de cargo.

Salidas: Paciente tratado, paciente con tratamiento, Resumen de H. Clínica, Material desecharable o no estéril.

Grupos de interés: personal médico y paramédico, proveedores, estudiantes de medicina y técnicos medios, directivos.

Inicio del Proceso: examinar al paciente.

Fin del proceso: dar alta al paciente, trasladar al paciente a otro hospital u otro servicio.

Actividades incluidas: recibir al paciente por el médico, registrar el caso en la hoja de cargo, examinar al paciente, orientar tratamiento inicial, esperar por los resultados, dar orden de ingreso, cumplir las indicaciones médicas por la enfermera en sala, plasmar la evolución del caso en la historia clínica, esperar la recuperación del paciente, dar alta o remisión médica al paciente.

Procedimientos: protocolos clínico-terapéuticos

Indicadores: promedio de camas, mortalidad, correlación Ingresos/Egresos satisfacción de paciente, índice ocupacional, índice de ausentismo, promedio estadía índice de rotación, intervalo de sustitución, índice de reingreso, tasa de infecciones.

Variables de control: días camas, días pacientes, costos unitarios, ingresos, egresos, fallecidos

Registros: historias clínicas, registros de infecciones, registros de pacientes, registro de complementarios, libro de entrega de guardia, actas de discusiones de casos complejos, manual de indicadores.

Inspecciones: auditoría mensual y semestral, control de enfermería, círculo de calidad, vigilancia epidemiológica.

Procesos relacionados: Medios Diagnósticos, Abastecimiento de Material, Aseguramiento Técnico, Gestión del Conocimiento, Gestión de la Calidad, Consulta Externa, Urgencia y Emergencia.

Actividades relacionadas con otros procesos: recibir al paciente (urgente o electivo), indicar pruebas diagnósticas, orientar exámenes complementarios, confeccionar historia clínica para dar seguimiento por consulta externa.

De la aplicación de las herramientas de apoyo a la mejora se obtuvieron:

Análisis de la casuística hospitalaria. La agrupación del total de pacientes egresados del proceso medicina interna, permitió identificar cuatro grupos de pacientes con: enfermedades y trastornos del sistema circulatorio, enfermedades y trastornos del sistema nervioso, enfermedades y trastornos del sistema respiratorio y enfermedades y trastornos del sistema digestivo. Estos grupos responden a enfermedades que precisan de días de

estancia considerables, con sustancial consumo de recursos.

Evaluación de entradas y proveedores. Este subprocesso es un gran consumidor de modelaje, considerado el recurso con mayores deficiencias, pues su calidad no está al nivel deseado, las cantidades necesarias de acuerdo a la demanda del servicio, no logran completarse en cada período de aprovisionamiento, de igual manera su tiempo de entrega posee la más baja calificación pues el abastecimiento no está articulado con este criterio y con su impacto en la duración del tiempo asistencial.

Análisis de valor añadido. Se determinó que el 21% de las actividades, poseen un aporte de valor débil, el 44% medio y el 35% fuerte; de manera que la mayoría aporta valor (medio y fuerte). La contribución específica a cada criterio denota que se debe trabajar en la alineación del proceso y sus actividades a los objetivos estratégicos y a las características de calidad, pues una buena parte contribuyen en poca medida al cumplimiento de los mismos. El hecho de poseer un alto grado de contacto y, por ende, de existir un 60 % de actividades que constituyen momentos de verdad, indica la relevancia de potenciar el cumplimiento de las características de calidad como vía para mejorar la satisfacción de pacientes y acompañantes.

Determinación de los tiempos. De acuerdo a la variabilidad inherente a las actividades de este proceso (dado por la diversidad de pacientes a atender principalmente), se calculó el tiempo esperado a partir de la estimación de tres tiempos: probable, optimista y pesimista, con el auxilio de diagramas As Is, mapas IDEF3, y entrevistas a los ejecutantes de cada actividad. Junto al análisis de valor se identificaron aquellas actividades que más inciden en la duración del ciclo, tal es el caso de confección de la historia clínica, la cual depende de su extracción de registros o admisión y de plasmar la información con los resultados del examen físico, la entrevista al paciente y la entrega de resultados de los complementarios.

Como resultado de esta fase se proponen mejoras encaminadas a resolver aspectos relacionados con la organización y diseño de los procesos y su capacidad operativa, el incremento del aporte de valor, la gestión de los suministros basada en su impacto en la asistencia médica, y la reducción de los tiempos.

Posteriormente, en la confección del índice integral (IDHosp), formulado en la expresión 1, se obtuvieron seis indicadores considerados de los más utilizados en la gestión hospitalaria: estadía hospitalaria, índice ocupacional, tasa de infecciones intrahospitalarias, índice de positividad de los medios diagnósticos, índice de operaciones suspendidas y mortalidad neta.

$$IDhosp = \frac{\sum_{j=1}^q P_j * V_j}{5 \sum_1^q V_j} \quad (1)$$

Donde:

IDhosp: Índice integral de desempeño de los procesos

hospitalarios.

P_j: puntuación del indicador j-esimo.

V_j: peso relativo del indicador j-esimo.

Q: cantidad de indicadores a integrarse al índice.

El tipo de clasificación de las instituciones estudiadas, la complejidad clínica de pacientes que atiende y el comportamiento de los medidores seleccionados, permitió normalizar la evaluación de los mismos, elemento importante para estandarizar la medición, análisis y detección de reservas de mejora en los procesos. La Tabla 4 muestra la normalización de indicadores para el hospital clínico quirúrgico estudiado.

Tabla 4.
Normalización de indicadores. Fuente: [14]

Indicadores	Propósito	Rango de evaluación
Estadía hospitalaria (días).	<9	x<7.8/5 7.8<=x<8.4/4 8.4<=x<9/3 9<=x<9.6/2 x>=9.6/1
Índice ocupacional (%).	85	76<=x<85/5 67<=x<76/4 58<=x<67/3 49<=x<58/2 x<49/1
Tasa de infección intrahospitalaria (%).	<3	x<1.56/5 1.56<=x<2.28/4 2.28<=x<3/3 3<=x<3.72/2 x>=3.72/1
Mortalidad (%).	2-2.5	x<1/5 1<=x<1.5/4 1.5<=x<2/3 2<=x<2.5/2 2.5<=x<3/1 x>=3/0
Índice de operaciones suspendidas (%).	<0.5	x<0.42/5 0.42<=x<0.43/4 0.43<=x<0.44/3 0.44<=x<0.5/2 x>=0.5/1
Positividad de los medios diagnósticos (%).	41.71-42.77	x>53/5 43<=x<53/4 33<=x<43/3 23<=x<33/2 x<23/1

En el caso concreto el IDHosp (60%) indicó dificultades en la utilización del recurso cama, en la organización y en el diseño de los procesos asistenciales y de apoyo, implicados en la atención a los cuatro grupos fundamentales de pacientes. Los indicadores que indujeron esta situación fueron la estadía hospitalaria, el índice ocupacional, y la tasa de infección intrahospitalaria.

5. Conclusiones

Caracterizar y clasificar los sistemas productivos y sus procesos resulta un paso esencial para mejorar sus resultados; este es un aspecto en el que coinciden de una

manera u otra, diversos autores que se dedican a la formalización de procedimientos o metodologías para la gestión y mejora de procesos en organizaciones de variada naturaleza.

La literatura recoge un universo amplio de herramientas para la caracterización y clasificación, que apuntan hacia aquellos aspectos en los que la organización debe centrar la atención, dígase la gestión del componente humano, la intensidad de los mecanismos de control, el diseño de estrategias de diferenciación y de servicio al cliente, la gestión de los costos y la tecnología, entre otras decisiones gerenciales.

Las organizaciones hospitalarias no escapan a esta necesidad. La combinación de los criterios de clasificación estudiados y otros utilizados en el propio sector de la salud, son un ingrediente de mucha ayuda en la mejora de los resultados, cuando se articulan con herramientas para el análisis, la medición y la mejora de procesos.

Referencias

- [1]. Medina León, A.[et al.], Relevancia de la Gestión por Procesos en la Planificación Estratégica y la Mejora Continua. Ecuador. Revista EÍDOS, 2010, 1, 2, 101-130, 1390-499 X.
- [2]. Negrín Sosa, E., El mejoramiento de la Administración de Operaciones en empresas de servicios hoteleros, [Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas], Matanzas, Cuba, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echevarría", Departamento de Ingeniería Industrial, 2003. 100 p.
- [3]. Claveranne, J.P. and Pascal, C., Repenser les processus à l'hôpital. Une méthode au service de la performance, Paris, Medica Editions, 2004, pp. 10-250.
- [4]. Nogueira-Rivera, D.[et al.], Fundamentos del control de gestión empresarial, Ciudad de La Habana, Editorial Pueblo y Educación, 2004, 959-13-1192-3, pp. 15-20.
- [5]. Medina-León, A.[et al.], Clasificación y caracterización de sistemas productivos, Matanzas, Cuba, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", 2001, pp.
- [6]. Companys Pascual, R. and Corominas Subias, A., Organización de la Producción I. Diseño de Sistemas Productivos, Barcelona, Ediciones UPC, 1993, 8476533632, pp.
- [7]. ISO 9000. Sistema de Gestión de la Calidad. Fundamentos y Vocabulario. Suiza, ISO, 2008. 30
- [8]. Amozarain, M., La gestión por procesos, [en línea], 1999, [consulta: 2 de Abril de 2004], Disponible en: <http://personales.jet.es/amozaarain/Gestion_procesos.htm>
- [9]. De Sordi, J.O., Gestão por processos: Uma abordagem da moderna administração, São Paulo, Saraiva, 2005, pp.
- [10]. Brull Alabart, E., «El proceso A112: Implantar la Gestión de procesos. Cuadernos de Gestión», [en línea], 2007, [consulta: 17 de Abril de 2009], Disponible en: <<http://www.brullalabart.com>>
- [11]. Fernández-Sánchez, E., Dirección de la producción I. Fundamentos Estratégicos, Editorial Civitas, S.A., 1993, 84-470-0263-2, pp. 30-45.
- [12]. Schroeder, R.G., Administración de operaciones. Toma de decisiones en la función de operaciones, I, México DF, McGraw Hill, 1992, pp. 142-164.
- [13]. Serrano-Gómez, L. and Ortiz Pimiento, N.R., Caracterización del Nivel de desempeño en la Gestión por Procesos en IPS- Clínicas y Hospitales de Bucaramanga y Amb, Dyna [en línea], 2012, 79, 175, 15-23 [consulta: 22 de Febrero de 2014], 0012-7353 Disponible en: <<http://www.redalyc.org/pdf/496/49624958003.pdf>>
- [14]. Hernández-Nariño, A., Contribución a la gestión y mejora de procesos en instalaciones hospitalarias del territorio matancero, [Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas], Matanzas, Cuba, Universidad de Matanzas " Camilo Cienfuegos". Facultad Industrial-Economía, Departamento de Ingeniería Industrial, 2010. 100 p.
- [15]. Villalón-Barbero, E., GRD's Sistema de Evaluación para la Gestión Clínica-Hospitalaria, [en línea], 2008, [consulta: 12 de Febrero de 2009], Disponible en: <http://samh.cl/samh2008/presentaciones/miercoles/Presentacion_trabajos_liberes/GRD_utilidad_para_la_Gestion_Clinica>
- [16] Saaty, T., The Analytic Hierarchy Process, New York, McGraw Hill, 1981, pp. 40-45.
- [17]. Trischler, W.E., Mejora del valor añadido en los procesos, Barcelona, Ediciones Gestión 2000, S.A. , 1998, 83-8088-286-7, pp. 21-107.
- [18]. Biazzo, S. and Bernardi, G., Process management practices and quality systems standards. Risk and opportunities of the new ISO 9001 certification. Business Process Management Journal, 2003, 9, 2, 149-169,
- [19]. Quiros-Moratos, T. and Cuesta- Peredo, D., Sistemas de Información en las instituciones sanitarias. Una visión operativa, [en línea], 2005, [consulta: 23 de Abril de 2006], Disponible en: <<http://www.informedica.org.ar/pdf/sadio/2/chequem-esp.PDF>>
- [20] Hernández-Nariño, A.[et al.], Influencia de la actividad logística en la gestión de los procesos hospitalarios. Revista Logística aplicada, 2009, 13, 1026-0749.
- [21]. Hodson, W.K., Maynard: Manual del Ingeniero Industrial I, 4a Edición, México, Mc Graw Hill , 2004, pp. 50-55.
- [22]. Segura-Sardinas, O.[et al.], Construcción de un indicador sintético para medir diferencias en los servicios hospitalarios, [en línea], 2004, [consulta: 12 de Febrero de 2005], Disponible en: <<http://www.cocmed.sld.cu/no81/n81ori2.htm>>
- [23]. Fonseca-Hernández, M.[et al.], Comportamiento de indicadores hospitalarios durante el decenio 1990-1999. Hospital Pediátrico Universitario "Paquito González Cueto" Revista Cubana de Pediatría, 2001, Vol. 73, No. 3, 158-164,
- [24]. Frías-Jiménez, R.[et al.], Herramientas de apoyo a la solución de problemas no estructurados en empresas turísticas (HASPNET), Matanzas, Cuba, Universidad de Matanzas, 2008, pp. 100-105.

Proactive local search based on FDC

Búsqueda local proactiva basada en FDC

Mailyn Moreno-Espino ^a & Alejandro Rosete-Suárez ^b

^a MSc. Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba, my@ceis.cujae.edu.cu

^b Dr., Instituto Politécnico “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba, rosete@ceis.cujae.edu.cu

Received: February 28th, 2013. Received in revised form: October 17th, 2013. Accepted: November 27th, 2013.

Abstract

This paper introduces a proactive version of Hill Climbing (or Local Search). It is based on the identification of the best neighborhood through the repeated application of mutations and the evaluation of these neighborhood by using FDC (Fitness Distance Correlation). The best neighborhood is used during a time window, and then the analysis is repeated. An experimental study was conducted in 28 functions on binary strings. The proposed algorithm achieves good performance compared to other metaheuristics (Evolutionary Algorithms, Great Deluge Algorithm, Threshold Accepting, and RRT).

Keywords: Metaheuristics, Agents, Proactive Behavior, Variable Neighborhood Search, FDC.

Resumen

En este trabajo se presenta ECE-MP-FDC, una variante proactiva del algoritmo de búsqueda Escalador de Colinas (o Búsqueda Local). El algoritmo identifica la mejor estructura de vecindad a través de la aplicación repetida del operador de mutación, y evalúa la conveniencia de cada una usando la métrica FDC (Fitness Distance Correlation). La mejor estructura de vecindad se usa durante una ventana de tiempo, luego de la cual se repite el análisis. Se presenta un estudio experimental en 28 funciones sobre cadenas binarias de 100 bits con distintos grados de dificultad. La variante proactiva del Escalador de Colinas basada en FDC logra resultados similares o mejores que otras metaheurísticas (Algoritmos Evolutivos, Algoritmo del Gran Diluvio, Aceptación por Umbral, RRT).

Palabras Clave: Metaheurísticas, Agentes, Proactividad, Búsqueda con Vecindad Variable, FDC.

1. Introducción

Las metaheurísticas [1] son métodos de optimización muy populares, debido su flexibilidad para resolver problemas complejos, con muchas aplicaciones exitosas en distintas ramas de la ciencia y la ingeniería; como el diseño de estructuras y motores, la minería de datos y la planificación de tareas [2, 3]. Algunas metaheurísticas conocidas son los Escaladores de Colinas (Búsqueda Local), los Algoritmos Genéticos y el Recocido Simulado, etc. [1, 4].

Es un problema abierto saber cuándo conviene usar cada metaheurística. Incluso, el Teorema No Free Lunch (NFL) establece que todas las metaheurísticas se comportan igual en promedio [5], y si una metaheurística es mejor que otra para unos problemas, debe esperarse que existan otros donde ocurra lo contrario. Para tratar de comprender cómo funcionan las metaheurísticas se han definido varias métricas para caracterizar los problemas [6], siendo FDC (Fitness Distance Correlation) [7] una de las más conocidas.

Este trabajo presenta ECE-MP-FDC, una variante proactiva de la Búsqueda Local inspirada en el paradigma de los agentes inteligentes [8], que evalúa diferentes variantes de vecindad utilizando FDC para guiar mejor la búsqueda.

El trabajo comienza (sección 2) con los conceptos fundamentales de las metaheurísticas y los agentes, relevantes para esta propuesta. La sección 3 introduce el algoritmo ECE-MP-FDC. La sección 4 muestra un estudio experimental en 28 funciones sobre cadenas binarias de 100 bits que muestra que ECE-MP-FDC tiene un comportamiento similar o superior que muchas otras metaheurísticas en estos problemas.

2. Metaheurísticas y agentes

2.1. Metaheurísticas

Las metaheurísticas son bien conocidas como métodos aproximados de optimización de funciones en dominios o espacios de soluciones grandes, que no garantizan encontrar el óptimo, pero que usualmente obtienen soluciones buenas en un tiempo razonable [1]. En los años recientes han surgido muchas nuevas variantes y combinaciones de metaheurísticas [1, 4].

La característica esencial de las metaheurísticas es no restringir el problema a tratar. Solo necesitan que se defina una forma de evaluar las soluciones, y unos operadores para

construir una solución inicial y para transformar unas soluciones en otras nuevas.

Hay dos grandes ramas en que pueden dividirse las metaheurísticas: las P-Metaheurísticas (basadas en una población de soluciones) y las S-Metaheurísticas (basadas en un punto o una sola solución) [1]. Todas las S-Metaheurísticas se basan en mantener una solución como referencia, a partir de la cual se generan nuevas soluciones aplicando un cambio (operador de mutación [1]). Al final, se devuelve la mejor solución encontrada durante la ejecución completa de la metaheurística. Las S-Metaheurísticas incluyen a la búsqueda local [1], el recocido simulado, la búsqueda con vecindad variable (VNS: Variable Neighborhood Search), etc [1, 4]. Todas se derivan de la Búsqueda Local según Talbi ([1], p. 24).

La Búsqueda Local cambia su referencia sólo cuando se genera una nueva solución que no sea peor que la referencia. Su deficiencia fundamental es que queda atrapada en un óptimo local si la referencia es mejor que las soluciones vecinas (generables por mutación). Para resolver esto, otras S-Metaheurísticas aceptan soluciones peores que la referencia. Algunos ejemplos son: aceptar soluciones con una diferencia respeto a la referencia que no excede cierto umbral (aceptación por umbral), aceptar soluciones con una diferencia respeto a la mejor encontrada que no excede cierto umbral (RRT), aceptar soluciones que estén por encima de cierto parámetro (algoritmo del gran diluvio) [1].

Es importante comentar que la existencia de óptimos locales para la Búsqueda Local depende de las vecindades que definen los operadores [7]. La figura 1 muestra dos estructuras de vecindad (paisajes o “landscapes” [1, 7]) diferentes en el mismo espacio de búsqueda (cadenas 3 bits).

La figura 1a) muestra la estructura de vecindad definida por el operador de cambiar un bit, mientras que la figura 1b) muestra la estructura usando el operador de cambiar dos bits. En la figura 1b) la solución 110 con valor 6 es un óptimo local, pero no lo es en la figura 1a).

Una alternativa diferente a la aceptación de soluciones peores para poder salir de óptimos locales, es modificar la estructura del espacio de búsqueda cambiando las vecindades, como lo hacen los algoritmos de VNS [1]. En estas metaheurísticas, se proveen varios operadores de vecindad, y se establece un plan para usarlas.

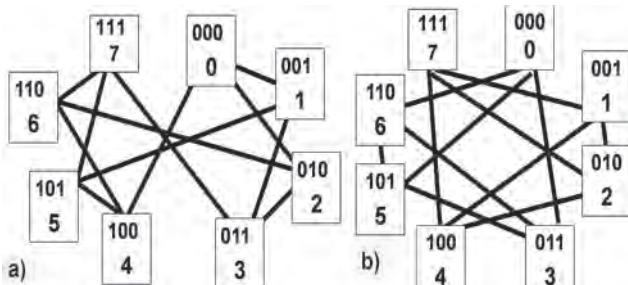


Figura 1. Dos estructuras de vecindad en un espacio

2.2. Cambios en las vecindades

Variando los operadores se cambian las vecindades y así el algoritmo puede salir de un óptimo local (según una vecindad) usando otra.

Con suficientes operadores, se logran buenos resultados, ya que es difícil que una solución sea la mejor en muchas estructuras de vecindades, sin ser el óptimo global.

Una variante equivalente a VNS, es la de cambiar la representación de las soluciones. Como el cambio de representación cambia las soluciones que son vecinas, el efecto es similar. Los algoritmos de Búsqueda Mórfica [9] y los Escaladores de Colinas Dinámicos [10] son ejemplos de esto. En todos los casos, la persona que ejecuta la metaheurística define un plan de cómo variar las vecindades.

2.3. Métricas de comportamiento

Desde hace muchos años, hay investigadores tratando de encontrar métricas que sirvan para entender y predecir el comportamiento de las metaheurísticas (por ejemplo [6, 7, 11]).

A la luz del Teorema NFL [5] esto es aún más importante, porque para cada metaheurística parece existir un grupo de problemas en los cuales funciona bien. De todas las métricas, la más conocida es FDC, que mide la correlación entre la distancia al óptimo de cada solución (D) y su evaluación (fitness, F). La definición de FDC según [7] se muestra en (1), donde CFD es la covarianza de F y D, mientras que SF y SD son las desviaciones estándares de F y D.

$$FDC = \frac{C_{FD}}{S_F * S_D} \quad (1)$$

Para obtener esta métrica en un problema, se deben evaluar todas las soluciones y calcular para cada una de ellas la distancia respecto al óptimo. Cuando la correlación es cercana a -1, significa que las soluciones cercanas al óptimo, tiene mayor evaluación. Es importante notar que la métrica FDC se usa para entender la dificultad de un problema del cual se conoce el espacio de búsqueda y el óptimo. No se conoce que se haya intentado usar FDC para seleccionar una estructura de vecindad que sea más conveniente.

2.4. El paradigma de agentes

Los agentes inteligentes constituyen un paradigma que ha crecido mucho en los últimos años, considerándose como un salto evolutivo en la programación y la ingeniería de software [8].

Un agente es un programa que está en un entorno, del cual recibe información y sobre el que puede actuar. El paradigma de agentes promueve el desarrollo de software con características novedosas como la autonomía, la proactividad y la habilidad social.

De estas características, la proactividad es una de las menos desarrolladas. Un agente es proactivo cuando actúa persiguiendo objetivos o metas, sin esperar una orden. Para lograrlo, el programa debe tener metas, y planes que les doten de la capacidad para acercarse al logro de las metas.

Se han desarrollado varios modelos de metaheurísticas basados en el paradigma de agentes, por ejemplo [12-16].

La propiedad de los agentes más estudiada es la habilidad social para intercambiar información y orientar la búsqueda.

No se han encontrado trabajos en que se le asigne a la metaheurística una meta a alcanzar y se le dote de planes para que sea proactiva. Particularmente, la decisión proactiva de cuál estructura de vecindad debe explorarse no se ha modelado desde la visión de agentes.

Debe aclararse que en los trabajos sobre el ajuste dinámico de parámetros en metaheurísticas (por ejemplo [17]) no se han definido explícitamente las metas, ni se ha visto la evolución como un ambiente a ser observado, sobre el que las metaheurísticas actúan a través de sus parámetros, para lograr las metas. También se han usado metaheurísticas para optimizar un sistema de agentes (como en [18], lo cual es un interés recíproco al de este trabajo).

3. Búsqueda proactiva con FDC

3.1. Estructura de vecindad

Entendiendo la vecindad de una solución como el conjunto de soluciones que se pueden obtener a partir de ella aplicando un operador, se puede entender como estructura de vecindad un grafo donde cada nodo es una solución y cada arco entre ellas implica la existencia de un operador que permite transitar de una a otra [7, 11]. La figura 1 mostró como la estructura de la vecindad define los óptimos locales. En consecuencia, también cambia el comportamiento de la Búsqueda Local.

Particularmente, en la figura 1 se vio el cambio en la estructura de la vecindad cuando en lugar de aplicar el operador una vez, se asumen como vecinas a aquellas relacionadas por la aplicación repetida del operador (en ese caso dos veces).

Esto puede extrapolarse a un número mayor, siendo las soluciones vecinas si están separadas por la aplicación del operador definido N veces.

Es importante aclarar que la aplicación repetida del operador solo implica un cambio en la estructura de la vecindad y no mayor cantidad de evaluaciones de la función objetivo. La aplicación repetida del operador, produce vecindades nuevas, sin necesidad de obligar al usuario a definir diferentes operadores.

No es simple ajustar el valor de N por el usuario. Más aún, este parámetro no es una meta en sí mismo, sino que es un recurso del que se puede dotar a la metaheurística para explorar el espacio de búsqueda de una manera más eficiente. Esta exploración más eficiente sí puede ser una

meta a pasar a la metaheurística. Para lograr satisfacerla, la metaheurística dispone de recursos (parámetros, historia de soluciones generadas, etc) para intentar lograrlas.

La historia de la evolución es un ambiente en que la metaheurística actúa, y en el que trata de lograr encontrar la solución con el mejor valor posible en el tiempo del que dispone. En base a eso, puede ajustar proactivamente la forma de explorar para hacer la búsqueda más eficiente.

La historia de la evolución brinda información sobre las soluciones anteriormente generadas. Como las nuevas soluciones se obtienen por modificaciones (mutaciones) esto brinda información sobre la estructura de las vecindades. Con estas soluciones puede tenerse una idea aproximada sobre cómo es la zona más cercana del espacio de búsqueda. Esta información, puede servir para estimar lo que sucederá en un futuro cercano.

3.2. Evaluación de vecindades con FDC

El ambiente (historia) puede servir para analizar cuál estructura de vecindad es más conveniente, y la métrica FDC es un buen estimador de la dificultad de esta para un escalador de colinas.

La definición original de FDC exige un conocimiento total del espacio de búsqueda lo cual no es posible siempre. Sin embargo, puede obtenerse una aproximación de FDC usando una muestra del espacio de búsqueda, y se puede tomar la mejor solución de esa muestra como un pseudo-óptimo a los efectos del cálculo de FDC.

En el caso del escalador de colinas, cada nueva solución es generada a partir de la mejor solución (o de la más reciente de ellas si hay varias mejores). De esta manera, con un análisis retrospectivo de las últimas soluciones generadas, se puede obtener una serie de valores de distancia al pseudo-óptimo según el orden en que fueron generadas. Como también se cuenta con el valor de evaluación de estas soluciones se puede calcular el valor de FDC.

La Tabla 1 muestra un ejemplo de una secuencia de soluciones generadas por un escalador de colinas. La columna E muestra la evaluación obtenida por cada solución. Como el valor más alto es 30 se usa como pseudo-óptimo para el cálculo de FDC. La columna Cambio muestra una "x" cuando el escalador de colinas modificó la referencia. Así, las soluciones generadas sin cambio de referencia están a distancia 1 de ella.

La columna N=1 muestra la distancia en cantidad de veces que hay que aplicar el operador que se esté usando entre cada solución y el pseudo-óptimo. La soluciones 25 y 12 fueron generadas a partir de 30, y están a distancia 1. La solución 28 también está a distancia 1 de 30 porque 30 se generó a partir de 28. Transitivamente, como 28 se generó a partir de 26, entonces 26 está a distancia 1 de 28, y a distancia 2 de 30. De igual modo, 14 está a distancia 1 de 26, a 2 de 28 y a 3 de 30. Como 10, 13 y 11 están a distancia 1 de 14, están a distancia 4 de 30. Con estos 10 pares de datos se puede calcular el valor de FDC (fila FDC).

Con esta misma muestra, se puede calcular FDC para el operador doble (columna N=2, aplicación dos veces del operador básico). Las soluciones que están a una distancia par del óptimo en la columna N=1 pueden alcanzar el óptimo en la mitad de los pasos. Las que están a distancia impar no pueden llegar al óptimo, y no se sabe la distancia para ellos (indicado con “-” en la Tabla 1). Con esta serie de 5 pares de datos se puede calcular igualmente el valor de FDC para la estructura de vecindad con N=2. De manera análoga puede obtenerse para N=3.

Tabla 1.
Secuencia de soluciones

E	Cambio	Distancia al pseudo-óptimo 30		
		N=1	N=2	N=3
10	x	4	2	-
14	x	3	-	1
13		4	2	-
11		4	2	-
26	x	2	1	-
23		3	-	1
28	x	1	-	-
30	x	0	0	0
25		1	-	-
12		1	-	-
FDC		-0.73	-0.96	-0.83

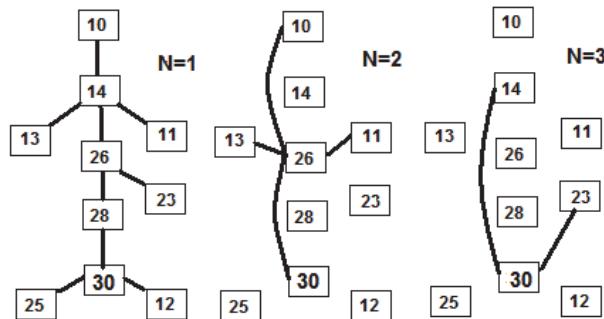


Figura 2. Vecindades respecto al pseudo-óptimo

Estas estructuras de vecindad para distintos valores de N se muestran en la figura 2. Según N crece aparecen menos datos para estimar FDC para la estructura de vecindad definida para ese N. Por ejemplo, como no hay ningún valor de 5 en la columna N=1, no es posible estimarlo. La Tabla 1 mostró un ejemplo de soluciones generadas en una ventana de tiempo TW pequeña (TW=10 soluciones), lo cual hace imposible estimar FDC para N=5 o más. Si la ventana de tiempo fuera mayor, entonces sí podría hacerse.

3.3. Selección proactiva de la vecindad

Analizando los valores de FDC en la Tabla 1 y considerando que el Escalador de Colinas funciona bien cuando FDC está cerca de -1, puede verse que N=2 es el que proporciona una estructura de vecindad más favorable con $FDC_{N=2} = -0.96$. En base a esto, durante una próxima ventana de tiempo, la soluciones deberían generarse aplicando dos

veces el operador básico de mutación (N=2), y por tanto explotando la estructura de vecindad que parece más conveniente. En cada paso se escoge el valor de N que implica un mejor FDC.

Esta decisión muestra cómo puede delegarse en la metaheurística la meta de explorar la vecindad de una manera más eficiente, para lo cual cuenta con los resultados de las últimas soluciones generadas que funcionan como un ambiente que puede ser analizado y utilizado proactivamente para lograr mejores resultados.

Es importante también analizar lo que ocurre cuando se generan soluciones con N=2. Siguiendo un razonamiento similar al que se hizo en la sección anterior respecto a la Tabla 1, ahora se pueden estimar los valores de FDC para N=2, y sus múltiplos. Por ejemplo, después de una ventana de tiempo usando N=2, se tiene un nuevo pseudo-óptimo. Luego, las soluciones que sirvieron para generar ese pseudo-óptimo y las que se generaron directamente a partir de él estarán a distancia 1 con N=2. Con esos valores a distancia 1 usando N=2 se puede recalculiar $FDC_{N=2}$. El análisis que se hizo para distancia 2 en la Tabla 1 ahora se estaría refiriendo a N=4, y así sucesivamente.

Al pasar una ventana de tiempo, se puede recalcular FDC para diferentes valores de N, aunque no es posible hacerlo para todos en cada ventana de tiempo. Para mantener disponibles el máximo de estructuras de vecindades en cada momento, se mantiene una lista global de valores de FDC para cada N. Cuando pasa una ventana de tiempo TW, los nuevos valores de FDC calculados actualizan los anteriores, promediando el valor anterior y el nuevo calculado, y con esto se actualiza la lista de valores de FDC. Luego de esta actualización, se utiliza como operador de vecindad la aplicación de N repeticiones del operador de mutación básica.

3.4. Idea general del algoritmo

El algoritmo ECE-MP-FDC (Escalador de Colinas, con Mutación Proactiva basado en FDC) se describe a continuación.

```

Algoritmo ECE-MP-FDC
N = 1
i = 0
fdc = Ø
ref = ConstruirSolución()
REPETIR
    sa = ref
    DESDE j = 1 HASTA N
        sa= Mutación(sa)
    SI Evaluar(sa)>= Evaluar(ref)
        ENTONCES ref = sa
        hist[i] = Evaluar(sa)
    i = i+1
    SI (i MOD TW = 0)
        ENTONCES
            fdc1 = CalculaFDC(hist)
            fdc = Actualiza(fdc,fdc1)
            N = MejorFDC(fdc)
            FIN SI
    HASTA i = max_iteraciones

```

En el pseudocódigo anterior, los métodos Evaluar, ConstruirSolución y Mutación son métodos dependientes del problema que se encargan de evaluar, construir una solución inicial y de realizarle un cambio, respectivamente. El método CalculaFDC devuelve un conjunto de valores de FDC para distintos valores de N considerando solo las últimas TW soluciones generadas. Por su parte, Actualiza promedia los valores de FDC de dos conjuntos de estos valores. MejorFDC devuelve el valor de N correspondiente con el valor de FDC más cercano a -1. Todos estos métodos operan según la descripción dada en las secciones anteriores. El operador “mod” obtiene el resto de la división. En este caso se usa para saber si ha pasado la ventana de tiempo TW y hay que calcular los valores de FDC para actualizar proactivamente N.

La variable “hist” almacena la lista de soluciones generadas. La variable i controla la cantidad de soluciones generadas, y max_iteraciones es un parámetro que detiene la búsqueda, con una interpretación similar a las demás metaheurísticas [1]. La variable “ref” almacena la mejor solución generada hasta ese momento, mientras que “sa” contiene la solución generada en cada iteración. La variable N, es la que permite modificar la estructura de vecindad explorada en cada ventana de tiempo TW.

El paso de mayor complejidad computacional es el método CalculaFDC con complejidad $\Theta(TW)$, para cada valor de N, ya que al calcularse FDC según (1), se recorren los elementos de la ventana para calcular la covarianza y las desviaciones.

4. Resultados experimentales

4.1. Funciones de bloques

Debido a la gran cantidad de problemas posibles, es necesario acotar siempre el marco experimental a un grupo de problemas que permita validar el interés de la propuesta. En este trabajo, se presentan los resultados para 28 funciones basadas en bloques sobre cadenas binarias, que han sido ampliamente estudiadas [7, 12, 19, 20].

En las funciones basadas en bloques, se toman un grupo de bits consecutivos (bloque), se cuenta la cantidad de “1” presentes en el bloque, y a esta cantidad se le aplican distintas funciones base con distintos grados de dificultad, sumando luego el valor obtenido para cada bloque.

En la figura 3 se muestran algunos ejemplos de funciones base (de tamaño 4) que dada la cantidad de bits correctos (con valor 1) devuelven distintos valores. Es usual trabajar con problemas definidos sobre cadenas binarias de 100 bits, con 25 bloques de longitud 4 cada uno, y con un solo óptimo ubicado en la solución donde todos los bits son iguales a 1, con evaluación de 100. El espacio de soluciones es grande ($2^{100} = 1,27 * 10^{30}$) y al haber un solo óptimo global conocido (los 100 bits en 1) se puede estudiar el comportamiento de los algoritmos.

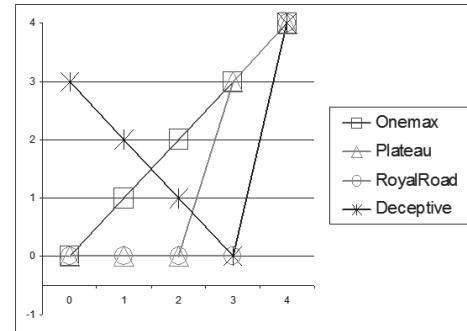


Figura3. Algunas funciones base

Las funciones base más usadas aparecen en la figura 3. Onemax, Plateau y Royal Road tienen un nivel de dificultad creciente, mientras Deceptive es difícil ya que las soluciones más cercanas en bits al óptimo tienen un peor valor de la función objetivo, y esto lleva al escalador de colinas a la solución con ningún bit en 1 que está muy lejana del óptimo global. Estas funciones base tienen algunos aspectos en común como es que solo recibe el máximo valor de 4 el bloque 1111 con los 4 bits correctos, mientras que para el resto de las cantidades posibles de bits correctos (0, 1, 2, o 3) la función vale 0, 1, 2 o 3.

Como hay 4 valores posibles para cada una de las 4 cantidades posibles de bits correctos existen 256=44 funciones base con estas características. Con estas características se generaron 24 funciones aleatoriamente, dentro de las 256 posibles, que junto con las 4 de la figura 3 conforman el marco experimental de 28 funciones de la Tabla 2. Cada función Fwxyz es la función base que asigna el valor “w” cuando hay 0 bits correctos, “x” cuando hay 1, “y” cuando hay 2, y “z” cuando hay 3 bits correctos. F0123, F0003, F0000 y F3210 se corresponden, respectivamente, con las funciones Onemax, Plateau, Royalroad y Deceptive.

La Tabla 3 resume la dificultad de las 28 funciones, mostrando la media aritmética (MA), la mediana (ME), el mínimo (MIN), el máximo (MAX) y la desviación estándar (DESV) de varias métricas medidas en cada función base.

La métrica BFDC calcula el valor de la correlación entre la distancia en bits respecto al óptimo del bloque (1111) y la evaluación que recibe. MAB mide el promedio de los valores asignados por la función a cada cantidad de bits correctos. MABP es similar a MAB excepto en que es un promedio ponderado, teniendo en cuenta la cantidad de cadenas de 4 bits que tienen 0, 1, 2 o 3 bits iguales a 1111, que son 1, 4, 6 y 4 respectivamente. Las columnas 0-1, 0-2, 0-3, 1-2, 1-3 y 2-3, muestran la diferencia entre los valores asignados por la función a las cadenas con esas cantidades de bits. Por ejemplo, en F3210 (Deceptive) la diferencia entre el valor que le da la función a las soluciones con 1 bit correcto (2) respecto al valor para 3 bits correctos (0) es $2 - 0 = 2$.

La Tabla 3 muestra que las funciones escogidas tienen una variedad representativa, con distintos grados de dificultad. Por ejemplo, BFDC para F3210 (Deceptive) vale 1 y debe ser más difícil que F0123 (Onemax) en que BFDC vale -1.

Tabla 2.

Funciones base usadas

Funciones de bloque					
F0000	F0120	F1002	F1221	F2220	F3012
F0001	F0122	F1012	F2000	F3000	F3102
F0003	F0123	F1111	F2001	F3001	F3210
F0022	F0131	F1112	F2012	F3002	
F0111	F1001	F1120	F2200	F3010	

Tabla 3.

Métricas en las funciones base

	MA	ME	MIN	MAX	DESV
0-1	0.75	0	-1	3	1.43
0-2	0.39	0	-3	3	1.75
0-3	0.21	0	-3	3	1.71
1-2	-0.36	0	-2	1	0.73
1-3	-0.54	-1	-3	2	1.37
2-3	-0.18	0	-3	2	1.39
BFDC	-0.03	0	-1	1	0.65
MAB	1.02	1	0	1.50	0.41
MABP	0.94	1	0	1.87	0.51

4.2. Metaheurísticas a comparar

En los experimentos se compara el algoritmo propuesto con cuatro S-Metaheurísticas [1] (RRT, aceptación por umbral, algoritmo del gran diluvio y un escalador de colinas), y cuatro P-Metaheurísticas [1] (algoritmos evolutivos).

En todas se construye una solución inicial asignando a cada uno de los 100 bits de la cadena un valor binario aleatorio de 0 o 1.

Como operador de mutación se utiliza el cambio de un bit, escogido aleatoriamente entre los 100 posibles. En los Algoritmos Genéticos (AG) y las Estrategias Evolutivas (EE) se usó el reemplazo generacional [1], seleccionando la nueva generación entre los M mejores entre las P nuevas soluciones (hijos) y las M anteriores (padres). En los AG se usa el cruzamiento uniforme [1].

Los otros parámetros de cada una de las metaheurísticas y el identificador usado para nombrar a cada una aparecen en la Tabla 4.

Estos parámetros fueron fijados partiendo de las recomendaciones usuales [1, 17] y ajustados luego, usándose los parámetros que mejores resultados dieron.

En ECE-MP-FDC se usará una ventana de tiempo TW=200. Se experimentó previamente con valores de TW de 50, 100, 200 y 300. El valor de 200 fue el que obtuvo mayor promedio, aunque las diferencias no fueron significativas según la prueba de Kruskal-Wallis en cada función con 30 repeticiones, ni en la prueba de Friedman con los promedios en cada función. Se comienza usando el operador de mutación básico, es decir N=1 (cambiar un bit).

Tabla 4

Configuración de metaheurísticas

Identificador: Configuración de parámetros
ECE: Escalador de Colinas Estocástico, aceptando soluciones iguales o mejores
RRT: Record-to-Record-Travel con desviación D=5
AGD: Algoritmo del Gran Diluvio, nivel del agua inicial WL=0, y lluvia R=0.01.
TA: Algoritmo de Aceptación por Umbral con umbral T=2.
AG-20-100: AG, P=100, M= 20, probabilidad de mutación 1 y probabilidad de cruzamiento 1.
AG-50-100: AG, P=100, M=50, probabilidad de mutación 1 y probabilidad de cruzamiento 1.
EE-1-5: EE, P= 5 y M=1
EE-20-100: EE, P=100 y M=20.

4.3. Resultados

Como el grupo de 28 funciones base no había sido cubierto en trabajos previos, se realizaron todos los experimentos. En cada uno de los 28 problemas, las metaheurísticas se ejecutaron 30 veces hasta alcanzar 10000 evaluaciones. Se registró la mejor solución encontrada en cada una de las ejecuciones, y luego se calculó la media aritmética por cada función y metaheurística.

La Tabla 5 muestra estos resultados. Se incluyen las filas correspondientes a la media aritmética (MA) y mediana (ME), entre todas las funciones. La última fila MA-M muestra la media aritmética de la diferencia de los resultados respecto a la metaheurística que mejor se comporta en cada función.

La Tabla 6 muestra el resultado de la cantidad de veces que ECE-MP-FDC es inferior, igual o superior que cada una de las demás metaheurísticas realizando la prueba no pareada de Wilcoxon entre las 30 repeticiones respectivas. La columna “Total” acumula estos valores y permite tener una visión global de ECE-MP-FDC respecto a las demás metaheurísticas.

La última fila (WP-MA) muestra el resultado de la prueba de Wilcoxon pareada entre las medias mostradas en la Tabla 5, indicado si ECE-MP-FDC es inferior, igual o superior que cada una de las demás metaheurísticas en la prueba pareada de las medias. La importancia de usar la prueba de Wilcoxon ha sido defendida en [21]. Se trabajó con nivel de significación de 0.05.

4.4. Discusión

A partir de los resultados, puede observarse que ECE-MP-FDC se comporta bien en general, teniendo un resultado global similar o mejor que las P-Metaheurísticas, y superando generalmente a las otras S-Metaheurísticas.

En la Tabla 5 se ve que ECE-MP-FDC tiene el mayor valor de media aritmética (MA) y mediana (ME); y tiene, como promedio, una menor distancia al algoritmo mejor en cada caso (MA-M).

En la prueba pareada sobre los 28 promedios mostrada en la fila WP-MA de la Tabla 6 se puede ver que el

algoritmo propuesto supera a 4 de las metaheurísticas con las que se compara, mientras que queda igual con las demás,

y ninguna la supera en el comportamiento global.

Tabla 5.

Media aritmética de las mejores soluciones

Función	P-Metaheurísticas				S-Metaheurísticas				ECE-MP-FDC
	AG 20-100	AG 50-100	ES 1-5	ES 20-100	RRT	AGD	TA	ECE	
f0000	75.87	86.93	98.93	85.07	77.33	79.73	100	100	98.93
f0001	86.13	94.93	100	100	87.50	98.43	100	100	100
f0003	94.93	99.13	100	97.40	86.73	99.60	87.90	100	100
f0022	90.67	98.00	99.53	94.27	79.67	95.20	56.27	100	100
f0111	83.10	91.20	100	99.80	80.20	88.03	100	100	99.70
f0120	74.10	81.50	58.40	67.33	79.13	66.87	100	56.53	76.63
f0122	91.30	97.27	100	100	76.07	95.00	58.97	100	99.93
f0123	98.20	99.80	100	98.20	79.87	99.67	66.43	100	100
f0131	84.33	87.07	84.63	87.07	85.27	81.33	100	77.40	85.33
f1001	85.13	95.30	83.30	98.10	86.43	97.67	100	81.40	92.20
f1002	92.27	97.93	84.50	99.93	65.43	63.00	65.87	70.90	94.53
f1012	93.77	98.27	92.30	100	72.27	72.03	69.17	81.00	97.90
f1111	80.30	90.20	100	99.50	84.00	85.60	100	100	99.20
f1112	91.60	96.87	100	100	75.70	98.20	52.27	100	100
f1120	73.97	81.37	57.87	66.67	78.07	66.30	100	56.33	77.87
f1221	79.70	85.73	58.87	69.87	77.47	69.77	71.00	85.53	80.03
f2000	74.87	84.80	85.67	83.33	75.93	86.07	100	75.93	84.47
f2001	84.40	91.17	88.20	94.07	56.50	53.93	56.77	59.50	90.33
f2012	89.63	97.00	92.27	97.80	79.17	97.53	51.00	92.27	93.87
f2200	71.47	76.87	70.87	75.47	82.93	74.47	100	61.33	72.13
f2220	72.40	77.87	83.73	79.27	81.60	63.07	100	56.27	75.33
f3000	76.57	86.27	88.40	89.60	88.13	88.63	87.87	87.23	90.70
f3001	82.33	90.87	93.57	92.63	87.13	93.77	87.50	93.53	94.67
f3002	86.93	92.80	93.43	93.77	73.37	70.27	72.10	78.90	94.20
f3010	80.20	90.07	95.93	95.30	56.87	55.07	56.53	59.37	95.93
f3012	87.60	94.87	95.40	94.80	82.27	88.57	72.40	90.43	95.50
f3102	86.13	91.23	91.43	92.17	83.00	95.10	51.20	88.03	87.53
f3210	80.13	83.57	83.17	83.40	80.73	83.17	100	78.03	82.47
MA	83.86	90.67	88.59	90.53	78.53	82.36	80.83	83.21	91.41
ME	84.37	91.19	92.29	94.17	79.77	85.84	87.69	86.38	94.37
MA-M	14.13	7.31	9.40	7.46	19.46	15.63	17.16	14.78	6.58

Tabla 6.

Pruebas de Wilcoxon (0.05) entre ECE-MP-FDC y las demás metaheurísticas

	AG 20-100	AG 50-100	ES 1-5	ES20-100	RRT	AGD	TA	ECE	Total
Inferior	0	8	2	8	3	3	8	1	33
Igual	5	9	19	12	2	5	4	12	68
Superior	23	11	7	8	23	20	16	15	123
WP-MA	Superior	Igual	Igual	Igual	Superior	Superior	Igual	Superior	

Tabla 7.

Diferencia en las métricas en las funciones mejores para cada metaheurística

	0-1	0-2	0-3	1-2	1-3	2-3	BFDC	MAB	MABP
ECE-MP-FDC	0,75	0,61	0,45	-0,14	-0,30	-0,15	-0,03	-0,14	-0,25
TA	-0,67	-0,56	0,37	0,11	1,04	0,93	0,18	-0,14	-0,05
AG-50-100	-0,19	-0,39	0,12	-0,20	0,31	0,51	0,06	0,09	0,15
ES-1-5	-0,20	-0,21	-0,58	-0,01	-0,37	-0,37	-0,28	0,07	0,12
ES-20-100	0,33	0,36	-0,30	0,02	-0,63	-0,65	-0,16	-0,04	-0,09
ECE	-1,08	-1,17	-1,66	-0,09	-0,58	-0,49	-0,82	-0,16	0,06

También se puede ver que en la comparación directa de ECE-MP-FDC contra las demás metaheurísticas (tres primeras filas de la Tabla 6) usando la prueba de Wilcoxon en cada función, el algoritmo propuesto siempre es más veces superior que inferior, excepto con EE-20-100 con la que queda empatada. Esto muestra un resultado general

competitivo, al menos en este tipo de funciones de bloques.

Para entender las características de los problemas que hacen más aconsejable el uso de uno u otra metaheurística se hizo un análisis de las características de las funciones donde cada metaheurística obtiene buenos resultados (primer o segundo lugar).

La Tabla 7 se muestra la diferencia entre la media aritmética de las métricas en las 28 funciones comparada con esa misma métrica medida en las funciones donde cada metaheurística trabaja bien. Se observan algunas características de las funciones que parecen favorecer a cada metaheurística.

Puede verse que BFDC influye menos en ECE-MP-FDC y en AG-50-100 que en las demás. Este resultado puede entenderse como que estos algoritmos son menos sensibles a esta medida debido a su forma de trabajo. Se puede ver que TA funciona mejor en funciones con BFDC más alto, mientras que ECE se beneficia de valores bajos de FDC, como era esperado.

ECE-MP-FDC se comporta mejor en funciones con altos valores de 0-1, 0-2 y 0-3, mientras que con TA pasa lo contrario. Para las métricas 1-3 y 2-3 ocurre lo contrario, favoreciendo a TA y en menor medida a AG y afectando a ECE-MP-FDC.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó ECE-MP-FDC, una variante proactiva del Escalador de Colinas que revisa varias estructuras de vecindad y usa aquella donde la métrica FDC es más conveniente por su cercanía a -1.

ECE-MP-FDC se ha comparado con varias metaheurísticas en un grupo amplio de 28 funciones sobre cadenas de 100 bits, obteniendo buenos resultados.

También se han identificado algunas métricas que caracterizan a las funciones donde cada metaheurística tiene mejores resultados.

En el futuro se pretende estudiar este mismo enfoque con otras métricas y otras metaheurísticas.

Referencias

- [1] Talbi, E.G., *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Doerner, K.F., Gendreau, M., Greistorfer, P., Gutjahr, W.J., Hartl, R.F., et al., *Metaheuristics: Progress in Complex Systems Optimization*, Springer Science+Business Media, 2007.
- [3] Moreno, J., Rivera, J.C., Ceballos, Y.F. Agrupamiento homogéneo de elementos con múltiples atributos mediante algoritmos genéticos, *Dyna*, 78 (165), pp. 246-254, 2010.
- [4] Blum, C., Roli, A. *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison*, *ACM Computing Surveys*, 35, pp. 268–308, 2003.
- [5] Wolpert, D., Macready, W. *No Free Lunch Theorems for Optimization*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, pp. 67-82, 1996.
- [6] Naudts, B., Kallel, L. *A Comparison of Predictive Measures of Problem Difficulty in Evolutionary Algorithms*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4, pp. 1-15, 2000.
- [7] Jones, T., Forrest, S. *Fitness distance correlation as a measure of problem difficulty for genetic algorithms*. *Memoria 6th International Conference on Genetic Algorithms*. Pittsburgh, USA, pp. 184-192, julio 1995.
- [8] Wooldridge, M., *An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley & Sons, 2009.
- [9] Kingdon, J., Dekker, L. *Morphic Search Strategies*. *Memoria First IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. Nagoya, Japan, pp. 837-841, 1996.
- [10] Yuret, D., Maza, M.d.l. *Dynamic Hill Climbing: Overcoming the limitations of optimization techniques*. *Memoria Second Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks*. pp. 208-212, 1993.
- [11] Tomassini, M., Vanneschi, L., Collard, P., Clergue, M. *A Study of Fitness Distance Correlation as a Difficulty Measure in Genetic Programming*, *Evolutionary Computation*, 13, pp. 213-239, 2005.
- [12] González, J., Cruz, C., Amo, I.d., Pelta, D. *An adaptive multiagent strategy for solving combinatorial dynamic optimization problems*. *Memoria Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization*. Cluj-Napoca, Romania, pp. 41-55, Octubre 2012.
- [13] Aydin, M. *Coordinating metaheuristic agents with swarm intelligence*, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23, pp. 991-999, 2012.
- [14] Lepagnot, J., Nakib, A., Oulhadj, H., Siarry, P. *A New multiagent Algorithm for Dynamic Continuous optimization*, *International Journal of Applied Metaheuristic Computing*, 1, pp. 16-38, 2010.
- [15] Malek, R. *Collaboration of Metaheuristics Algorithms through a Multi-Agent System*, En: *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing: 4th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems* (Eds. V. Marik, T. Strasser, and A. Zoitl), *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Proc. Vol. 5696, Springer, pp. 72-81, 2009.
- [16] Li, B., Yu, H., Shen, Z., Miao, C. *Evolutionary Organizational Search*. *Memoria 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Budapest, Hungary, pp. 1329–1330, mayo 2009.
- [17] Birattari, M., *Tuning Metaheuristics: A Machine Learning Perspective*, Springer, 2009.
- [18] Gómez-Sanz, J., Botía, J., Serrano, E., Pavón, J. *Testing and Debugging of MAS Interactions with INGENIAS*, En: *Agent-Oriented Software Engineering IX* (Eds. M. Luck and J. Gomez-Sanz), *Lecture Notes in Computer Science*, Proc. Vol. 5386, Springer Berlin Heidelberg, pp. 199-212, 2009.
- [19] Wang, H., Wang, D., Yang, S. *A memetic algorithm with adaptive hill climbing strategy for dynamic optimization problems*, *Soft Computing- A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 13, pp. 763-780, 2009.
- [20] Cruz, C., González, J.R., Pelta, D.A. *Optimization in dynamic environments: a survey on problems, methods and measures*, *Soft Computing*, 15, pp. 1427–1448, 2011.
- [21] García, S., Molina, D., Lozano, M., Herrera, F. *A study on the use of non-parametric tests for analyzing the evolutionary algorithms' behaviour: a case study*, *Journal of Heuristics*, 15, pp. 617–644, 2009.

INSTRUCTIONS FOR OUR CONTRIBUTORS - DYNA JOURNAL

DYNA Journal is a general scientific publication of the technological science area founded in 1933. It is the means of expression of those who work in the area of engineering, science, and technology of the School of Mines of the Universidad Nacional de Colombia, Medellin Branch, and of researchers of the same area who are in Colombia. DYNA mainly presents scientific and technological development research articles, articles with original reflection on a particular problem or topic, and review articles which offer a general perspective of the state of a specific sphere of science and technology. Notes and communications are also included as are discussions on particular points of the theme covered by the journal: technology, science, and engineering. All of the articles published are subject to the peer or referee review by those of recognized suitability on the article's subject.

The presentation of an article should be accompanied by a Presentation Letter, requesting publication in the journal, declaring that the article is approved by all of the authors, that it has not been published or submitted for consideration in another similar publication or journal. If the article has been published in another medium with a different outreach such as seminar memoirs, newspapers, supplements, etc., these should be specified and the possible publication in DYNA should be justified. Finally, the authors should recommend possible evaluators (2 national and 2 international) for the article being presented. It will be necessary to attach copies of permissions for the reproduction of material which was already published.

The submission of articles and the Presentation Letter are handled through the Open Journal System (OJS) of the National University (UN) Virtual Library (Enter through: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/user>).

DYNA publishes the following in each of its editions: an editorial, research articles, essays, brief communications, and diagnostic images. The journal publishes articles from the following areas:

- Organizational Engineering
- Civil Engineering
- Materials Engineering
- Geosciences and the Environment
- Computer Systems
- Chemistry and Petroleum
- Mechatronics
- Engineering and Biotechnology
- Other areas related to Engineering

All that is published in DYNA is considered to be the property of the journal and can only be reproduced completely or partially with the express permission of the director. The articles which are published in DYNA are also published in an electronic version (CD-ROM), on the Internet, as well as in other electronic formats which may become important in the future; the authors of the articles accepting these and other virtual or digital forms of publication. DYNA assumes international norms for the publication of the articles such as ISI, Vancouver, and Harvard, with the specifications which shall be given shortly.

SECTION TYPES

Authors who wish to contribute to a certain section of the journal can send their contributions through the OJS system, by which the author will be notified by e-mail; understanding that this does not imply the acceptance of the paper. The Editorial Committee may reject, suggest changes, or (in certain cases), carry out modifications in the received texts. In the latter case, none of the scientific content shall be altered, but the modifications will be limited only to the literary style. The criteria which will apply to evaluate the acceptance of the articles will be the methodological

scientific rigor, innovation, the relevance of the research, expositional conciseness, and the literary quality of the text. The journal will publish one or several of the following sections in each number:

1. The Editorial

These are papers written by someone recommended by the Editorial Committee, or otherwise, by one of its members. Its length should not be more than six pages, double-spaced; the bibliography (if there is one) should not contain more than 10 citations. The editorial should be placed under the consideration of the Editorial Committee for its final approval.

2. Letters to the Editor

Critical, analytical, or interpretational positions on documents published in the journal, which, by judgment of the Editorial Committee, make an important contribution to the discussion of the subject of the field, on behalf of the scientific community of reference.

3. Articles of Scientific and Technological Research

Those papers which exposit upon the outcomes of research in engineering (within previously-defined areas) will be considered as articles of scientific and technological research. These should have the following generally used structure: an introduction, the methodology, outcomes, and conclusions. They should not have more than 30 bibliographical citations.

4. Reflection Articles

These present outcomes of research from an analytical, interpretive, or critical perspective of the author, on specific topics in the area of engineering and within the previously defined areas, using original sources. They should not go beyond 10 bibliographical citations.

5. Review Articles

Documents which are a result of research in which the outcomes of published or non-published research projects are analyzed, systematized, and integrated in the field of engineering, with the objective of giving an account of the advances and the developmental trends of the previously cited topics. These articles present a careful bibliographic review of around 50 references.

6. Brief Communication and Summaries

This section allows for us to publish brief articles with greater speed. It allows authors to present their observations, initial outcomes of current research, book reviews, and even to make comments on works that have already been published in the journal. The text should not include more than 10 bibliographical citations.

7. Diagnostic Image (Case Studies)

In this section singular cases are presented which the image is decisive. For publication, one or a maximum of two images, or diagnostic cases, may be submitted. These may be from any branch of engineering and should be accompanied by a short commentary with relation to the case. The length of the commentary may not be less than 15 written lines, single spaced. This page should be sent together with another which has the information about the author or authors which shall be described further on in the presentation of papers.

8. Translations

Translations of classic or current texts, the transcriptions of historical documents, or those of particular interest in the field of the journal's publication are presented.

9. Event Notices

This shall include brief information which announces events related to engineering. It has no cost.

PRESENTATION OF PAPERS

Together with the Commitment Letter, the article shall be presented through the Open Journal System – OJS, of the UN Virtual Library (on the webpage, go to Envío de Artículos).

1. The authors shall send their articles through the Open Journal System (OJS), entering according to the instructions which are found in Envío de Artículos and, additionally will accompany it with the Presentation Letter, which they may write in accordance with the model presented in: *Modelo de Carta de Presentación* (in Web site: dyna.unalmed.edu.co).
2. The article should be unpublished and may not be submitted simultaneously to the scrutiny of other journals or periodical publications.
3. The maximum length of the articles will be 10 pages, single-spaced, in Spanish or English, letter-sized presentation. Include in the pages the abstract in Spanish (RESUMEN) and in English (ABSTRACT), both of a maximum of 150 words, and the “Keywords” also in Spanish (PALABRAS CLAVES) and in English (KEYWORDS). The articles may NOT be class notes and when they are translations or use material protected by intellectual property rights they should be submitted with the due author authorizations.
4. Every article shall be submitted to the evaluation of two referees designated by the Editorial Committee. The exceptions to this requirement shall be decided upon by the same Committee.
5. Regarding graphics, tables, and figures, these should be processed as objects (in order to ease the editing). Authors may use the program that they wish. These should be sent in an image format (JPG, GIF, BMP, etc.), in black and white or grey tones, avoiding polychromes.
6. The figures that are not presented in an electronic medium should be presented as photography or as vellum and Indian ink.
7. If the text includes photography, its presentation is recommended in black and white, matte, with good contrast. Photographs should be placed on pages of the same size as the text. In the rest of the aspects, the treatment given is similar to that of figures.
8. The presentation of the article will be according to the articles of this number. Footnotes are not admitted due to the typesetting requirements of the journal.
9. Under the title of the article should be included the name of the author (or authors), their professional identification or institutional affiliation, their postal and electronic (e-mail) addresses.
10. The references should go at the end of the paper in the following format:

Journal articles:

Alien, J. S., Samuelson, R. and Newberger, A. Chaos in a model of forced quasi-geostrophic flow over topography: An application of Melinkov's method, *J. Fluid Mech.*, No. 226, pp. 511-547, 1991.

Books:

Baker, G. L. and Golub, J., *Chaotic Dynamics: An introduction*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

Chapter of a book:

Lewis, P., Ray, B. and Stevens, J.G. Modeling time series by using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), In: *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past* (Eds. A. S. Weigend and N. A. Gershenfeld), SFI Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XV, Addison-Wesley, pp. 297-318, 1994.

Conference proceedings:

Álvarez, N., Botero, T. and Correa, D. Title of the Paper. *Memorias XIX Congreso Latinoamericano de Ponencias Científicas*. Córdoba, Argentina, Tomo II, pp. 219-228, Octubre 2000.

Organization or government report:

U.S. EPA. *Status of Pesticides in Registration and Special Review*. EPA 738-R-94-008. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1994.

Thesis:

Jacobs J., *Regulation of Life History Strategies within Individuals in Predictable and Unpredictable Environments* [PhD Thesis]. Seattle, WA: University of Washington, 1996.

Internet references:

NOAA-CIRES. Climate Diagnostics Center. *Advancing Understanding and Predictions of Climate Variability*. Available: <http://www.cdc.noaa.gov> [cited August 8, 1998].

Non-published data:

Last name, N. Non-published data.

Personal communication:

Last name, N. Personal communication.

OTHER CONSIDERATIONS

The author shall always keep a copy of the paper. The Editorial Committee will decide on the publication of each manuscript and will suggest possible modifications when the Committee considers it to be appropriate, after it has been submitted to the evaluation of the selected peers. This procedure will be as brief as possible.

The Journal's Editorial Committee will acknowledge receipt of the originals and will inform the author on their acceptance through communication by e-mail, through the Open Journal System.

The editorial staff of the journal will take the greatest care in avoiding errors in the final transcription of the articles to publish, however, it does not respond for the errors that may appear. If the authors detect important errors, they should recur as soon as possible to the editorial staff so that a list erratas may be prepared for the next number of the journal.

The editorial staff reserves the right to carry out small adjustments on the article titles, as well as minor rectifications in the editing, in translations, resúmenes and abstracts; although the general policy to be followed shall be to consult with the authors about these issues.

NORMAS DE PUBLICACIÓN - REVISTA DYN Instrucciones a los Autores

La Revista DYNA es una publicación científica general del área de las ciencias tecnológicas, fundada en 1933, es el medio de expresión de los trabajos en el área de ingeniería, ciencias y tecnología de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín y de los investigadores del área en Colombia. DYNA presenta principalmente artículos de investigación científica y de desarrollo tecnológico, artículos de reflexión originales sobre un problema o tópico particular y artículos de revisión que brindan una perspectiva general del estado de un dominio específico de la ciencia y la tecnología. También tienen cabida notas y comunicaciones, así como discusiones sobre puntos particulares de la temática cubierta por la revista: tecnología, ciencias e ingeniería. Todos los artículos publicados se someten a revisión de pares o árbitros, de reconocida idoneidad en el tema.

La presentación de un artículo debe ir acompañada de una Carta de Presentación, solicitando su publicación en la revista, declarando que el artículo es aprobado por todos los autores, que no ha sido publicado o sometido a consideración en otra publicación o revista similar. Deben especificar si el artículo ha sido publicado en otro medio de diferente alcance divulgativo como memorias de seminarios, periódicos, separatas, etc., y justificar su posible publicación en DYNA. Finalmente recomendar posibles evaluadores (2 nacionales y 2 internacionales) para el artículo presentado; de ser necesario adjuntar copias de los permisos para reproducir material ya publicado.

El envío de los artículos y de la Carta de Presentación se hace a través del Sistema Open Jornal System (OJS) de la Biblioteca Virtual UN (Ingresar a través de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/login>).

DYNA publica en sus ediciones: Editorial, Artículos de Investigación, Ensayos, Comunicaciones Breves e Imágenes Diagnósticas. La revista publica artículos sobre las siguientes áreas:

- Ingeniería de la Organización
- Ingeniería Civil
- Ingeniería de Materiales
- Geociencias y Medio Ambiente
- Sistemas
- Química y Petróleos
- Mecatrónica
- Ingeniería y Biotecnología
- Otros relacionados con Ingeniería

Todo lo publicado se considerará propiedad de DYNA y solo podrá ser reproducido total o parcialmente con el permiso expreso del director. Los artículos que sean publicados en la revista DYNA podrán ser también publicados en la versión electrónica de la revista, en Internet, así como en otros formatos electrónicos (CD-ROM y otros) que surjan en el futuro, aceptando los autores de los artículos éstas y otras formas de publicación virtual o digital. DYNA asume para la publicación de los artículos las normas internacionales como ISI, Vancouver y Harvard con las especificaciones que se detallan mas adelante.

TIPOS DE SECCIONES

Los autores que deseen colaborar en algunas de las secciones de la revista pueden enviar sus aportes (a través del sistema OJS), que será notificado vía e-mail al autor; entendiéndose que ello no implica la aceptación del trabajo. El Comité Editorial podrá rechazar, sugerir cambios o llegar al caso, realizar modificaciones en los textos recibidos; en este último caso, no se alterará el contenido científico, limitándose únicamente al estilo literario. Los criterios que se aplicarán para valorar la aceptación de los artículos serán el rigor científico metodológico, novedad, trascendencia del trabajo, concisión expositiva, así como la calidad literaria del texto. La revista publicará en cada número una o varias de las siguientes secciones:

1. Editorial

Trabajos escritos por encargo del Comité Editorial, o bien, redactados por alguno de sus miembros. Su extensión no debe ser superior a 6 páginas, escritos a doble espacio; la bibliografía si la hay, no debe contener una cifra superior a 10 citas. Esta editorial debe ser puesta a consideración del Comité Editorial para su aprobación final.

2. Cartas al Editor

Posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre documentos publicados en la revista, que a juicio del Comité Editorial constituyen un aporte importante a la discusión del tema ambiental, por parte de la comunidad científica de referencia.

3. Artículos de Investigación Científica y Tecnológica

Tendrán tal consideración aquellos trabajos, que versen sobre resultados de investigaciones en ingeniería, dentro de las áreas definidas con anterioridad. Deben tener la siguiente estructura generalmente utilizada: Introducción, Metodología, Resultados y Conclusiones.

4. Artículos de Reflexión

Son documentos que presentan resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre temas específicos en un área de ingeniería y dentro de las áreas definidas anteriormente, recurriendo a las fuentes originales. No debe superar las 10 citas bibliográficas.

5. Artículos de Revisión

Documentos resultados de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre el campo de ingenierías, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo de los temas citados anteriormente. Se caracterizan por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica alrededor de 50 referencias.

6. Comunicación Breve y Reseñas

Esta sección permite publicar artículos breves, con mayor rapidez. Ello facilita que los autores presenten observaciones, resultados iniciales de investigaciones en curso, revisiones de libros e incluso realizar comentarios a trabajos ya publicados en la revista. El texto no debe superar las 10 citas bibliográficas.

7. Imagen diagnóstica. (Reporte de Casos)

En esta sección de la revista se presentarán casos singulares en los que la imagen sea resolutiva. Para ello, se aportarán una, o como máximo dos imágenes, o casos diagnósticos, de cualquier rama de la ingeniería y acompañada de un breve comentario en relación con el caso. La extensión del comentario no será menor a 15 líneas escritas a espacio sencillo. Esta página se remitirá junto a otra, con la información del autor o autores y que se detalla mas adelante en presentación de los trabajos.

8. Traducciones

Se presentan traducciones de textos clásicos, o de actualidad, o transcripciones de documentos históricos o de interés particular en el dominio de publicación de la revista.

9. Noticias de Eventos

Incluirá breve información que anunciará eventos relacionados con la ingeniería. No tiene ningún costo.

PRESENTACIÓN DE LOS TRABAJOS

Acompañado de la Carta de Compromiso, el artículo se presentará a través del Sistema Open Journal System – OJS de la Biblioteca Virtual de la UN (ir a Envío de Artículos),

Los autores remitirán sus artículos a través del Sistema Open Journal System (OJS), ingresando según las instrucciones que encuentran en Envío de Artículos y adicionalmente acompañado de la Carta de Presentación, que pueden redactar de acuerdo con el modelo presentado en: Modelo de Carta de Presentación (en sitio Web: dyna.unalmed.edu.co).

El artículo debe ser inédito y no puede someterse simultáneamente al examen de otras revistas o publicaciones periódicas. La extensión máxima de los artículos será de 10 páginas a espacio sencillo, en castellano o en inglés, en papel tamaño carta, incluyendo en ellas el Resumen (máximo de 150 palabras) en castellano (RESUMEN), e inglés (ABSTRACT) y las "Palabras Clave", también en castellano e inglés (Keywords). Los artículos NO pueden ser notas de clase y cuando se trate de una traducción o del

uso de material protegido por “Derechos de propiedad intelectual” deberá contar con las debidas autorizaciones de los autores.

Todo artículo se someterá a la evaluación de dos jurados, designados por el Comité Editorial. Las excepciones a este requisito serán decididas por tal Comité.

Respecto a gráficas, tablas y figuras, éstas deberán procesarse como “objetos” (para facilitar la diagramación de la revista); para ello puede utilizarse el programa que se deseé. Se sugiere enviarlas en blanco y negro o tonos de gris, evitando las policromías.

Las figuras que no estén en medio electrónico, se presentan en fotografía o papel albanene y tinta china.

Si el texto incluye fotografías, se recomienda su presentación en blanco y negro, mate, con buen contraste. Las fotografías se deben montar en hojas del mismo tamaño del texto. En los demás aspectos el tratamiento es similar al de las figuras.

La presentación del artículo estará de acuerdo con los artículos de este número. No se admiten “pie de página” por razones de diagramación de la revista.

Al pie del título del artículo debe incluirse el nombre del autor (o autores), su identificación profesional o filiación institucional, su dirección postal y electrónica (e-mail).

Las referencias deberán ir al final con el siguiente formato:

Artículos de revistas:

Alien, J. S., Samuelson, R. and Newberger , A. Chaos in a model offorced quasi-geostrophic flow over topography: an application of Melinkov’s method, *J. Fluid Mech.*, 226, 511-547, 1991.

Libros:

Baker, G. L. and Golub , J., *Chaotic Dynamics: An introduction*, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.

Capítulo de libro:

Lewis, P., Ray, B. and Stevens, J.G. Modeling time series by using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), En: *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past* (Eds. A.S.Weigend y N. A. Gershenfeld), SFI Studies in the Science of Complexity, Proc. Vol. XV, Addison-Wesley, 297-318, 1994.

Memorias de congresos:

Álzate, N., Botero, T. y Correa, D. Título de la Ponencia. *Memorias XIX Congreso Latinoamericano de Ponencias Científicas*. Córdoba, Argentina, Tomo II, 219-228, Octubre 2000.

Reporte de un organismo o Gobierno:

U.S. EPA. *Status of Pesticides in Registration and Special Review*. EPA 738-R-94-008. Washington, DC:U.S. Environmental Protection Agency, 1994

Tesis:

Jacobs J. *Regulación of Life History Strategies within Individuáis in Predictable and Unpredictable Environments* [PhD Thesis]. Seattie, WA: University of Washington, 1996.

Referencias de Internet:

NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center. *Advancing Understanding and Predictions of Climate Variability*. Available: <http://www.cdc.noaa.gov> [citado 8 de Agosto de 1998].

Datos no publicados:

Apellido, N. Datos no publicados

Comunicación Personal:

Apellido, N. Comunicación personal

OTRAS CONSIDERACIONES

El autor siempre conservará una copia del trabajo. Cada manuscrito luego de sometido al proceso de evaluación por pares seleccionados por el Comité Editorial, se decidirá o no su publicación y sugerirá posibles modificaciones cuando lo crea oportuno. Todo este trámite será lo más breve posible.

El Comité Editorial de la Revista acusará recibo de los originales e informará al autor sobre su aceptación, mediante comunicaciones vía correo electrónico.

La redacción de la revista pondrá el máximo cuidado en evitar errores en la transcripción definitiva de los artículos a publicar, no obstante no se responsabiliza de los errores que puedan aparecer. Si los autores detectaran errores importantes deberán dirigirse cuanto antes a la redacción para realizar una fe de erratas en el siguiente número de la revista.

La redacción se reserva el derecho de realizar pequeñas adecuaciones en los títulos de los artículos, así como rectificaciones menores en la redacción, en las traducciones, Resúmenes y Abstracts; aunque la política general que se seguirá será la de consultar a los autores sobre estas cuestiones.

Analysis of a local innovation system: Agents and network of relations

Análisis de un sistema local de innovación: Agentes y red de relaciones

Jorge Coque ^a, Pilar L. González-Torres ^b, Nuria López-Mielgo ^c & Daniel Vázquez ^d

^a PhD, Universidad de Oviedo, España, coque@uniovi.es

^b PhD, Universidad de Oviedo, España, pilargt@uniovi.es

^c PhD, Universidad de Oviedo, España, nlopez@uniovi.es

^d PhD, Universidad de Oviedo, España, dvazquez@uniovi.es

Received: February 26th, 2013. Received in revised form: October 17th, 2013. Accepted: February 18th, 2013

Abstract

Innovation is a key competitive input for firms and countries and there are well-established models for analyzing the innovation process at the national and regional level. Although we have an abundant literature on industrial districts and innovative agglomerations, there are few case studies that go beyond the description and empirically check the existence of a local innovation system. Hence, in this paper we will discuss a successful experience in innovation, The Knowledge Mile of Gijón, placed at the North of Spain, in order to determine whether the different agents are articulated and interact as a real local innovation system. Using the network analysis technique, we will provide confirmatory evidence showing that (i) relations among agents are dense, cohesive and well-connected and (ii) innovation-support organizations play an important role in the system.

Keywords: local innovation system, technology-based firms, network analysis.

Resumen

La innovación constituye un factor clave de competitividad para las empresas y los países, existiendo modelos consolidados para su análisis a nivel nacional y regional. Aunque se dispone de una abundante literatura sobre distritos industriales y aglomeraciones territoriales, son limitados los estudios de casos que trascienden de la descripción y llegan a contrastar empíricamente la propia existencia de un sistema local de innovación. En este trabajo se indaga acerca de una experiencia exitosa en materia de innovación, la Milla del Conocimiento de Gijón, situada en el norte de España, con el objetivo de determinar si los distintos agentes allí ubicados interactúan como un verdadero sistema local de innovación. Mediante un análisis de redes se obtiene evidencia confirmatoria, demostrándose que (i) las relaciones entre agentes son densas, cohesionadas y bien conectadas y (ii) que las organizaciones de soporte a la innovación juegan un importante papel en el sistema.

Palabras clave: sistema local de innovación, empresas de base tecnológica, análisis de redes.

1. Introducción

La innovación tecnológica constituye una competencia distintiva que permite obtener beneficios superiores a los normales de un sector, esto es una capacidad única y superior para competir. Muchos trabajos reconocen el papel central de la innovación y la tecnología para conseguir éxito en el mercado [1-4].

También es ampliamente conocido que la innovación es una de las principales causas de crecimiento económico y bienestar de una sociedad (una revisión de la literatura se puede encontrar en la referencia [5]). Innovar se ha convertido en un elemento competitivo clave y diferenciador en mercados maduros [6] y sectores tradicionales, como por ejemplo, el

sector del mueble [7] o el sector de alimentación [8], así como impulsor de la aparición de nuevos sectores industriales [9]. Por esta razón, diversas disciplinas se han acercado al estudio de la innovación empleando metodologías de análisis muy variadas. Así por ejemplo, desde una vertiente institucional, se analiza la coordinación de diferentes procesos e ideas por parte de un conjunto de organizaciones para crear nuevos productos o servicios [10]. El concepto de sistema nacional de innovación surge en los primeros debates de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) a partir de 1960 [11] tratando de integrar un conjunto amplio de factores, algunos de ellos no considerados hasta entonces. En la actualidad, se entiende por sistema nacional de innovación el conjunto de elementos y relaciones que interactúan en la

producción, difusión y uso de conocimiento nuevo y económicamente útil [12]. El salto hacia el análisis local se produce para capturar la idiosincrasia del territorio [13], más allá de sus límites administrativos [14].

En un sistema de innovación, ya sea nacional, regional o local, intervienen cinco tipos de agentes [15-17]: empresas, sistema público de I+D, organizaciones de soporte de la innovación, administración pública y entorno. Cada uno de ellos tiene una función propia y todos se complementan, reforzando la innovación en el territorio. En definitiva, existirá un sistema de innovación en la medida en que todos los agentes se relacionen entre sí a través de redes.

En primer lugar, las empresas son las responsables de aplicar el conocimiento científico y tecnológico al sistema productivo, creando y difundiendo dicho conocimiento y transformándolo en mejoras en el bienestar y la productividad. Podría decirse que constituyen el agente más importante del sistema de innovación que al adoptar nuevos desarrollos por mimetismo, del conocimiento y a su difusión al resto del tejido productivo [18].

Sin embargo, la empresa no siempre cuenta internamente con los recursos y capacidades que facilitan su actividad innovadora, por lo que debe rebasar los límites de su organización para alcanzarlos [19]. La cooperación para la innovación permite compartir costes y conocimiento, lo que resulta especialmente útil en entornos complejos y cambiantes, avanzados tecnológicamente, como es el caso de las empresas de base tecnológica. Este hecho pone de manifiesto la importancia de las relaciones que pueda mantener cada empresa con otras empresas y con el resto de agentes del sistema de innovación.

El segundo de los agentes es el sistema público de I+D y está formado por el conjunto de todas las instituciones y organismos de titularidad pública dedicados a la generación de conocimiento mediante la investigación y desarrollo (I+D). Su función es doble: generar conocimiento científico y formar investigadores. Dentro del sistema público de I+D destaca la universidad, con un papel clave en ambas funciones [20-23].

Otro agente lo constituyen las organizaciones de soporte de la innovación, que engloban a un conjunto de entidades, públicas o privadas, concebidas para facilitar la actividad innovadora de las empresas, proporcionándoles tecnología y conocimiento. Son importantes agentes de soporte: los parques tecnológicos, los centros tecnológicos y las oficinas de transferencia de resultados de investigación [24-25].

La administración pública, en sus diferentes niveles administrativos (local, regional, nacional y supranacional), tiene como labor apoyar al sistema productivo en los cambios necesarios, propiciando entornos adecuados para el despliegue de la iniciativa empresarial [6].

Finalmente, el quinto y último agente del sistema es el entorno. Numerosos expertos han puesto de manifiesto la importancia de tres factores contextuales que influyen decisivamente en la innovación [15-16]:

- La financiación: mediante fórmulas que comprendan las características y peculiaridades de los proyectos de I+D (arriesgados, inciertos y a largo plazo).
- Capital humano: la innovación depende en buena medida del nivel de formación y también de otras formas de conocimiento tácito incorporado a las personas.
- La demanda tecnológica, tanto privada como pública.

La aplicación al ámbito local de este marco institucional de análisis de la innovación genera un modelo en el que el territorio es importante. A las ventajas lógicas de cualquier sistema de innovación consistente, habrá que añadir las producidas por la aglomeración geográfica. Por un lado estarían los beneficios más obvios de tipo material –tales como infraestructuras comunes-. Sin embargo, existe un amplio consenso respecto a la mayor trascendencia de las externalidades de carácter intangible [26]. La existencia de una comunidad de personas fomenta la confianza relacional gracias al conocimiento mutuo, las relaciones comerciales continuas y la experiencia [27-30]. Este hecho limitará los comportamientos oportunistas entre miembros de la comunidad [31-33].

El concepto de sistema local de innovación guarda relación con ciertos principios del clásico distrito marshalliano [34]. Pero no se trata de una mera aglomeración territorial de agentes de forma involuntaria [35]. La lógica sistémica articulada a través de redes, la convivencia público-privada y un cierto grado de diseño son características fundamentales del distrito, y también son centrales en un sistema local de innovación. En la actualidad los sistemas y las redes empresariales son un tema muy relevante y actual [36], especialmente en el ámbito de la innovación [37].

En todo caso, pese a que existe una amplia literatura sobre las aglomeraciones territoriales [38] y los distritos industriales [39]¹, no son frecuentes los estudios de casos que trascienden de la descripción y llegan a contrastar empíricamente la propia existencia de un sistema local de innovación con pretensión de globalidad. A fin de contribuir a cubrir este vacío, en este trabajo se abordará el análisis de un espacio geográfico en el que se encuentran los cinco agentes mencionados y que recurrentemente es presentado como un área de innovación. El objetivo es determinar si los esfuerzos realizados para convertir la zona en un catalizador de conocimiento han derivado en un verdadero sistema local de innovación. Esto es, si entre los diferentes agentes presentes en dicha zona existe una red de relaciones vinculadas con la innovación que sea densa, cohesionada y bien conectada.

2. El objeto de estudio

La Milla de Conocimiento es un área geográfica situada en Gijón, municipio de cerca de 300.000 habitantes

¹ Una aglomeración es un conjunto de grupos localizados de empresas que se integran en un determinado espacio geográfico. Las relaciones que prevalecen entre ellas son de tipo vertical (proveedor-comprador) y son de cualquier tamaño. En los distritos industriales el énfasis recae en la unión de las empresas, especialmente pequeñas y medianas, enraizadas con la comunidad local. El territorio es un lugar de concentración de una determinada producción y de una determinada sociedad con sus características peculiares. El tipo de relaciones son verticales y horizontales. En definitiva, en los distritos hay una aglomeración de empresas pero no todas las aglomeraciones son distritos.

perteneciente a la región de Asturias, una zona industrial en reconversión del Norte de España. Este espacio no fue planificado desde el inicio con su configuración actual. El presente es más bien el fruto de una sucesión de decisiones públicas de varias décadas que, a la vista de los resultados que se conseguían y sobre todo de las potencialidades que surgían, iban ampliando la apuesta por convertir esa zona en un catalizador de conocimiento e innovación. Conviene destacar que la iniciativa pública fue secundada por la privada, que paulatinamente fue percibiendo las ventajas que le otorgaba localizarse dentro de este espacio geográfico.

En la actualidad este proyecto constituye un pilar fundamental en la política económica municipal y representa un caso de éxito reconocido a nivel nacional. De hecho, en 2011 la ciudad recibió del Gobierno de España el distintivo "Ciudad de la Ciencia y la Innovación", en gran medida por la contribución de la Milla del Conocimiento de Gijón (MCG) al cambio de modelo productivo.

El espacio de la MCG, cuenta con una superficie de 218.000 m², ubicándose en una extensión alargada de poco más de una milla de longitud, lo que dio origen a su nombre. Las piezas clave de la Milla son:

- El Parque Científico y Tecnológico de Gijón (PCTG), creado en el año 2000 y con la particularidad de que fue el primer parque tecnológico español promovido por un ayuntamiento. Sirve de ubicación a empresas intensivas en conocimiento y a organizaciones de soporte a la innovación. El PCTG se amplió en tres ocasiones y el agotamiento del espacio inicialmente acotado ha obligado a generar nuevos enclaves en zonas anexas.
- El Campus de Gijón. Pertenece a la Universidad de Oviedo y está dividido en dos zonas: una con titulaciones del ámbito de las ciencias sociales y otra con titulaciones de ingeniería, siendo esta última la que alberga un mayor número de titulaciones, estudiantes y profesores.
- El Hospital de Cabueñes, de titularidad pública, donde se realiza formación –en su escuela de enfermería– e investigación.

3. Metodología

La obtención de los datos requirió, en primer lugar, la elaboración de un censo de todos los agentes presentes en la MCG. Para ello fue preciso realizar una revisión documental de memorias e informes internos de las distintas instituciones, así como entrevistas en profundidad a expertos locales. Se obtuvo así un listado poblacional inicial, que hubo que depurar mediante contactos directos que permitieron también establecer quién era el enlace idóneo en cada caso. Por último, se asignó cada agente identificado a uno de los siguientes cuatro tipos contenidos en el modelo teórico: empresas, sistema público de I+D, organizaciones de soporte a la innovación y administración pública. Nótese que los agentes del entorno no se han considerado de forma expresa debido a las obvias dificultades de identificación –se trata de un espacio con amplia apertura a terceros en términos comerciales y

financieros-. La población objeto de estudio quedó constituida por 39 empresas, 45 grupos públicos de investigación (que agrupan a 485 personas), 7 instituciones de soporte a la innovación y dos agentes públicos relevantes en promoción del proyecto: el Ayuntamiento de Gijón y el PCTG (dependiente del primero).

Seguidamente, se encuestó a la totalidad del censo: empresas, grupos públicos de investigación, agentes de soporte a la innovación y administración pública. El cuestionario que permitía describir a cada agente y conocer sus relaciones con el resto (también con el entorno) dentro de la Milla. Para detectar las relaciones se proporcionaba al encuestado un listado de la población de la MCG y se le pedía que indicase con quién ha mantenido alguna relación (formal o informal). A continuación, se preguntaba por relaciones vinculadas a la innovación: investigación bajo contrato, consultoría tecnológica, cesión de derechos de propiedad intelectual, provisión de servicios tecnológicos, formación u otros. El trabajo de campo se realizó mediante encuestas personales entre mayo y septiembre de 2010, recabando datos relativos al año 2009.

En la tercera fase, se aplicó el análisis de redes al conjunto de relaciones entre agentes. Esta metodología ha sido propuesta por distintos autores [40-41] como adecuada para el estudio de las redes empresariales. Es una técnica basada en el supuesto de que el comportamiento de los individuos no solo depende de sus atributos o características, sino también de su participación en relaciones sociales estructuradas. Recientemente, diversos trabajos la han aplicado para estudiar distritos industriales [30]. También se encuentran muchos estudios que la utilizan en el estudio de la economía regional y entornos innovadores [41-44]. Para el desarrollo de esta investigación se ha utilizado el programa UCINET v.6 [40].

4. Resultados

4.1. Descripción de los agentes

El primer grupo de actores de la MCG son las 39 empresas de base tecnológica que se albergan en el PCTG. Facturan en conjunto 1.502 millones de euros y emplean a 1.375 trabajadores. El 95% son pymes (Tabla 1): 23 empresas tienen menos de 10 empleados, 8 empresas menos de 50 y 5 empresas tienen menos de 250. El tipo de actividad que realizan puede agruparse en cuatro categorías:

- Empresas con I+D propia dentro de la Milla: 10 empresas.
- Ingenierías avanzadas: 8. Se trata de ingenierías industriales, que en algunos casos incluyen la consultoría y, en otros, la formación.
- Servicios informáticos: 9. Comprende desde el desarrollo de software industrial para la producción, hasta la aplicación de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) a la telemedicina.
- Consultoras: 10. Su actividad principal es el asesoramiento. Las consultoras operan en muy diversos campos, desde la estrategia empresarial a las actividades de I+D+i, pasando por las cuestiones

tecnológicas.

- Servicios bioquímicos: 2 empresas de análisis especializados en el sector sanitario y alimentario.

El segundo agente, sistema público de I+D, está organizado en torno a 45 grupos de investigación, de los que 42 proceden de la Universidad (mayoritariamente de áreas tecnológicas relacionadas con la ingeniería) y 3 del Hospital. En total suman 485 personas que se clasifican del siguiente modo: 342 investigadores (70% del total), 125 becarios (25% del total) y 18 personas de apoyo en la gestión de laboratorio (personal no investigador). Respecto al tamaño de los grupos de investigación, cada uno está formado por casi ocho investigadores en términos medios. El más numeroso cuenta con 33 investigadores y el más pequeño con dos. En tercer lugar, las organizaciones de soporte de la innovación realizan I+D propia, I+D bajo contrato y servicios de asesoramiento, difusión

Tabla 1.

Empresas

Tamaño (*)		Actividad	
Microempresas	23	I+D propia	10
Pequeñas	8	Ingenierías avanzadas	8
Medianas	5	Servicios informáticos	9
Grandes	2	Consultoría	10
Sin respuesta	1	Servicios bioquímicos	2
TOTAL	39	TOTAL	39

(*) Microempresas: de 0 a 9 empleados; Pequeñas: de 10 a 49; Medianas: de 50 a 249; Grandes: 250 o más empresas.

e información. Se trata de siete entidades:

- Dos centros tecnológicos ubicados en el Parque: uno especializado en TIC y otro en el diseño y producción industrial;
- Tres asociaciones empresariales: una centrada en la innovación, otra en las TIC y una tercera transversal en su actividad. Están instaladas en el PCTG y el Campus de Gijón;
- La oficina de transferencia de resultados de la investigación de la Universidad de Oviedo, en el Campus;
- La oficina de representación de la entidad nacional responsable de normalización.

En relación al cuarto agente, la administración pública, está presente en la Milla a través del PCTG y del propio Ayuntamiento de Gijón, además de a través de las políticas de innovación procedentes de niveles más altos que el local y que puedan tener efecto en esta zona.

Respecto al entorno, debemos decir que no existen agentes financieros como entidades de capital riesgo. Sin embargo, el capital humano y la demanda sí están presentes y son destacables en este sistema. En relación al primero, en la Milla del Conocimiento se encuentran ubicados 13 centros formativos, 9 de ellos universitarios, que constituyen un excelente caldo de cultivo de profesionales e investigadores de alta cualificación. El 90% de los responsables y/o socios de las empresas estudiaron en el

Campus de Gijón, lo que supone que la Universidad constituye una cantera de personal cualificado que nutre el tejido productivo de la zona. Sobre la demanda, la MCG aglutina diversidad de agentes relacionados con la creación de conocimiento y tecnología que atraen por distintos motivos personas e instituciones del más alto nivel en sus respectivos campos.

4.2. Descripción de las relaciones entre agentes

El análisis de redes se ha aplicado a las relaciones declaradas entre los agentes de la MCG. La red inicial objeto de estudio estaba compuesta por 91 actores, integrados en cuatro grupos: 37 empresas (inicialmente eran 39 pero fue preciso eliminar dos, pues no pudieron revelar la información solicitada), 45 grupos de investigación del sistema público de I+D, 7 entidades de soporte a la innovación y 2 organismos de la administración pública. Tras realizar diversas pruebas, se constató que la administración pública municipal jugaba un papel central en la red, por su alto nivel de colaboración con el resto de los agentes. Siendo este resultado muy relevante, lo cierto es que su inclusión podría no dejar ver con claridad las relaciones entre las empresas, el sistema público de I+D y las organizaciones de soporte, que son los tres agentes que según el modelo teórico deberían jugar un papel más activo en la generación y transmisión del conocimiento. Por este motivo, y con la evidencia de que la Administración cumple su papel en el sistema, se optó no considerarla en el análisis de redes. Lo mismo sucedió con el entorno, todos los agentes manifestaron una estrecha relación con él, sin embargo, para centrar el análisis en las relaciones más vinculadas a la innovación se modeló una red de 89 actores pertenecientes a tres tipos de agentes: empresas, sistema público de I+D y organizaciones de soporte.

La Figura 1 presenta los resultados obtenidos mediante la técnica Multidimensional Scaling (MSD), que asigna una localización a cada uno de los actores en función de sus conexiones con el resto. Cada actor está representado por un nodo (un círculo para las empresas, un triángulo para los grupos de investigación y un cuadrado para las organizaciones de soporte), mientras que las flechas indican los acuerdos de colaboración para la innovación que manifiestan tener. La flecha sale del actor que dice tener una relación con su vecino. A simple vista parece obvio que se trata de una red muy tupida y que contiene un elevado número de nodos muy relacionados. Solo un nodo, (E10), está enteramente desconectado de la red, así como dos grupos de investigación (SP15 y SP16) que colaboran entre ellos pero no tienen conexión con el resto del sistema.

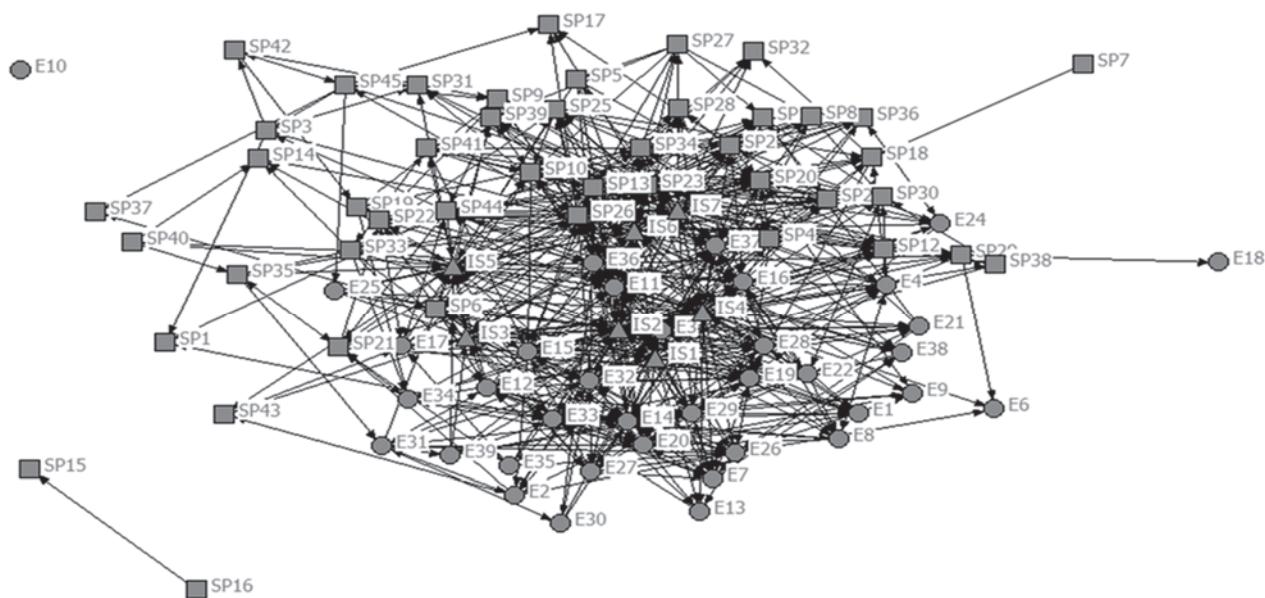


Figura 1. Red de relaciones en la MCG

Círculos: Empresas

Cuadrados: Sistema público de I+D

Triángulos: Organizaciones de soporte a la innovación

La empresa E10 es una unidad de I+D de una multinacional. Los grupos SP15 y SP16 son dos grupos de investigación del hospital, que colaboran entre sí, pero no con el resto (ni con los grupos de investigación de la universidad ni con las empresas). También es inmediato observar que las empresas colaboran, sobre todo, con otras empresas y lo mismo sucede con el sistema público de I+D, como indica el hecho de que los nodos de igual naturaleza estén próximos y relacionados entre sí. Teniendo en cuenta estas premisas, a continuación se analizan con más detalle las características principales de la red: densidad, cohesión y centralidad.

La densidad, que indica la proporción de relaciones que se dan respecto al total de posibilidades, es del 10,66%. Dado el alto número de nodos existentes, este resultado indica una densidad relevante en la red. En cuanto a la cohesión, ha sido estimada mediante la distancia, la alcanzabilidad, los puntos de corte y los cliqués.

La distancia entre los actores, esto es, el esfuerzo para que un actor alcance a otro en términos relationales, se sitúa de media a poco más de dos pasos del resto (2,3), es decir, con poco más de 1 intermediario. Destaca el hecho de que organizaciones de soporte a la innovación tengan los valores más bajos: 1 y 2 en casi todos los casos, indicando que se trata del agente con menor distancia geodésica al resto de la red. Estos actores, al estar más cerca de otros, pueden ejercer más influencia sobre ellos, además de absorber más fácilmente sus recursos basados en conocimiento.

En segundo lugar, la alcanzabilidad analiza si un actor es alcanzable por otro, esto es, si existe una conexión o un conjunto de conexiones entre ambos. Puede subrayarse que todos los nodos son alcanzables por el resto, salvo la empresa y los dos grupos de investigación del sistema público de I+D mencionados anteriormente. Esto indica que la red está bien estructurada. La existencia de muchos

actores no conectados apuntaría a una red desestructurada con posibilidad de subgrupos, pero la situación observada en la MCG es justo lo opuesto.

Los puntos de corte son aquellos agentes que si son eliminados desconectan la red. En la Milla, solo se encuentran dos: una empresa y un grupo de investigación. Ambos dividen la red en tres bloques. Si desaparecen, tendríamos un bloque formado por dos empresas, otro bloque formado por dos grupos de investigación y un tercer bloque formado por 83 nodos (todas las empresas menos dos y cuatro grupos de investigación). Por tanto, lo que desconectan son dos partes muy pequeñas de la red y el grueso permanece conectado. En definitiva, el reducido número de bloques y sus tamaños relativos indican que la red es muy fuerte, que está muy cohesionada y no se puede fracturar con facilidad.

Finalmente, un cliqué es un conjunto de nodos conectados mutuamente entre los que existe una alta densidad de relaciones [45]. Es decir, son regiones de la red densamente conectadas en las cuales la mayoría de los actores están directamente unidos con algún otro [46]. El número de cliqués de tres miembros (con relaciones directas y bidireccionales) es 53, lo que pone de manifiesto el alto nivel relational entre agentes de la MCG y lo tupido y fuerte de las relaciones. Al aumentar el tamaño mínimo del cliqué a 4, para intentar descubrir subgrupos importantes, aparecen 21. Si se aumenta una unidad más, se obtienen 3 subgrupos formados por agentes directamente ligados entre sí (Tabla 2): el primer subgrupo está formado por 6 organizaciones de soporte a la innovación, el segundo por tres organizaciones y dos grupos de investigación del sistema público de I+D, y el tercero por cinco empresas, lo que refuerza la idea apuntada anteriormente de que cada agente tiende a relacionarse consigo mismo, con la salvedad

de las organizaciones de soporte a la innovación. También es destacable la ligazón de los grupos 1 y 2 a través de dos organismos de soporte de la innovación, concretamente dos asociaciones empresariales, que se repiten en ambos subgrupos ampliando el círculo de relaciones. Este hecho pone de relieve el papel de intermediarios que éstos asumen en el nivel estructural de la red. La superposición de actores permite dar una idea del núcleo o círculo social de la red. En este caso las relaciones están muy cerradas, la red está muy

Tabla 2.

Cliqués en la MCG (al menos cinco miembros)

Cliqué 1	IS5	IS6	IS2	IS4	IS3	IS1
Cliqué 2	SP26	SP23	IS2	IS4	IS7	
Cliqué 3	E7	E19	E26	E27	E32	

cohesionada. A modo de resumen, todo ello permite incidir en la idea de que la cohesión es muy fuerte, tal como ha sido señalado con anterioridad.

Finalmente, de forma complementaria, se ha realizado un análisis de homofilia para analizar hasta qué punto son endogámicas las colaboraciones que indica el número de relaciones que tiene cada agente y con quién. La Tabla 3 muestra que las empresas se relacionan sobre todo consigo mismas: 207 relaciones de un total de 313 son con otras empresas de la MCG, lo que supone un 66,13% de sus relaciones. Asimismo, las empresas afirman tener 42 colaboraciones con los grupos de I+D y 64 con las organizaciones de soporte (un 13,43% y 20,44% del total respectivamente). La misma situación se repite con los grupos de investigación: 180 relaciones son entre ellos (un 55,38%).

Tabla 3.

Análisis de homofilia en la red de la MCG

	1	2	3	Total
1 Empresas	207	42	64	313
2 Sistema público de I+D	96	180	49	325
3 Instituciones de soporte	79	80	38	197

Las organizaciones de soporte, sin embargo, se configuran de nuevo como un agente central que se relaciona tanto con empresas (79 relaciones) como con grupos de investigación (80 relaciones), suponiendo entre ambos tipos de relaciones el 80,71% de las totales.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha abordado el estudio de la MCG, un territorio reconocido por constituir un caso de éxito en materia de innovación en el ámbito local. La cuestión analizada es si los distintos agentes allí ubicados están articulados e interactúan como un verdadero sistema local de innovación.

A nivel descriptivo se ha constatado que en la MCG están presentes con gran peso los cinco agentes que deben conformar un sistema de innovación: empresas, sistema público de investigación, agentes de soporte a la innovación, administración pública y entorno. Conviven en ese territorio un total de 39 empresas de base tecnológica,

42 grupos de investigación universitarios (especialmente profesores de ingeniería) y 3 grupos médicos de investigación (facultativos del hospital), 7 instituciones de soporte (entre las que destacan 2 centros tecnológicos y varias asociaciones empresariales), la administración pública físicamente instalada en la Milla (mediante un parque científico y tecnológico) y un entorno que aporta capital humano cualificado a los agentes, así como una demanda y una cultura tecnológica privada que se aprecia en buena parte de los contratos y la actividad de las empresas.

Mediante un análisis de redes se han examinado distintas características estructurales del malla de relaciones declaradas por los agentes que tienen que ver con la innovación. Es más, a efectos de remarcar las relaciones internas clave del proceso innovador se han excluido del modelado el entorno y la administración pública. Los resultados son con concluyentes: las colaboraciones constituyen una red de innovación densa, cohesionada y bien conectada. Prácticamente todos los individuos son alcanzables por el resto (sólo cuatro de 89 no lo son) y los puntos de corte no consiguen aislar a una parte importante de la red, sino partes mínimas. El conjunto de relaciones está dominado por las organizaciones de soporte a la innovación, lo que subraya su papel como intermediadoras y promotoras de la innovación. El análisis de los cliqués y de la homofilia, muestran su papel intermediador y de ligazón entre el resto de agentes. Tal hallazgo es totalmente coherente con la misión de estos agentes.

En el lado negativo habría que apuntar que tanto las empresas como los grupos de investigación públicos muestran cierta tendencia endogámica, al relacionarse en mayor medida consigo mismos y menos con el resto. Esta debilidad de relaciones entre empresas y agente público de investigación es un reflejo de las imperfecciones que presenta el sistema español de innovación en su conjunto, tal como se ha puesto de manifiesto en anteriores estudios [16]. Este problema lleva a cierto desaprovechamiento del potencial científico y tecnológico del sistema público de I+D y, con frecuencia, a un desajuste entre las líneas de investigación seguidas por los investigadores y las necesidades tecnológicas de las empresas.

Visto de forma global, el trabajo ha validado la existencia de un sistema de un sistema local de innovación y ha caracterizado la estructura de las relaciones entre sus agentes. En otros términos, se ha constatado que en la MCG el conjunto es mayor que la suma de las partes. La metodología utilizada también supone una aportación destacable, ya que ha permitido superar la mera descripción de las relaciones. Es más, el análisis de redes se presenta como una herramienta de gran potencial en este campo, facilitando la evaluación de las políticas públicas, orientando la I+D de los grupos investigadores, visibilizando el papel de los organismos de soporte y proporcionando información de los agentes mejor posicionados en términos relacionales. Las implicaciones de este trabajo son muy relevantes a nivel empresarial ya que, además de constatar empíricamente la existencia de un SLI, facilita un mapa de las relaciones y los mejores socios para

las empresas. También a nivel institucional es útil, puesto que muestra un camino de validación de las políticas públicas, en el campo de la innovación, así como las áreas de mejora. Para el futuro, sería interesante analizar si los agentes más centrales y colaboradores de la red a nivel local, también lo son a nivel nacional e internacional.

Referencias

- [1] Franko, L.G. Global corporate competition: who's winning, who's losing and the R&D factor as one reason why, *Strategic Management Journal*, 10 (5), pp.449-474, 1989.
- [2] Fusfeld, A. Formulating technology strategies to meet the global challenges of the 1990's, *International Journal of Technology Management*, 4 (6), pp. 249-283, 1989.
- [3] Mitchell, W. Whether and when? Probability and timing of incumbents' entry into emerging industrial subfields, *Administrative Science Quarterly*, 34, pp. 208-230, 1989.
- [4] Zahra, S.A. y Covin, J.G. Business strategy, technology policy and firm performance, *Strategic Management Journal*, 14, pp. 451-478, 1993.
- [5] Griliches, Z. R&D, Education and productivity, *Harvard University Press*, Massachusetts, 2000.
- [6] Audrestch, D. y Callejón, M. La política industrial actual: conocimiento e innovación empresarial, *Economía Industrial*, No 363, pp.33-46, 2007.
- [7] Arango Serna, M.D.; Branch Bedoya, J.W. y Pérez Ortega, G. Factores de innovación en marketing estratégico – Un caso aplicado al sector del mueble hogar en Itagüí. *Dyna*, 155 (75), pp.29-36, 2008.
- [8] Lopez-Mielgo, N.; Montes, J.M. y Vázquez, C.J. Innovation in the Spanish food and beverage industry. An integrated approach, *International Journal of Biotechnology*, 5, pp. 311–333, 2003.
- [9] Galende del Canto, J. La organización del proceso de innovación en la empresa española, *Economía Industrial*, 368, pp. 169-185, 2008.
- [10] Galanakis, K. Innovation process. Make sense using systems thinking, *Technovation*, 26, pp.1222-1232, 2006.
- [11] Godin, B. National Innovation Systems: The systems approach in historical perspective, *Working Paper*, 36, Project on the History and Sociology of STI Statistics, Canadá, 2007
- [12] Lundvall, B.A. National systems of innovation: Towards a theory of innovation and interactive learning, *Pinter*, London, 1992.
- [13] Rantisi, N.M. The local innovation system as a source of 'variety': openness and adaptability in New York City's garment district, *Regional Studies*, 36 (6), pp. 587-602, 2002.
- [14] De la Mothe, J. y Paquet, G. Local and regional systems of innovation, *Kluwer Academic Publishers*, Massachusetts, 1998.
- [15] Callejón, M.; Barge-Gil, A. y López, A. La cooperación público privada en la innovación a través de los centros tecnológicos, *Economía Industrial*, 366, pp. 123-132, 2007.
- [16] COTEC. Las relaciones en el sistema español de innovación. Libro blanco, *Fundación COTEC*, Madrid, 2007.
- [17] Buesa, M.; Martínez, M.; Heijs, J. y Baumert, T. Los sistemas regionales de innovación en España. Una tipología basada en indicadores económicos e institucionales, *Economía Industrial*, 347, pp. 15-32, 2002.
- [18] Storey, D.J. y Tether, B.S. Public policy measures to support new technology based firms in the European Union, *Research Policy*, 26 (9), pp. 1037-1057, 1998.
- [19] Martín de Castro, G.; López Sáez, P. y Murcia Rivera, C. El compromiso de Indra con la innovación como clave de actividad de la empresa, *Economía Industrial*, 366, pp. 211-219, 2007.
- [20] Robledo, J. De los grupos consolidados de investigación a los sistemas dinámicos de innovación: el desafío actual del desarrollo científico y tecnológico colombiano, *Dyna*, 152 (74), pp. 1-7, 2007.
- [21] Harmon, B.; Ardashvili, A.; Cardozo, R.; Elder, T.; Leuthold, J.; Parshall, J.; Raghian, M. y Smith, D. Mapping the university technology transfer process, *Journal of Business Venturing*, 12, pp. 423-434, 1997.
- [22] Metlich, A.I. Contribuciones de la teoría de la organización a la productividad científica, *Innovar*, 16 (27), pp. 132-137, 2006.
- [23] Monroy Varela, S.E. Nuevas políticas y estrategias de articulación del sistema de ciencia, tecnología e innovación colombiano, *Innovar*, 16 (28), pp. 157-172, 2006.
- [24] Blanco Valbuena, C. y Peña Lagazkue, I. Comportamiento de empresas intensivas en tecnología: el caso de los parques tecnológicos de la CAPV, *Economía Industrial*, 366, pp. 169-180, 2007.
- [25] Jiménez Luque, G. y Tesa Fernández, J. Parques científico-tecnológicos y su importancia en los sistemas regionales de innovación, *Economía Industrial*, 363, pp. 167-198, 2007.
- [26] Storper, M. The limits of the globalization: Technology districts and international trade, *Economic Geography*, 68, pp. 60-93, 1992.
- [27] Harrison, B. Industrial districts: Old wine in new bottles?, *Regional Studies*, 26, pp. 469-483, 1991.
- [28] Russo, M. Relazioni tra imprese e sviluppolocale, *Economia e Politica Industriale*, 93, pp. 105-137, 1997.
- [29] Paniccia, I. The performance of IDs. Some insights from the Italian case, *Human Systems Management*, 18, pp. 141-159, 1999.
- [30] Molina-Morales, F.X.; Capó-Vicedo, J.; Tomás-Miquel, J.V. y Expósito-Langa, M. Análisis de las redes de negocio y de conocimiento en un distrito industrial. Una aplicación al distrito industrial textil valenciano *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*, 15, pp. 94-102, 2012.
- [31] Lorenz, E.H. Trust, community, and co-operation. Toward a theory of industrial districts, En: *Pathways to Industrialization and Regional Development* (Eds. M. Storper y A.J. Scott), Routledge, Londres, 1992.
- [32] Dei Ottati, G. Co-operation and competition in the industrial district as an organizational model, *European Planning Studies*, 2, pp. 29-49, 1994.
- [33] Foss, N.J. y Koch, C.A. Opportunism, organizational economics and the network approach, *Scandinavian Journal of Management*, 12, pp. 189-205, 1995.
- [34] Marshall, A. *Principles of economics*, Macmillan, London, 1890.
- [35] Becattini, G.; Bellandi, M. y De Propris, L. A handbook on industrial districts. Cheltenham, Edward Elgar, 2009.
- [36] Irurzun, J.G.; Mondéjar, J.A.R. y Armenteros, S.H. Entrepreneurs and business networks in contemporary Andalucía, *Revista de Historia Industrial*, 22 (51), pp. 107-140, 2013.
- [37] Becerra, F. y Serna, H.F. Local entrepreneurial networks and their effect on innovation in companies, *Revista Venezolana de Gerencia*, 17 (57), pp. 113-131, 2012.
- [38] Brenner, T. Local industrial clusters. Existence, emergence and evolution, Routledge, London, 2004.
- [39] Becattini, G. Del distrito industrial marshalliano a la «teoría del distrito» contemporánea. Una breve reconstrucción crítica, *Investigaciones Regionales*, 1, pp. 9-32, 2002.
- [40] Borgatti, S.P.; Everett, M.G. y Freeman, L.C. *Unicet for Windows: software for social network analysis*. Analytic Technologies, Harvard, 2002.
- [41] Boschma, R.A. y TerWal, A.L.J. Knowledge networks and innovative performance in an industrial district: the case of a footwear district in the South of Italy, *Industry & Innovation*, 14, pp. 177-199, 2007.
- [42] Morrison, A. 'Gatekeepers of knowledge' within industrial districts: who they are, how they interact, *Regional Studies*, 42, pp. 817-835, 2008.

- [43] Giuliani, E. The selective nature of knowledge networks in clusters: evidence from the wine industry, *Journal of Economic Geography*, 7, pp. 139-168, 2007.
- [44] Ramfrez-Pasillas, M. International trade fairs as amplifiers of permanent and temporary proximities in clusters, *Entrepreneurship and Regional Development*, 22, 155-187, 2010.
- [45] Miceli, J.E. Los problemas de validez en el análisis de redes sociales: algunas reflexiones integradoras, *REDES, Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales*, 14, 1, 2008.
- [46] Mizruchi, M.S. Social networkanalysis: recent achievements and current controversies, *Acta Sociológica*, 37, pp. 329-343, 1994.

Soil management instruments for social housing: Case analysis

Instrumentos de gestión de suelo para vivienda de interés social en Colombia: Análisis de caso

César García-Ubaque ^a, César Augusto Henao-Trujillo ^b & Martha Vaca-Bohórquez ^c

^a Ph.D, Profesor Asistente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia cagarciau@udistrital.edu.co.

^b M.Sc., Profesional especializado Ministerio de Vivienda, Colombia chenao@minvivienda.gov.co.

^c M.BA. Consultora-Investigadora, Colombia ml.vaca68@uniandes.edu.co.

Received: April 23th, 2013. Received in revised form: October 24th, 2013. Accepted: November 13th, 2013

Abstract

Land availability is an essential prerequisite for providing housing solutions; however, access to this soil faces administrative, regulatory and technical obstacles that cause chaotic urbanization processes in the main cities of the country. This article discusses management tools for soil availability in current legislation and used in projects developed by Metrovivienda in Bogotá D.C. As a result, we found that the main issues are: scarcity and high land prices and the persistent phenomenon of illegal urbanization aim to meet the unsatisfied demand, especially for people in informal labor market. Currently Public Housing Policy focuses primarily on subsidies to demand allocation and implementation of housing construction projects, but it is necessary the articulation of this Policy with a Public Land Policy that regulates use and land market. Otherwise, a long-term planning and will be very difficult to reduce the gap between supply and demand for housing and achieve an efficient, equitable and orderly development for the city.

Keywords: construction, housing, regulations, urban planning, urbanism.

Resumen

Disponer de suelo urbanizable es requisito indispensable para cumplir el propósito de brindar viviendas a la población, pero, el acceso a este suelo enfrenta obstáculos de tipo técnico, administrativo y normativo, que generan procesos caóticos de urbanización en las principales ciudades del país. En este artículo se analizan los instrumentos de gestión de suelo disponibles y utilizados en proyectos desarrollados por Metrovivienda en la localidad de Bosa en Bogotá D.C. Como resultado, se encuentra que las principales causas son: la escasez y los altos precios del suelo urbanizable y la persistencia del fenómeno de urbanización ilegal que pretende cubrir la demanda insatisfecha, especialmente para población no vinculada al mercado laboral formal. La Política Pública de Vivienda se enfoca principalmente en la asignación de subsidios a la demanda y la implementación de proyectos de construcción, pero, sin una Política Pública de Suelo que regule el uso y mercado, no se podrá planear a largo plazo y será muy difícil disminuir la brecha entre la oferta y la demanda de viviendas y lograr un desarrollo eficiente, equitativo y ordenado de la ciudad.

Palabras Clave: construcción, planificación urbana, regulaciones, urbanismo, viviendas.

1. Introducción

El crecimiento urbano acelerado sumado a las dificultades de acceso al suelo, constituyen un problema de carácter público que requiere atención y respuesta por parte del Estado [1-2]. El fenómeno de escasez de suelo en medio de un modelo de libre mercado inmobiliario conlleva a que su precio se eleve, especialmente en áreas céntricas debido a las dinámicas económicas que se generan alrededor de la conectividad (vías, comunicaciones y redes, entre otros). Como consecuencia la demanda tiende a trasladarse hacia la periferia de las ciudades, provocando fenómenos de segregación y exclusión, especialmente para la población de escasos recursos. Las fallas en la respuesta gubernamental para ofrecer vivienda a los más pobres, la financiación

insuficiente y fragmentada, el creciente déficit cuantitativo de vivienda y la ausencia de mecanismos de control, permiten condiciones que favorecen el surgimiento de procesos de urbanización ilegal y de urbanizadores piratas, profundizando la exclusión y vulnerabilidad social [3].

La habilitación de tierras urbanas y la gestión del suelo en Colombia se encuentran ligados a la posibilidad de desarrollar proyectos urbanos integrales en su totalidad, es decir, proyectos que generan soluciones habitacionales que incluyan el suministro de servicios públicos, educación, vías y zonas recreativas, mejorando la calidad de vida de la población tanto a escala zonal como metropolitana para de esta manera contrarrestar la consolidación de un modelo de ciudad excluyente y segregada. Sin embargo, este proceso enfrenta una serie de obstáculos de orden tanto técnico,

como administrativo y normativo; pero, su mayor dificultad radica en la ausencia de una política de suelo que logre articularse con las políticas de vivienda y que permita una visión de largo plazo orientada al desarrollo ordenado de las ciudades [4-5].

En este contexto surge la necesidad de generar mecanismos de intervención pública que permitan a la autoridad gubernamental dar respuesta a la problemática habitacional, específicamente instrumentos de gestión del suelo, elementos *sine qua non* de cualquier política de vivienda y componentes clave de la planeación urbana y regional [6]. Estos instrumentos, deben acoplarse con la política pública de suelos como parte de una política marco de vivienda orientada a las categorías de población de bajos ingresos, se deben idear soluciones integrales que respondan a un enfoque amplio y no parcial o inmediatista sobre los temas de vivienda en el país.

En este artículo se analizarán los instrumentos de gestión de suelo utilizados en los siguientes proyectos de vivienda de interés social VIS en la ciudad de Bogotá: Proyectos “Ciudadela El Recreo”, “Ciudadela El Porvenir” y “Campo Verde” en la localidad de Bosa.

2. Marco conceptual

Cualquier tipo de “déficit” relacionado con asuntos sociales, denota una brecha que es preciso superar con el fin de lograr una meta compartida de progreso social. Esta brecha se entiende como la distancia entre una situación observada y una norma, que incorpora las valoraciones predominantes sobre las condiciones mínimas de vida generalizables a todos los miembros de un grupo o comunidad. En una dimensión técnica, el déficit expresa “la demanda potencial adicional que es preciso cubrir” [7].

En lo que se refiere al déficit de vivienda, se han planteado aspectos tanto cuantitativos como cualitativos. El déficit cuantitativo se refiere al número de hogares que carecen de vivienda propia y el déficit cualitativo da cuenta de las condiciones habitacionales, de las carencias que se destacan en las viviendas con relación a los atributos propios de lo que se considera es una vivienda digna [8].

El concepto de vivienda puede ser abordado desde dos perspectivas que se relacionan con el valor o sentido que se le otorga. Por un lado, se encuentra la vivienda como respuesta a necesidad de habitar y en este sentido tiene un valor de uso que aporta bienestar, pertenencia a un lugar y soporte material tanto de la familia como de la construcción de ciudad. Por otra parte, la vivienda y en consecuencia el suelo, también se considera como un bien, una mercancía susceptible de intercambio, por tanto tiene un valor de transacción que está sujeto a condiciones tales como: costo del suelo, materiales con la que es construida, equipamientos y redes o interconexiones que permiten mayor movilidad. Como bien costoso y de difícil adquisición, su posesión genera además, rentas, impuestos, tasas, valorizaciones y plusvalías que la convierten en mecanismo generador de exclusión. Por lo anterior, la falta de vivienda es una grave carencia social que tiene estrecha

relación con la pobreza [9].

Colombia ha experimentado un proceso de urbanización que ha derivado en que tres cuartas partes de la población habite en centros urbanos y dichas transformaciones han repercutido en el incremento de la demanda de unidades de vivienda generando así un déficit cuantitativo en zonas urbanas, que se ha triplicado, de acuerdo con las cifras reportadas por los censos de 1985 a 1993 y 1993 a 2005 [10]. Este proceso acelerado de urbanización, se ha visto reflejado en el crecimiento desordenado de sus principales centros urbanos, especialmente Bogotá.

La causa más importante para el aumento de este déficit no ha sido únicamente la disminución en la producción de vivienda, sino una sinergia entre las siguientes condiciones:

- Disminución de la producción de vivienda por parte del Estado y un aumento en la demanda.
- Falta de estabilidad económica necesaria para permitir el cierre financiero del proceso de adquisición de vivienda por parte de las familias a las que están dirigidos los proyectos de vivienda de interés social VIS y vivienda de interés prioritario VIP.
- Baja oferta de tierra urbanizada y limitadas posibilidades de urbanizar suelos potencialmente urbanizables, que llevan a incrementos por encima de la inflación en el precio de la tierra en las grandes, afectando consecuentemente los precios finales de las viviendas [11].

En la Figura 1, se muestra la dinámica que se genera a partir de la escasez de suelo para la construcción de vivienda sobre los precios del producto final.



Figura 1. Cadena de necesidades para la generación de suelo para proyectos de VIS y VIP.

Tradicionalmente la gestión del suelo y en general el desarrollo urbano en Bogotá se ha planteado principalmente con relación solo a la variable déficit de vivienda; y desde luego, disminuir el índice de familias que carecen de techo es prioritario, pero, la ausencia de una visión global y a largo plazo que permita vincular la política de vivienda a una política de suelo dificulta seriamente el desarrollo ordenado de la ciudad [12]. Adicional a lo anterior, las respuestas fragmentadas por parte del gobierno y de un mercado distorsionado por el libre juego de la oferta y la demanda ocasiona la explosión de asentamientos informales (vía elevación de los precios del suelo), caracterizados por una inadecuada infraestructura y desconectados de la planificación urbana [13]. Como se esquematiza en el gráfico 1, el aumento del precio genera escasez de suelo urbanizable, situación que limita al gobierno distrital para la generación de proyectos de VIS y de VIP.

Los instrumentos para la producción de vivienda, se

pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado, las políticas que actúan desde el lado de la oferta, como la construcción de vivienda por parte de instituciones públicas, de instituciones privadas y/o facilidades en la consecución de tierra urbanizable, bonificación en la tasa de interés y la fijación de estándares mínimos. Y de otra parte, están las

políticas que actúan del lado de la demanda, como subsidio de ingresos o condiciones de destinación específica para vivienda, divisibles a su vez en subsidios (ver Figura 2). Las políticas que actúan desde el lado de la oferta caracterizan a un Estado “constructor” y las que actúan por el lado de la demanda son propias de un Estado “facilitador”.

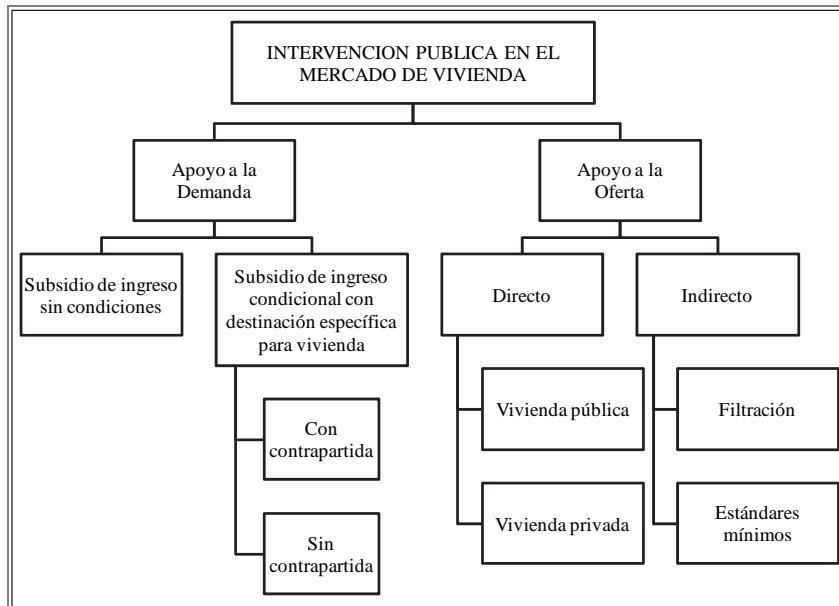


Figura 2. Intervención pública en el mercado de vivienda [13].

2.2. *La incidencia del costo del suelo en el precio de la vivienda*

Según Molina, la escasez de suelo urbano en la ciudad, no solo limita su expansión física sino que también impacta su precio. Entre 1990 y 2005, el comportamiento de los precios del suelo en la ciudad han tenido una tasa de crecimiento real de cerca del 45% y con un pico muy alto en 1995 y donde el incremento del precio respecto al año inicial de referencia fue de 130% aproximadamente [1].

El valor del lote en bruto de una vivienda de interés social representa el 13% de su precio final. Lo cual implica que el precio de un metro cuadrado de construcción debe valer 8 veces el precio del suelo en bruto. Con base en los precios reportados por la Lonja de Propiedad Raíz de Bogotá, el menor precio registrado en la ciudad se encuentra en el barrio Jerusalén (Localidad de Ciudad Bolívar), de \$115.000 por metro cuadrado (m²), lo cual implicaría un precio de venta de \$920.000 por m² construido, lo que hace imposible la oferta competitiva de vivienda en el mercado formal [1].

Esta situación de precios especulativos en el suelo urbano de Bogotá, genera un desplazamiento de la construcción de vivienda social hacia las áreas de expansión urbana en donde el rango de precios del tiende a ser menor de \$35.000 por m², pero en este caso, la barrera de producción no es tanto la tierra en bruto, sino los riesgos de tipo geológico, la posibilidad de dotación efectiva de servicios públicos domiciliarios y la conectividad con la ciudad.

2.3. *Los instrumentos de gestión del suelo de un operador de proyectos para VIS – VIP*

Como se analizó anteriormente, el suelo es un asunto decisivo dentro de una política habitacional y de construcción de ciudad. Hoy, el suelo se encuentra en una economía de libre mercado que conlleva una presión sobre su precio y el Estado enfrenta limitaciones para proveer vivienda a la población más vulnerable, pues el precio del suelo disponible debe ser compatible con el máximo presupuestado para la gestión de proyectos de VIS y de VIP. En la Ley 388 de 1997 se establecieron una serie de instrumentos que pretenden asegurar esta disponibilidad, los cuales son conocidos como *instrumentos de gestión del suelo* y le permiten a la autoridad pública intervenir en el mercado del suelo en pro del bienestar colectivo.

La gestión del suelo se define como el conjunto de intervenciones de las entidades públicas sobre el mercado de la tierra, tendientes a corregir evoluciones socialmente inaceptables e ineficientes en materia económica y/o ecológicamente peligrosas, dada la naturaleza económica de la tierra. De manera aun más simple, todas las acciones tendientes a asignar una utilización a los terrenos [14].

Algunos de los instrumentos que propone la Ley 388 de 1997 para incidir en la operación del mercado del suelo urbano son:

- El impuesto predial. Es un impuesto local general a la propiedad inmobiliaria. Sostiene los gastos de infraestructura y de operación de la ciudad y su objetivo es de tipo fiscal, puesto que se trata de buscar recursos

para la creación, operación y mantenimiento de la estructura urbana.

- Recuperación de plusvalías. Por plusvalía se entiende el aumento de precio de un bien. Existen algunos instrumentos que gravan estos aumentos. Uno de ellos es la *contribución a la valorización* que busca recuperar los costos en que incurre el Estado al realizar obras públicas que afectan los precios inmobiliarios. Otro es la *participación en plusvalías* que tiene como base los aumentos de los precios del suelo que se encuentren relacionados con cambios en la reglamentación urbana. El *suelo creado* es otro mecanismo de recuperación de plusvalías, que consiste en cobrar una tasa proporcional a la construcción adicional que se realice y que supera la normativa de la edificabilidad básica.
- Medidas para activar el mercado. Algunos instrumentos tienen por objetivo estimular el mercado y entre ellos se dispone de: el *impuesto predial especial para inmuebles subutilizados y tarifas progresivas*, que son gravámenes que se imponen a inmuebles en esta condición con el fin de desestimular la retención de tierras. El *régimen de desarrollo prioritario* consiste en que a los lotes que la autoridad gubernamental desea desarrollar se les impone un régimen especial que obliga a sus propietarios a construirlos en un plazo determinado, si no lo hacen, la autoridad puede adquirirlos de forma compulsiva y eventualmente a un precio menor que el de mercado (por ejemplo, al valor del avalúo catastral, que con frecuencia es menor que el precio comercial) o puede enajenarlos mediante subasta pública. También existen los *bancos de tierras*, que son un instrumento que tiene por objetivo regular las alzas de los precios del suelo, mediante la oferta estatal de tierras realizada de manera anticíclica. La *expropiación* es un instrumento que equivale a la enajenación forzada y finalmente se dispone del mecanismo de *reajuste de tierras*, que permite al Estado establecer nuevas divisiones en los terrenos de manera que respondan de mejor manera a la lógica espacial de futuros desarrollos.

La Ley 388 de 1997 clasifica los *instrumentos de gestión del suelo* en 4 grupos de acuerdo con los objetivos que persigue cada uno. Esta clasificación se puede ver en la Tabla 1.

- *Garantizar un reparto equitativo de cargas y beneficios* derivados del ordenamiento urbano para el desarrollo de proyectos. Pretende generar un equilibrio financiero e incentivar al sector privado para participar en este tipo de procesos.
- *Intervención en la morfología urbana y en la estructura predial*. Busca que el propietario de la tierra participe en los procesos urbanos de desarrollo, y se promuevan formas asociativas que faciliten el desarrollo y financiación de proyectos urbanos.
- *Adquisición de inmuebles y predios para el desarrollo de operaciones urbanísticas*. Mecanismos de enajenación o expropiación para obtener el suelo requerido.

- *Dinamizar el desarrollo de sectores inactivos de las áreas urbanas*. Declaración áreas para ser desarrolladas.

Tabla 1.

Instrumentos de Gestión del suelo.

Objetivo	Mecanismos relacionados	Normatividad
Garantizar el reparto equitativo de cargas y beneficios derivados del ordenamiento urbano	<ul style="list-style-type: none"> • Unidades de Actuación Urbanística (UAU) • Compensaciones 	Ley 388 de 1997 (artículos 38 a 44) Ley 388 de 1997 (artículos 48, 49 y 122) y Decreto 151 de 1998
	<ul style="list-style-type: none"> • Transferencia de derechos 	Ley 388 de 1997 (arts.88 a 90) y Decreto 151 de 1998
Intervenir en la morfología urbana y en la estructura predial y generar formas asociativas entre los propietarios con el fin de facilitar el desarrollo y financiación de proyectos urbanos.	<ul style="list-style-type: none"> • Reajuste de suelos • Integración inmobiliaria • Cooperación entre partícipes 	Ley 9 ^a de 1989 (arts. 25, 77 y 78) y Ley 388 de 1997 (arts. 45 a 47) Ley 9 ^a de 1989 (arts. 25, 77 y 78) y Ley 388 de 1997 (arts. 45 a 47) Ley 9 ^a de 1989 (arts. 25, 77 y 78) y Ley 388 de 1997 (arts. 45 a 47)
Facilitar la adquisición de inmuebles y predios para el desarrollo de operaciones urbanísticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Enajenación voluntaria • Enajenación forzosa • Expropiación por vía administrativa • Expropiación por vía judicial • Derecho de preferencia 	Ley 9 ^a de 1989 (arts.9, 13, 14, 16 y 17) y Ley 388 de 1997 (arts.58 a 62) Ley 388 de 1997 (arts. 52 a 57) Ley 9 ^a de 1989 (arts.20, 22, 23 a 25) y Ley 388 de 1997 (Cap. VIII) Ley 9 ^a de 1989 (art.20) y Ley 388 de 1997 (arts.58, 60 y 62) Ley 9 ^a de 1989 (arts. 73 y 74)
Dinamizar el desarrollo de sectores inactivos de las áreas urbanas.	<ul style="list-style-type: none"> • Declaratoria de desarrollo prioritario • Derecho de preferencia 	Ley 388 de 1997 (arts.40, 44 y 52 a 54) Ley 9 ^a de 1989 (arts. 73 y 74)

A continuación se amplía la información de cada uno de estos objetivos:

Los *instrumentos de gestión del suelo* son utilizados para obtener la tierra que permita el desarrollo de proyectos urbanos, pero es importante tener en cuenta la caracterización socioeconómica de los propietarios de la tierra como un factor determinante en la negociación y obtención de la titularidad del suelo. En el análisis que se realizará para los casos seleccionados, se utilizarán las siguientes categorías que comprenden el perfil y el tipo de tenedor y la situación jurídica del inmueble (ver Tabla 2).

De acuerdo con lo anterior, los mecanismos que definen tanto la Ley 9^a de 1989 como la Ley 388 de 1997, son las herramientas con las que cuentan los Bancos de Tierra y los Operadores Urbanos para desarrollar proyectos de vivienda.

Tabla 2.

Caracterización socioeconómica, grados de dificultad para gestionar el suelo e instrumentos de gestión.

Variables	Características	Grado de dificultad					Instrumento de gestión del suelo que debe ser utilizado.
		1	2	3	4	5	
Perfiles del Tenedor	AGRICULTOR o CAMPESINO	X					<ul style="list-style-type: none"> • Enajenación Voluntaria. • Cooperación entre participes.
	CITADINO	X					<ul style="list-style-type: none"> • Enajenación Voluntaria. • Expropiación por vía Administrativa.
	RENTISTA	X					<ul style="list-style-type: none"> • Cooperación entre participes. • Enajenación Voluntaria. • Expropiación por vía Administrativa.
Tipo de Tenedor	PROPIETARIO	X					<ul style="list-style-type: none"> • Cooperación entre participes. • Enajenación Voluntaria.
	POSEEDOR		X				<ul style="list-style-type: none"> • Expropiación por vía Administrativa.
	MERO TENEDOR		X				<ul style="list-style-type: none"> • Enajenación Voluntaria con el propietario. • Cooperación entre participes.
Estudio de Títulos	PROPIETARIO FIDUCIARIO	X					<ul style="list-style-type: none"> • Cooperación entre Participes.
	SANEAMIENTO		X				<ul style="list-style-type: none"> • Enajenación Voluntaria.
	LIBRE		X				<ul style="list-style-type: none"> • Enajenación Voluntaria.
	POSIBLES SUCESIONES		X				<ul style="list-style-type: none"> • Expropiación por vía Administrativa.

NOTA: en todos los casos se debe agotar primero el recurso de adquirir el suelo de forma directa, en segundo lugar, se deberá optar por expropiar por vía administrativa evitando al máximo la expropiación por vía judicial.

1 = Bajo ; 2 = Medio bajo ; 3 = Medio ; 4 = Medio alto ; 5 = Alto.

3. Metodología

El análisis de los instrumentos de gestión de suelo en los proyectos El Recreo, El Porvenir y Campo Verde en la Localidad de Bosa, es importante por el hecho de ser los más grandes que ha adelantado Metrovivienda hasta la fecha.

3.1. Caracterización de la localidad de Bosa

La mayor parte del área de la localidad se encuentra destinada a vivienda y existe predominio de asentamientos espontáneos. En términos generales no se cumple con normas de sismo resistencia, planificación, urbanismo y/o paisaje urbano, por lo que en su desarrollo no se han reservado áreas para espacios públicos, vías y/o zonas verdes. Estos procesos informales no solo han conducido al surgimiento de viviendas con un mínimo de habitabilidad,

sino que estas áreas, denominadas subnormales o ilegales, además de tener un alto riesgo de inundación, conllevan a la aparición de conflictos de tipo social derivados de las carencias a las que están sometidos sus habitantes. Adicionalmente, los proyectos analizados tienen dificultad para conectarse con las principales avenidas que sirven a la localidad como son la Autopista Sur, Avenida Primera de Mayo, Avenida Ciudad de Villavicencio, Avenida Dagoberto Mejía y Avenida Bosa.

3.2. Proyectos de Metrovivienda en la localidad de Bosa

Para el desarrollo de un proyecto urbanístico de VIS - VIP, a través de Metrovivienda, se tienen en cuenta aspectos como: el proyecto en sí mismo y su entorno urbano, el perfil socio-económico de los futuros habitantes, los gustos, hábitos y costumbres de abastecimiento de bienes y servicios y el perfil de los comerciantes de distintas modalidades que podrían establecerse en las áreas de interés.

Los proyectos analizados suman en conjunto 283 hectáreas (Ha), con una programación de 31.825 soluciones habitacionales para cerca de 90.000 habitantes. De este total, la Ciudadela “El Porvenir”, constituye el 56% del total de soluciones de vivienda, la Ciudadela El Recreo representa el 38% y Campo Verde el 6%. En la tabla 3 se analizan las variables del proceso de generación de suelo y el tipo de operador para los tres proyectos.

Tabla 3.

Elementos de análisis a partir de las experiencias de los proyectos El Recreo, El Porvenir y Campo Verde.

PROCESO	Variable	El Recreo	El Porvenir	Campo Verde
Esquema del proceso de generación del suelo y desarrollo del proyecto	Estructura Predial (F = fragmentación)	15 predios/11 5 ha F = 0.13	556 predios /132 ha F = 4.21	1 predio/36 ha F = 0.03
	Características socio-económicas	Predios en área de expansión urbana con uso agrícola.	Predios en área de expansión urbana con uso agrícola.	Predios en área de expansión urbana con uso agrícola.
	Tipos de comprador final.	Constructora privada y Cajas de compensación familiar.	Constructora privada y Cajas de compensación familiar.	Fiduciaria (Constructora Bolívar, Amarillo, Marval y Metrovivienda)
Operador de Proyectos	Instrumentos de gestión del suelo	Enajenación voluntaria	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	Cooperación entre participes.
	Tiempo	4 años	Inicio en el 2002 y a la fecha no se ha terminado la gestión del suelo.	Inicio en el 2004 y a la fecha no se ha concertado por la acción popular interpuesta debido a la presencia de humedales.

Continuación Tabla 4.

Elementos de análisis a partir de las experiencias de los proyectos El Recreo, El Porvenir y Campo Verde.

PROCESO	Variable	El Recreo	El Porvenir	Campo Verde
	Precio del suelo inicial.	\$25.000 m ² aprox.	\$27.000 m ² aprox. Cabe resaltar que el precio final aumenta por las decisión del juez que se imparte por el avalúo solicitado y designado al perito.	Aportes al proyecto.
Urbanismo	En tres etapas de desarrollo.	En once etapas de desarrollo. Proyecto en gestión.	Se hará en dos etapas.	
Construcción de VIS y VIP	Se construyó en 10 años	No se ha terminado de construir.	No se han iniciado obras ni licencias.	

De la tabla anterior se aprecia que la fragmentación de los tres proyectos analizados presenta diferencias considerables y es evidente el gran contraste presentado entre la Ciudadela El Recreo y la Ciudadela El Porvenir, que cuentan con áreas similares pero con índices de fragmentación muy diferentes.

Para el análisis de los instrumentos utilizados en cada proyecto, se utilizará la calificación del grado de dificultad presentada en la tabla 4, además de variables como el perfil y tipo de tenedor y el estado jurídico del terreno.

A cada uno de los instrumentos de gestión de suelo se le asigna un puntaje de acuerdo con el grado de dificultad, siendo 1 el instrumento con menor dificultad y 5 el de mayor dificultad:

1. Enajenación voluntaria
2. Cooperación entre partícipes
3. Enajenación forzosa
4. Expropiación por vía administrativa
5. Expropiación por vía judicial

Las tablas 4, 5 y 6 reportan el proceso que se siguió en cada proyecto para tener acceso al suelo y desarrollar el proyecto y se califica el grado de dificultad según el instrumento utilizado.

Tabla 5.

Ánalisis de los instrumentos de gestión del suelo utilizados en la Ciudadela El Recreo.

Características	Instrumento utilizado	Grado de dificultad
PERFIL DE TENEDOR		
RENTISTA	Enajenación voluntaria	X
TIPO DE TENEDOR		
PROPIETARIO	Enajenación voluntaria	X
ESTUDIO DE TÍTULOS		
SANEAMIENTO	Enajenación voluntaria	X
LIBRE	Enajenación voluntaria	X
TOTAL		4 Medio-Bajo

De acuerdo con esta información, el instrumento de gestión utilizado fue la *enajenación voluntaria* (calificado

con bajo nivel de dificultad), siendo este un factor importante que facilitó la compra de tierras, la constitución de englobes y urbanización, las licencias de urbanización y la ejecución de las obras de infraestructura. Como consecuencia, esta fase duró menos de 2 años y para el año 2009 ya se encontraba totalmente terminado y habitado.

Tabla 6.

Ánalisis de los instrumentos de gestión del suelo utilizados en la Ciudadela El Porvenir.

Características	Instrumento utilizado	Grado de dificultad
PERFIL DE TENEDOR		
AGRICULTOR o CAMPESINO	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
CITADINO	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
RENTISTA	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
TIPO DE TENEDOR		
PROPIETARIO	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
POSEEDOR	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
MERO TENEDOR	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
ESTUDIO DE TÍTULOS		
SANEAMIENTO	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
LIBRE	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
POSIBLES SUCESIONES	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
TOTAL		9 Alto

A diferencia de la Ciudadela El Recreo, el *índice de fragmentación* en la Ciudadela El Porvenir, ha demorado el proceso de gestión del suelo, adicional a una conformación predial densa. Los *instrumentos de gestión del suelo* utilizados en este proyecto han sido la enajenación voluntaria y la expropiación por vía judicial y este último ha impactado considerablemente los tiempos de la ejecución de la obras debido a los procesos judiciales para la entrega de los inmuebles, dificultando los englobes, la constitución de urbanización, las licencias y la ejecución de las obras de infraestructura.

Tabla 7.

Ánalisis de los instrumentos de gestión del suelo utilizados en la Ciudadela Campo Verde.

Características	Instrumento utilizado	Grado de dificultad
PERFIL DE TENEDOR		
AGRICULTOR o CAMPESINO	Cooperación entre partícipes	X
TIPO DE TENEDOR		
PROPIETARIO FIDUCIARIO	Cooperación entre partícipes	X
ESTUDIO DE TÍTULOS		
LIBRE	Enajenación voluntaria y Expropiación vía judicial	X
TOTAL		3 Bajo

La ausencia de fragmentación predial permitió el uso del instrumento de gestión de suelo denominado *Cooperación entre partícipes*. Pero, a pesar de que este esquema permite un mayor grado de agilidad en el desarrollo del proyecto urbanístico, una acción popular interpuesta por la presencia de humedales en la zona, ha hecho que el proyecto no haya iniciado obras.

4. Resultados y análisis

La ciudad es consciente de la grave problemática de hábitat que enfrenta en la actualidad y que acumuló durante mucho tiempo, generando un elevado déficit tanto de tipo cuantitativo como cualitativo. Entre las principales razones que han venido generando esta situación están: la escasez y los altos precios del suelo urbanizable y la persistencia del fenómeno de urbanización ilegal que pretende cubrir la demanda insatisfecha, especialmente para población no vinculada al mercado laboral formal. Todo esto conlleva al deterioro urbano en diversas áreas de la ciudad,

Los asentamientos populares, que son el resultado de un mercado inmobiliario excluyente, han sido “tolerados” por varios años de insuficiente voluntad política para promover y sostener iniciativas de largo plazo a nivel de vivienda.

Cabe precisar que no han sido pocos los obstáculos para el desarrollo de la reglamentación y la aplicación de los instrumentos contemplados en la Ley 388 de 1997. En primer lugar, la incertidumbre generada en los distintos actores sociales (propietarios de suelo y constructores) por tener que resolver la tensión entre la función social de la tierra por un lado y el respeto por la propiedad privada. También está la dificultad para generar interlocución amplia en torno al uso de estos instrumentos de planificación, de gestión urbanística y del suelo y adicionalmente, los procesos de evaluación económica y social de los proyectos a la luz de las normas, y muy especialmente en el tema de cargas, beneficios e incidencias sobre el bienestar de la ciudad [15].

La Política de suelo expuesta en el Plan de Ordenamiento Territorial de la ciudad, traza en resumen la protección de los suelos ambientales, los usos del suelo y los tratamientos urbanísticos, pero no incluye la articulación de dos componentes que inseparables: a) *Constitucional* y b) *Distrital*, que puedan integrarse con los Instrumentos de Gestión del Suelo que han sido las herramientas para las actuaciones urbanísticas en el territorio.

En la Grafica 3, se presenta una propuesta de estructura general para la *Política Pública de suelo* integrando los elementos propuestos. Dicha *política* se articula con una visión propia de la economía del suelo y de sus externalidades, partiendo de los presupuestos de la Constitución política sobre el principio de la *función social de la propiedad y la intervención de estado* para garantizar el derecho a la vivienda como un primer componente. El segundo componente, se entendería como el lugar o territorio en donde la política tendría impacto (nivel Distrital, en el caso de Bogotá), aquí se aplicarían instrumentos específicos como la *creación de bancos de*

tierras y operadores urbanos, que regulen los precios en el mercado de suelo mediante los usos que define el Plan de Ordenamiento Territorial.

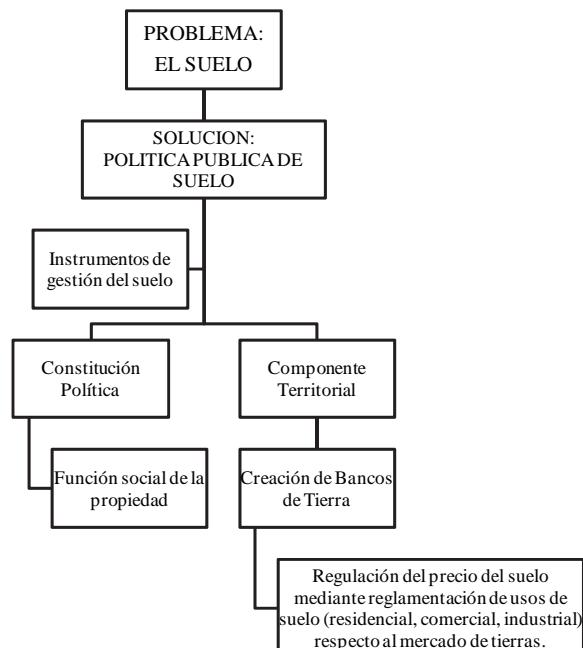


Figura 3. Propuesta de estructura general para la Política Pública de Suelo.

Algunas medidas que sugiere la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), que debería tomar el gobierno local para facilitar a las personas necesitadas el acceso al suelo son: a) Disponer y/o actualizar catastros de las tierras de propiedad pública y privada para ver posibilidades de consolidación de asentamientos; b) anticipar las necesidades de tierra urbanizada futura incorporándola en la agenda urbana y los planes de ordenamiento del municipio; c) revisar reglamentaciones para incorporar y/o habilitar tierra para los grupos de menores recursos; d) prever procedimientos de subdivisión sencillos y de bajo costo para favorecer el capital social de los pobres y atenuar la expansión urbana; e) optimizar y aumentar recursos para satisfacer la demanda de los asentamientos populares vía políticas fiscales que favorezcan a los pobres; f) adecuar la estructura operativa de los municipios para habilitar y mejorar el suelo urbano articuladamente con todos los organismos y niveles y g) desarrollar instrumentos de cobro de plusvalías generadas por obras públicas [4].

Existe plena conciencia de que quien controla el suelo conduce el desarrollo urbano. Hasta ahora han sido los propietarios de la tierra quienes han llevado a cabo acciones que han permitido sumar y parcelar predios, coordinar a propietarios y a agentes, adquirir y/o garantizar suelo en la ciudad de acuerdo con la localización de áreas de desarrollo.

Conclusiones

- Aunque los *Instrumentos de gestión del suelo* no impactan directamente en la disminución del déficit

cuantitativo de vivienda, sí permiten la generación de suelo urbanizable para desarrollar proyectos de VIS y de VIP.

- Para la utilización eficiente de estos instrumentos, se deben tener en cuenta las variables como fragmentación predial y características socio-económicas de los dueños del suelo. Es evidente cómo ellas y los instrumentos de gestión del suelo utilizados en cada caso, impactan los tiempos de ejecución de los proyectos y, por ende, en la velocidad de respuesta del operador de proyectos VIS/VIP a la demanda.
- Es necesario pensar, formular e implementar una Política Pública de Suelo como parte de la política pública de vivienda y como componente esencial de la planeación urbana. La problemática del déficit de vivienda es actualmente abordada por el Estado colombiano a través de la *Política Pública de Vivienda* que se enfoca en la asignación de subsidios a la demanda y en la implementación de proyectos de VIS y de VIP, sin embargo, sin la articulación de esta política con una *Política Pública de Suelo* que regule el uso del suelo y el mercado del mismo, no se podrá tener una planeación a largo plazo del desarrollo de la ciudad, y será muy difícil disminuir la brecha entre el número de hogares que demandan un techo propio y el número de viviendas ofertadas y, por consiguiente, lograr un desarrollo eficiente, equitativo y ordenado de la ciudad.
- La cuestión de articular una política de vivienda con una política de suelo pasa por resolver la tensión entre los conceptos de *propiedad privada y función social de la propiedad* planteados en la constitución de 1991. Desde luego, es claro que los instrumentos de gestión del suelo permiten intervenir el mercado de la tierra para desarrollar proyectos urbanísticos en pro del bienestar general, pero el suelo sigue siendo escaso y sometido a la especulación por parte de sus propietarios.
- Basta considerar en particular las tensiones entre la apropiación y el uso del suelo generadas en parte por su localización única y su finitud, o por un mercado distorsionado producto de una escasa regulación (en medio de una economía de libre mercado). Adicionalmente, la limitación del costo final de la vivienda social (establecidos por la ley) termina impactando por un lado, la calidad de la vivienda, y, por otro, el precio ofertado al suelo.

Referencias

[1] Molina, I. La vivienda en el desarrollo humano de Bogotá, Bogotá, Mimeo, 2007.

- [2] Mata-Perelló, J., Mata-LLeonart, R., Vintró-Sánchez, C. and Restrepo-Martínez, C. Social Geology: A new perspective on geology, Revista Dyna, 158, pp. 158-166, 2012.
- [3] Dangond, C., Jolly, J., Monteoliva, A. Y Niño, A. Una reflexión crítica sobre los lineamientos del documento CONPES 3305, Papel Político, 11(1), pp. 47-68, 2006.
- [4] Ardití, C., Carrasco G., Jirón, P. y sepúlveda, R. Gestión del suelo urbano y vivienda social, elementos para una discusión. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, 2003 Available: http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/instituto_de_la_vivienda/a20045181012gestiondesuelo.pdf [citado 4 de diciembre de 2012].
- [5] Lazcano, M. El acceso al suelo y a la vivienda de los sectores informales: el caso de la ciudad de México, Revista Invi, 20(54), PP. 18-54, 2005.
- [6] Rojas, E. La política de vivienda en Colombia. Unas reflexiones desde el análisis prospectivo de los planes de gobierno [Tesis de Maestría en Política Social], Universidad Javeriana, Bogotá, 2008.
- [7] Fresnedo, O. Magnitud del déficit habitacional en Colombia, En Desarrollo urbano en cifras No. 3, Bogotá, CENAC- Ministerio de Desarrollo Económico – Viceministerio de Vivienda, Desarrollo Urbano y Agua Potable, 1997.
- [8] DANE - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DE COLOMBIA. Ficha metodológica déficit de vivienda, Censo General 2005. Bogotá, Febrero 2008, pp. 2-3. Available: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/ FM_deficitvivienda.pdf [citado 7 de noviembre de 2013].
- [9] Castillo, M. Anotaciones sobre el problema de la vivienda en Colombia, Revista Bitácora urbano Territorial, 8(1), pp. 15-21, 2004.
- [10] THE DEVELOPMENT PLANNING UNIT UNIVERSITY COLLEGE LONDON DPU-UCL. Suelo urbano y vivienda para la población de ingresos bajos. Estudios de Caso: Bogotá, Soacha, Mosquera, Medellín y Área Metropolitana, DPU-UCL, London, 2006.
- [11] CAMACOL. La locomotora regional de vivienda: Recomendaciones para una política de vivienda y desarrollo urbano distrital 2012-2015. Bogotá, 2011.
- [12] Ceballos, O. Vivienda Social en Colombia. Una mirada desde su legislación 1918-2005, Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana, 2008.
- [13] Monkkonen, P. Urban land-use regulations and housing markets in developing countries: Evidence from Indonesia on the importance of enforcement, Land Use Policy, 34, pp. 225-264, 2013.
- [14] JOLLY J. ¿Qué tan social ha sido la política pública de vivienda en Colombia? Bogotá, Departamento de Economía, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Pontificia Universidad Javeriana, 2001.
- [15] Maldonado, M. Instrumentos de gestión del suelo: algunos elementos de contexto. Notas de clase. Available: <http://info.worldbank.org/etools/docs/library/135755/M3-06-B-MariaMMaldonado-INSTRUMENTOS%20DE%20GESTION%20DEL%20SUELO-Bogota2000.pdf> [citado 15 de marzo de 2013].
- [16] Fique, L. La política pública de vivienda en Colombia: conflicto de objetivos, Bitácora 13, 2, pp. 73-89, 2008.

The importance of being chemical affinity. Part IV: The first flowers

La importancia de llamarse afinidad química. Parte IV: Las primeras flores

Guillermo Salas-Banuet ^a, José Ramírez-Vieyra ^b, Oscar Restrepo-Baena ^c, María Noguez-Amaya ^d & Bryan Cockrell^e

^a Universidad Nacional Autónoma de México, salash@unam.mx

^b Universidad Nacional Autónoma de México, jgrv@unam.mx

^c Universidad Nacional de Colombia, ojestre@unal.edu.co

^d Universidad Nacional Autónoma de México, nogueza@unam.mx

^e University of California, Berkeley, bryan.cockrell@berkeley.edu

Received: December 5th, 2013. Received in revised form: February 20th, 2014. Accepted: February 25th, de 2014

Abstract

After the power void caused by the Roman Empire's decline, Medieval Europe is involved in a combat climate for the power. The new Christian church from Rome expands and includes kings and emperors. The Christian pope seeks to compel all believers to subscribe the closed religious perspective of that time. However it is religious people who recognize the necessity to observe nature and the world in a different way. The discovery, translation and diffusion of the classic Greek philosophers' texts allow the initiation of independent thinking, which in turn, spurs the Renaissance and Illustration ages. The inductive thinking method begins with the purpose of finding other ways to interpret nature and advance the thought process. Therefore during the XVI century alchemy is questioned and the first treatises on empirical metallurgy appear, considered to be the foundations of modern science. During the XVII century some individuals begin experimenting with residual alchemical concepts. The first hypotheses on key chemical concepts and phenomena appear which frame the logic and rational thought process during the XVIII century. The concept of affinity emerges as a way to describe the relations among substances, observed during the formation of compounds, and as an analogy to human relations. Published works regarding the components of the thinking process consolidate the basic concepts of chemical bonding and related themes.

Keywords: Chemical affinity, materials, thinking, chemical bonding, history.

Resumen

El vacío de poder producido por el derrumbe del Imperio Romano dejó a la Europa Medieval sumida en un ambiente de luchas. La dominante Iglesia Cristiana de Roma batalló para extenderse y someter a reyes y emperadores. La autoridad del papa Cristiano de Roma realizó un esfuerzo para esclavizar al pensamiento de los creyentes religiosos a la cerrada perspectiva religiosa que se tenía en esas épocas. Sin embargo, fue desde el seno mismo de los fieles de donde surgió la necesidad de ver a la naturaleza y sus leyes de otra manera. El descubrimiento, traducción y difusión de los textos de los pensadores griegos clásicos, permitió iniciar el proceso de independencia del pensamiento europeo, lo que llevó al surgimiento del Renacimiento y la Ilustración. Fue entonces cuando comenzó a utilizarse el método inductivo en el afán de encontrar otras maneras de interpretar a la naturaleza y avanzar en el conocimiento. Así, durante el siglo XVI la alquimia fue cuestionada y aparecieron los primeros escritos de una metalurgia empírica, considerados la base de la ciencia moderna; durante el XVII, aún con la existencia de conceptos alquímicos residuales, algunos personajes comenzaron a realizar experimentos, con lo que se establecieron las primeras hipótesis sobre los conceptos y fenómenos químicos clave, los cuales sirvieron de sustento para desarrollar al pensamiento lógico y racional del siglo XVIII, como el relativo a las afinidades, que se basaba en las relaciones entre las sustancias, observadas durante la formación de compuestos y como una analogía de las relaciones humanas. Los trabajos publicados entonces sobre los elementos del proceso del pensamiento, permitieron consolidar los conceptos base relativos al enlace y otros a él relacionados.

Palabras Clave: Afinidad química, materiales, pensamiento, enlace, historia.

1. Introducción

Se utiliza la visión histórica de la cultura occidental para apreciar el trabajo relativo al entendimiento de la naturaleza de la materia y sus cambios -los naturales y los producidos por el hombre- basado en la facilidad o dificultad para formar enlaces entre átomos o romperlos en variadas situaciones, como una metáfora de las relaciones humanas determinadas

por los distintos tonos de afinidad y antipatía entre las personas. Ese trabajo inicia en las antiguas Mesopotamia (hoy Irak y el noreste de Siria), Egipto y Persia (ahora Irán), cuando los hombres prehistóricos aprendieron a transformar algunos materiales naturales -como minerales, rocas, residuos orgánicos e inorgánicos y cenizas- en otros -con estructuras, propiedades y comportamientos diferentes a los originales- a través de procesos pirotecnológicos [1]; con



ellos se fabricaban objetos útiles, decorativos o sagrados, empleados -como siempre- por las élites del poder. En ese entonces, el entendimiento de la afinidad era intuitivo; evolucionó durante miles de años -de manera incierta y con muchos vericuetos, como toda evolución- hasta que surgió la coyuntura adecuada para comenzar a entender, racionalmente, los fundamentos del amplio abanico de matices que hay entre la afinidad y la antipatía existente entre elementos y compuestos en diferentes circunstancias. Después, en Grecia, durante el periodo que va desde el siglo VI a. C. -cuando inicia la Época de Oro- hasta el siglo III d. C. -en que termina el Tiempo de las Ciencias Exactas- se suscitaron diversas filosofías, ciencias y tecnologías, basadas en un pensamiento independiente del religioso, que definieron los conceptos de átomo, elemento, enlace, compuesto y afinidad [2]. El desarrollo de la idea explícita de la afinidad química ocurrió en el siglo XVII como resultado del descubrimiento europeo de las obras de los pensadores de la cultura clásica griega en el siglo X y con sus primeras traducciones, lo cual permitió a los europeos tomar conciencia de la obscuridad intelectual en la que habían vivido durante cerca de 1000 años (Edad Media) -tiempo en que se trabajó y expandió la alquimia [3]. Esa toma de conciencia incitó, primero, al movimiento conocido como Renacimiento, durante los siglos XV (el de las innovaciones) y XVI (el de los descubrimientos geográficos y el de Oro para las bellas artes) en la Europa occidental, principalmente en Italia y, después, al movimiento intelectual y cultural nombrado como Época de la Ilustración, el cual nació en Francia e Inglaterra y duró los siglos XVII -llamado por muchos el siglo de la física- y XVIII; a este se le conoce como el siglo de las luces, nombre metáfora debido a los usos de la razón -detonados por el descubrimiento de las ideas de los clásicos griegos- como las poderosas luces que dispararon las tinieblas de la Edad Media. Ambos períodos, el Renacimiento y la Ilustración, propiciaron que el sol de la alquimia anocheciera y el de la química, entre otras ciencias y filosofías, amaneciera, impactando el pensamiento y las actividades en Europa y sus colonias de tal manera, que es posible explicar su libertad en la política y la religión, su liderazgo en la economía y el desarrollo constante en la tecnología, que han permitido su poderío mundial.

2. Antecedentes

De acuerdo a Pagden [4], la lucha de la poderosa alta jerarquía de la Iglesia Cristiana por la supremacía en Europa, en la batalla por ganar la mente de los conversos, tuvo tres fases: la primera se distinguió por una expansión territorial y la segunda por el liderazgo de los monasterios; estas dos permiten dar una posible explicación para los años de oscuridad en el pensamiento europeo medieval porque se le limitó a cuestiones teológicas, ya que todo se debía de entender desde la perspectiva religiosa; las dos primeras fases también ayudan a comprender la evolución de la tercera fase, la de la búsqueda del dominio de los papas, que los llevó a competir con reyes y emperadores por el gobierno, cuando las poblaciones en Europa eran pequeñas localidades

dispersas y la conciencia personal era colectiva. Es durante el inicio de la tercera fase cuando Hincmar, arzobispo de Reims (806-882), estableció su creencia sobre la predestinación divina y Juan Escoto Eriúgena (815-877) la defendió. Esta decía que la salvación o la condenación de los individuos no depende sólo de Dios, sino también de los propios individuos, con lo cual promovía una libertad de decisión individual inusual, cuestión que motivó el descubrimiento del individuo -el desarrollo cultural más importante en la explicación de lo que hoy es occidente- proceso que ocurriría entre los años 1050 y 1200. Esto hizo surgir múltiples y variados problemas doctrinales y jurídicos que requerían de solución, con lo que se priorizó su exposición y debate en los monasterios, las escuelas -de ahí que se nombre escolástica a esta fase- y en las pocas universidades que comenzaban a surgir. Las activas discusiones ocurridas en los claustros dispersos por Europa, unificados por la Iglesia, el latín y la situación cosmopolita que gozaban los estudiosos eclesiásticos, permitieron el surgimiento de la primera unión europea -que no se dio en la economía sino en el pensamiento- y fomentaron la difusión de las ideas a través de continentes y océanos [5]. El pensamiento no religioso nació para evitar las discusiones caóticas; se hizo necesario darle una alta importancia a las reglas del debate, a las formas de discusión y a los acuerdos sobre las cuestiones fundamentales. Pronto, la teología extendió estas herramientas del pensamiento al derecho -que era eclesiástico, por supuesto-, a las artes liberales -de libres y libros, aquellas disciplinas académicas a las que se dedican los hombres libres, que usando libros buscan el conocimiento y que son opuestas a los oficios viles o mecánicos realizados por esclavos y siervos que necesitaban ganarse el sustento- y a la arquitectura -en avances técnicos que permitieron construir catedrales y castillos más altos y con interiores más amplios- con lo que se cimentó la civilización y el orden europeos durante los siglos XII y XIII [6]. Existen cuatro destacados ejemplos de los primeros frutos cosechados que sirvieron de plataforma para el desenvolvimiento del pensar independiente: 1) El bretón Pedro Abelardo (1079-1142) contribuyó con su *Sic et Non* (Sí y No), alrededor de 1121, que nació de sus propios alumnos, los cuales reclamaban con insistencia razones humanas y filosóficas para algo que entender más que repetir. Su trabajo presenta 158 cuestiones suscitadas a partir de las discordancias entre las sentencias de las autoridades de la Iglesia, principalmente de los Padres fundadores, pues eran ellos quienes tenían la última palabra en la exégesis bíblica. Abelardo llamó la atención sobre el hecho de que la argumentación lógica, si cuestiona las contradicciones y explora los silogismos, puede indagar más allá de la superficie del conocimiento y emitir un juicio que lleve a una correcta comprensión, con lo que estableció un método que impactó al pensamiento. 2) En Boloña, en el año 1140, el monje italiano Graciano (nacido en el siglo XII y muerto en el XIII) publicó, con gran aceptación europea, el *Decretum* (manera en que se conoce la *Concordancia de los cánones discordantes*) [7]; esta obra es el resultado de repensar, reorganizar y racionalizar la ley eclesiástica -la principal forma de ley en la sociedad europea dominada por la religión, que usaba la simple costumbre para aplicarse-;

con el *Decretum* la ley se sujetó más a las pruebas de la razón y la lógica. 3) Un graduado de la Universidad de Oxford, el inglés Roberto Grosseteste (1196-1253), quien había participado en el proceso de traducción de las obras científicas griegas e islámicas del árabe al latín -otro elemento base de la cultura occidental- el cual había comenzado unos cincuenta años antes de su nacimiento, fue el inventor del método experimental. Se dio cuenta de que si se quería avanzar en el conocimiento, no había que quedarse en los clásicos ni en los avances prácticos *ad hoc* logrados por la deducción, sino que había que resolver la cuestión del método científico; lo hizo a partir de Aristóteles desarrollando un modelo de inducción, donde el primer paso de una indagación consistía en observar de forma cuidadosa el fenómeno sujeto a estudio para descomponerlo en principios y elementos; el segundo residía en la realización de experimentos metódicos con acercamientos sistemáticos. Grosseteste aplicó su modelo a la observación del arco iris en las distintas circunstancias en las que aparece; con el resultado de esas observaciones, Teodorico de Friburgo tuvo la idea de la refracción de la luz, que Newton explicaría con detalle; así se tiene el primer ejemplo del enfoque experimental [8]. Con el método de Grosseteste -que Sir Francis Bacon (1561-1626) usaría de base para establecer su método científico de razonamiento inductivo- se inició el interés por la exactitud, la cuantificación, la medición y la eficiencia, lo cual repercutió psicológica, social y tecnológicamente, motivando un cambio de actitud hacia el tiempo y la forma de entender el espacio, dos conceptos hasta entonces vagos, cambiando a la sociedad europea de estar centrada en una percepción cualitativa a estarlo en una cuantitativa. Roger Bacon (1214-1294), alumno y amigo de Grosseteste, apasionado filósofo franciscano inglés, mostró los defectos del debate académico y de la experimentación en la ciencia natural existentes e insistió en que los teólogos aprendieran griego, para evitar los errores nacidos de las malas traducciones al latín (idioma que utilizaban los teólogos) y de las equivocadas interpretaciones de los textos clásicos griegos y de las sagradas escrituras. 4) El alemán Alberto Magno (alrededor del 1200-1280), académico parisino, maestro, teólogo, filósofo y santo católico, se le reconoce como el primer pensador medieval que distinguió con claridad entre el conocimiento, producto de la teología y el derivado de la ciencia; valoró el saber científico y las observaciones empíricas, en un tiempo en que el único significado y orden que tenía el mundo se daba a través de Dios; así inició una revolución mundial sobre el saber y el pensamiento, de alcances insospechados. Su alumno, Tomás de Aquino (1224-1280), teólogo, filósofo, devoto fraile y también santo católico, al conocer y convencerse del pensamiento de Aristóteles y de otros clásicos, intentó reconciliarlos con el cristianismo, en un proceso intelectual muy creativo y provocador -cuyo resultado se conoce como la revolución tomista- similar al que había hecho el judío español Maimónides (1135-1204) con la religión judía en 1190, en el trabajo conocido como *La guía de los Perplejos*. La buscada reconciliación entre la fe y la razón (tradicionalmente, se había supeditado la razón a la fe, pues

todo pensamiento debía someterse al principio de autoridad divino o papal) provocó su definitiva separación. Antes de Aquino la enseñanza se limitaba, en principio, a la repetición de los textos antiguos, sobre todo los de la Biblia, considerada la principal fuente de conocimiento, y la vida intelectual se identificaba con la contemplación y la meditación en solitario. Aquino insistió en que había una "ley natural" que podía captarse y entenderse a través de la razón, con lo que distinguió entre lo natural y lo sobrenatural, la naturaleza y la gracia, la revelación y la razón, e hizo posible el estudio objetivo del orden natural y la idea de un estado laico [9].

Para los europeos, la recuperación de la filosofía de los griegos clásicos fue el mayor logro conocido de la razón, sin una referencia religiosa, que inspiró su pensar.

Se ha considerado al siglo XV como el último de la Edad Media y el primero de la Moderna, aunque los frutos de las actividades de los pensadores de la metalurgia y la química se encuentran hasta el siglo XVI. En 1540, el italiano Vannuccio Biringuccio (1480-1539) publicó *Pirotechnia, Le Dieci Libri Della Pirotechnia*, considerado el primer libro europeo sobre metalurgia, que inició la tradición respecto a la literatura científica y técnica. Este texto contiene: 1. Un tratado sobre semiminales, los licuables por fuego y los que se disuelven en agua y el Hg que desaparece con el fuego; el cristal, las gemas y la fabricación del vidrio. 2. La práctica correcta de la fusión de los metales y el modo de separarlos: el Pb, el Cu, el Au y la Ag. 3. La separación y purificación del Au y la Ag, así como la preparación del ácido nítrico. 4. Las aleaciones de Au, Ag, Cu, Pb y Sn. 5. Las grandes fundiciones de bronce, piezas de artillería y campanas. 6. El tipo de hornos, la mecánica de los fuelles, las ruedas hidráulicas y las armas. 7. La fundición de objetos pequeños y de uso común. 8. El arte de la alquimia, las técnicas de destilación, la orfebrería, la forja del hierro, los objetos de Cu y Sn, los batidores de Au y Ag, la acuñación de monedas y la preparación de argamasa y ladrillos. 16 años después (1556) Georg Pauer (1494-1555), médico, químico, alquimista y mineralogista alemán -mejor conocido como Georgius Agricola-, sacó a la luz la obra *De Re Metallica*, en la que sienta las bases de la mineralogía moderna. Su obra es un compendio de 12 libros, en los que presenta lo que se conocía y sabía de los temas metalúrgico y minero e incluye lo relativo a ellos desde el punto de vista médico, químico, matemático e histórico. La importancia capital de su obra está en que por primera vez se presentan los métodos de caracterización de minerales y se clasifican según sus características externas usando la observación directa; su método es considerado fundamental para la ciencia empírica moderna. En el siglo XVII los experimentos descubrieron cómo crear un vacío, algo que Aristóteles había declarado imposible. En 1630, Giovanni Battista Baliani (1582-1666), matemático, astrónomo y físico italiano, envió una carta a Galileo Galilei donde le notificaba que no lograba que el agua en los sifones subiera más de 10 m; Galileo le propuso como explicación que el vacío no tenía fuerza suficiente nada más que para levantar esa altura. En 1640, Gasparo Berti, tratando de explicar lo que ocurría con los sifones, realizó el primer experimento con el vacío: creó lo que constituye

primordialmente un barómetro de agua, el cual resultó capaz de producir vacío. Al analizar el informe experimental de Berti, Evangelista Torricelli (1608-1647) captó con claridad el concepto de presión de aire, por lo que diseñó (1644) un dispositivo para demostrar los cambios de presión en el aire. Construyó un barómetro que empleaba mercurio, en lugar de agua y, sin proponérselo, comprobó la existencia del vacío. La aceptación del concepto de vacío se dio en 1648, cuando Blaise Pascal comparó las diferencias observadas en su barómetro al nivel del mar y a 1000 metros de altura y entendió cómo afectaba la presión del aire. El paso final lo dio Torricelli al construir un barómetro de mercurio que contenía en la parte vacía del tubo otro barómetro para medir la presión del aire en esa región. Así, se puso en evidencia la presión del aire y, lo más importante, la producción y existencia del vacío. Con ello, en 1654, Otto Von Guericke (1602-1686) construyó bombas de vacío de pistón; esto atrajo la atención sobre la antigua teoría de Demócrito, que había supuesto que los átomos se movían en un vacío, y sobre el trabajo con gases, con lo cual nació la química neumática. La mayoría de los iatroquímicos -seguidores de una forma primitiva de la bioquímica- y los filósofos naturales de la época, suponían que los gases no tenían propiedades químicas, de aquí que su atención se centrara en su comportamiento físico, por lo que comenzó a desarrollarse una teoría cinético-molecular de los gases. Estas experiencias -que requerían de valorar la observación cuidadosa y la experimentación exacta, características esenciales del trabajo para entender la naturaleza en la Edad Moderna- iniciaron una transición no simple, porque los paradigmas y prejuicios no son fáciles de cambiar; así, hubo un amplio periodo de sincretismos en el pensamiento respecto a la alquimia y la química, entre muchos otros. Ejemplos representativos de los siglos XVI y XVII están en las vidas y obras de Teophrastus Von Hohenhen, conocido como Paracelso (1493-1541), Jan Baptiste Van Helmont (último cuarto del siglo XVI-1644) y Robert Boyle (1627-1691).

Von Hohenhen es considerado el primer médico moderno, muy adelantado a sus contemporáneos; en una época en que se dejaba la cirugía en manos de los barberos, él refutó públicamente esa idea publicando su principal obra *La gran cirugía* (Die Grosse Wundartzney) y encamina a la medicina por una senda protocientífica; su campo predilecto de investigación fue la mineralogía, lo que lo llevó a utilizar minerales y elementos como medicamentos, “para ayudar al cuerpo en su lucha contra la enfermedad”; por esto, además de médico, se le conoce como químico. Describió muchas enfermedades -como el bocio y la sífilis- por haberlas estudiado en sus pacientes, a las cuales trató con azufre y mercurio. Sin embargo, también fue alquimista, astrólogo y mago, creyente en criaturas mitológicas, campos en los que su obra es considerable. Su principal teoría, la *tría prima* (los *tres principios* que integran al hombre): la sal, que forma al cuerpo, el azufre, el alma y el mercurio, el espíritu, de ella viene el uso de estos componentes en su medicina.

Van Helmont incursionó en varias disciplinas científicas, pero se centró en la medicina y en la química. Se le considera el fundador de la iatroquímica, por realizar experimentos

sobre el crecimiento de las plantas, identificando a los gases que hoy llamamos dióxido de carbono y óxido de nitrógeno; aplicó principios químicos en sus investigaciones sobre la respiración, la digestión y la nutrición, al estudiar problemas fisiológicos; y fue el primero que señaló una diferencia entre el aire y un gas, palabra que introdujo al vocabulario de la ciencia. Mientras, tenía inclinaciones místicas ya que creía en la piedra filosofal y sostenía la teoría de la generación espontánea, la cual explicaba con su receta para generar ratones “con colocar ropa sucia y unos pocos granos de trigo, en un tonel, al cabo de 21 días aparecerán ratones”.

Boyle, inventor, filósofo y físico irlandés, considerado el primer químico, es un ejemplo claro de la transición que estaba ocurriendo respecto a la ciencia. En 1657 Boyle leyó sobre la bomba construida por Otto Von Guericke y, con la ayuda de Robert Hooke (1635-1703), construyó una mejor. Con ella realizó experimentos sobre el aire, que se encuentran en su obra *Nuevos experimentos físico-mecánicos, sobre la elasticidad del aire, y sus efectos* (1660), en la que no aparece la famosa ley que establece que el volumen de un gas varía inversamente con la presión del gas, de Boyle-Mariotte -debido a Edme Mariotte (1620-1684), quien llegó a la misma conclusión que Boyle, aunque especificando que la temperatura tería que ser una constante (1676)- la cual publicó posteriormente. Realmente fueron Henry Power (1623-1668) y Richard Towneley (1629-1707) quienes (1661) originalmente la formularon. Los resultados de su trabajo le abrieron las puertas del Colegio Invisible, el cual (1663) cambiaría su nombre por el de Sociedad Real (Royal Society). Boyle explicó que los físicos, los “filósofos herméticos”, sostenían la doctrina Peripatética o Aristoteliana de los cuatro elementos, aire, tierra, fuego y agua; mientras que los químicos, “espagiristas vulgares”, los discípulos de Paracelso, creían en la *tría prima*. Boyle demostró lo poco satisfactorio que ambas teorías eran para la química y dio una definición conveniente de elemento químico: “Entiendo por elementos, con la misma convicción con que aquellos químicos hablan categóricamente de sus Principios, a ciertos cuerpos primitivos y simples o perfectamente no mezclados que, no estando constituidos por otros cuerpos -o uno por otro-, son los ingredientes de los cuales todos los cuerpos perfectamente mixtos se encuentran compuestos y en los cuales estos últimos se resuelven cuando son divididos hasta las últimas consecuencias” [10], que se asemeja a la definición de algunos griegos para el *arjé* [2]. Según esto, una sustancia simple podía considerarse un elemento, sólo hasta que pudiera convertirse en dos o más sustancias aún más simples todavía. No obstante, Boyle era un alquimista convencido de la transmutación de los metales, al grado de que su intervención fue fundamental para abolir una ley real que prohibía la creación de oro y plata a través de la alquimia.

3. El concepto de la afinidad química y su analogía con la afinidad humana

En el año 2009 se cumplieron 200 años de la publicación de la famosa novela de Johann Wolfgang Goethe: *Las afinidades electivas*. La novela tiene dos personajes

principales, la pareja formada por Eduard y Charlotte, que se ve alterada por la llegada de otra pareja: El Capitán y Otilie; cada personaje tiene características específicas, igual que los elementos químicos. Goethe explica, a través de la descripción que da El Capitán, sobre las atracciones electivas o afinidades dobles: "Supóngase al elemento A conectado tan cercanamente al elemento B, que todo tipo de medios usados para separarlos -aun la violencia- ha sido infructuoso. Luego suponga al elemento C, en la misma posición con respecto al D. Ponga los dos pares en contacto; A se arrojará sobre D y C sobre B, sin poder decir cuál dejó primero a su primera conexión o hizo el primer movimiento hacia el segundo". Esto es, cuando un compuesto "AB" se une con otro "CD" para dar lugar a los compuestos "AC" y "BD", como es el caso del nitrato de plata que se combina en disolución acuosa con el cloruro de potasio para producir nitrato de potasio, en la solución y cloruro de plata, precipitado: $\text{AgNO}_{3(\text{ac})} + \text{KCl}_{(\text{ac})} \rightarrow \text{KNO}_{3(\text{ac})} + \text{AgCl}_{(\text{s})}$ pareciendo que los ingredientes de los primeros compuestos estuvieran prefiriendo la segunda relación. La pasión que surge entre Eduard y Otilie los une fuerte pero parcialmente, porque la culpa que siente Eduard -por haber traicionado a Charlotte- los separa, hasta que ambos se unen en una la muerte que llega por decisión propia y que hace que su unión sea incompleta- mientras que el amor mesurado y considerado que nace entre El Capitán y Charlotte permanece, con inciertas posibilidades de una unión permanente. "Justo como resulta imposible la completa unión de un ácido y un álcali, excepto en la forma de un precipitado, Eduard y Otilie se "filtran" de la vida hacia el lugar de una eterna unión, la cripta, dejando a El Capitán y a Charlotte en un enlace más móvil "dentro de la solución", la vida [11]. La analogía usada por Goethe entre las relaciones humanas y químicas es explícita [12].

Las afinidades electivas de Goethe son el resultado de su interés por la química, motivado por la imagen pública que ella desarrolló durante el siglo XVIII; para inicios del XIX era una ciencia pujante, pertenecía a la alta burguesía y se fortalecía en los salones y las salas de entretenimiento; nada que ver con sus inicios en el siglo XVII, cuando se crean sus antecedentes. Uno importante sobre la afinidad química lo establece Boyle (1675) al reflexionar sobre las experiencias, observaciones e ideas relativas a la afinidad registradas por varios de los primeros químicos, algunos de ellos colaboradores suyos: 1) El holandés Johann Rudolf Glauber (1604-1670), quien se concentró desde el inicio de su trabajo en las sales ácidas, descubrió (1655) el sulfato sódico ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), partiendo de sal (NaCl) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado, conocido como sal de Glauber o Mirabilis, y comenzó su fabricación con un proceso que es considerado como el iniciador de la industria química; escribió cerca de 40 libros relativos a la química de las sales y describió múltiples recetas de productos químicos y farmacéuticos. 2) Franciscus Sylvius (1614-1672), alemán fundador de la Escuela iatroquímica de Medicina, quien creía que todos los procesos vitales y las enfermedades se basaban en reacciones químicas, por lo que intentaba comprender la medicina en términos de reglas universales fisicoquímicas; introdujo el concepto de "afinidad química" como una

manera de entender los mecanismos electrolíticos del cuerpo humano. 3) El alemán Otto Tachenius (1610-1680) -quien junto a Boyle sentó las bases del análisis químico cualitativo- escribió el libro *Hippocrates chemicus* (1666) para replicar en defensa ante los ataques sobre la novedad y eficacia de su sal *viperina*; en él elaboró su teoría de los álcalis y otra más avanzada en la que establecía que los ácidos y los álcalis eran los dos principios o elementos de todas las cosas. 4) El inglés John Mayow (1640-1679), quien publicó cinco escritos diferentes entre 1668 y 1674, donde decía: "los experimentos de Boyle han probado que algo del aire es necesario para la producción del fuego, se ha demostrado que una llama se apaga mucho antes en un vaso que no contiene aire que uno que sí contiene, lo que demuestra que la llama se apaga, no porque sea estrangulada por su propio hollín como algunos han supuesto, sino porque es privada de su "alimentación aérea"; Mayow llegó a pensar que no todo el aire alimentaba al fuego, sino sólo una parte de él lo hacía, la más activa y sutil, a la que llamó "aire-ígneo"; también llegó a la conclusión de que este componente era absolutamente necesario para la vida y creía que los pulmones lo extraían de la atmósfera y lo pasaban a la sangre; que era necesario para todos los movimientos musculares y que había razones para pensar que la contracción repentina -un espasmo- de los músculos era producida cuando se combinaba con otros combustibles del cuerpo (salino-sulfurosos, especificaba), por lo que el corazón, siendo un músculo, deja de latir cuando la respiración se detiene. 5) El francés Nicolás Lemery (1645-1715), fue quien desarrolló la primera teoría sobre la química del ácido-base (1680), aplicando a la química la filosofía mecánica; era esta una forma de filosofía natural popular en el siglo XVII -enriquecida por el filósofo, matemático y físico francés René Descartes (1596-1650) quien pensaba que todo lo físico en el universo estaba hecho de pequeñas partículas o corpúsculos (retomando el atomismo griego) y que no podía haber un vacío porque toda la materia estaba constantemente girando en remolinos-. Lemery impartió cursos en los jardines reales, en los cuales expresó su oposición a la alquimia y expuso muchos de sus trucos, la llamó "el arte sin arte", definiendo a la química como "el arte que enseña como separar las diferentes sustancias que se encuentran en un compuesto". Propuso que debía existir otro tipo de explicaciones, con lo que imaginó que la superficie de las partículas elementales de las substancias ácidas tenían picos o puntas, como los cardos -con eso explicaba su sabor agrio, picor y capacidad para atacar y corroer substancias- mientras que las alcalinas poseían agujeros o poros; al mezclarse, los picos de las ácidas se introducían en los agujeros de las alcalinas, neutralizándose las sustancias al perderse los picos y los poros y enlazándose para formar compuestos. Debido a que su libro *Cours de Chymie*, publicado por él en 1675, constituyó la suprema autoridad química en Europa durante más de un siglo -tuvo múltiples ediciones y fue traducido a casi todas las lenguas europeas- la teoría de afinidad mecánica sobrevivió muchos años.

Ese mismo año, Boyle, con las ideas de sus contemporáneos y las propias, usó su claridad mental y su

influente pluma para escribir un libro en el que plasma una teoría [13] planteando tres hipótesis químicas: 1. La existencia de dos principios salinos contrarios (al observar las muy diferentes propiedades entre las sustancias ácidas y alcalinas); 2. La presencia de un conflicto entre ellas (la intensidad de la reacción al juntar una sustancia ácida con una alcalina); y 3. La anulación de las propiedades de las sustancias originales al unirlas (la sustancia producida, una sal, era neutra). Así, explicaba los átomos, los enlaces, la afinidad química y el cambio en las propiedades de las sustancias afines reaccionantes.

En 1718, Etienne Francois Geoffroy (1672-1731) presentó ante la Académie des Sciences de París una “tabla cualitativa de las diferentes relaciones químicas empíricas entre diversas sustancias” [14], la cual contiene 16 columnas, una por cada sustancia, representadas por sus símbolos medievales. Geoffroy explicaba: “se observan ciertas relaciones -no quería llamarlas afinidades- que hacen que los cuerpos se unan fuertemente los unos con los otros...; se observan diferentes grados de relación, de arriba hacia abajo, por lo que las sustancias en la posición más alta en las columnas, los *espíritus ácidos*, son seguidos por las *sales ácalis fijas*, uniéndose siempre entre ellas, preferiblemente a todas las que le siguen, sin que ninguna pueda separarlas; si la unión es entre cualquiera de las tres que les siguen con los *espíritus ácidos*, ocurrirá que cuando se les aproximen las *sales ácalis fijas*, las primeras quedarán en libertad, dejándoles su lugar para que unan con los ácidos”. Este concepto de relación entre sustancias implicaba una explicación en términos de afinidades; seguramente Geoffroy buscaba una pauta que le permitiera entender el orden de los comportamientos de las sustancias al unirse, para poder hacer predicciones. Su tabla tiene ese gran valor lo que llevó a la proliferación de trabajos similares, los de: Jean Grosse (1730) con 19 columnas; Chistlieb Ehregot Gellert (1750) con 28; Antoine Rüdiger (1756) con 25; Jean Philippe Limbourg (1758) con 33; Philipi Ambrosii Marherr (1762) con 20; Jacob Reinbold Spielmann (1763) con 28; Guillaume Francois Rouelle (1763) con 19; Jacques Francois De Machy (1769) con 20; Antoine Francois de Fourcroy (1773) con 36; y Denis Diderot (1778) con 12. Más adelante (1749), con un mayor conocimiento de la química, Pierre Joseph Macquer, hizo una distinción entre la afinidad simple entre dos sustancias y la compleja, entre tres o más. En el mismo sentido, Antoine Baumé (1788) distinguió siete tipos diferentes de afinidad, según las características de la reacción e indicó la necesidad de 2 juegos de tablas, una para la vía seca y otro para la húmeda [15]. Torbern Bergman (1775) construyó varias tablas con información sobre la afinidad química. Una primera versión de estas fue editada por el propio Bergman en 1775 y otras dos ediciones mejoradas de las mismas se publicaron en el texto de Bergman *Disquisitio de Attractonibus Electivis* en 1775 y en 1783 [16]; algunas de ellas incluyen 29 columnas con información sobre la afinidad química de 27 ácidos, 8 bases y 14 metales, diferenciando entre reacciones por vía húmeda, seca o forzadas por el fuego [17], resultando una verdadera herramienta visual sobre las afinidades, que no ayudó para encontrar una pauta sobre la

unión química. El francés Antoine Lavoisier (1743-1794) construyó una tabla de *acidez* (cuando Lavoisier comprobó la existencia del oxígeno, lo definió como un *principio ácido*), basada en la afinidad del oxígeno con 25 sustancias y las combinaciones (afinidades) del nitrógeno, hidrógeno, azufre, fósforo, carbón y alrededor de 25 ácidos con diversas sustancias, las cual publicó en su libro *Traité élémentaire de chimie* (1789) [18]. La mayor experiencia y conocimiento respecto a sus antecesores, lo llevó a considerar que cualquier tabla de afinidad debía de expresar la temperatura a la que era válida, ya que las reactividades relativas dependen de este factor y del grado de concentración de las disoluciones. El carácter de las tablas era claramente cualitativo; algunos intentaron medir las afinidades, con lo que se obtendría un método cuantitativo. En 1700, Wilhelm Homberg (1652-1715) trató de encontrar la cantidad de base que lograría neutralizar distintos ácidos, cosa que lograría (1777) Carl Friederich Wenzel (1740-1793) al demostrar que 123 partes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y 222 de KOH debían de ser consideradas equivalentes para neutralizar 181.5 partes de H_2SO_4 o 240 partes de HNO_3 , que vino a ser la base del *peso equivalente*; luego, intentó determinar las velocidades relativas de la disolución de los metales en los ácidos conocidos; y, en 1781, Richard Kirwan (1733-1812) expresó que los pesos de las distintas bases, necesarios para saturar un peso conocido de un ácido, eran la medida de la afinidad de los últimos por las primeras y construyó una tabla con sus resultados. Se propusieron los diagramas de afinidad también como un intento de cuantificar la afinidad, los cuales servían para mostrar las *atracciones electivas dobles*: tres ingleses lo iniciaron: William Cullen (1710-1790), George Fordyce (1736-1802) y Joseph Black (1728-1799); este último adicionó una columna a la tabla de Geoffroy, gracias a su trabajo con el carbonato de magnesio y los ácidos. A modo de ejemplo, Fourcroy incluyó en su libro de texto el diagrama de afinidades para el sulfato de potasio (K_2SO_4) [19]. Dice Fourcroy que el diagrama, un cuadrado, sirve para apreciar que, cuando el compuesto no puede ser destruido por una tercera o cuarta sustancia, se necesita del contacto de otro compuesto para que ambos se descompongan. En la parte exterior del diagrama, a la mitad de los lados del cuadrado: a la izquierda se ubica al K_2SO_4 y a la derecha el nitrato de calcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; arriba se encuentra el nitrato de potasio, KNO_3 y abajo el sulfato de calcio, CaSO_4 . En la parte interior: en la esquina superior izquierda está colocado el hidróxido de potasio, KOH , y en la de la derecha el ácido nítrico, HNO_3 ; en la esquina inferior izquierda está el ácido sulfúrico, H_2SO_4 , y en la de la derecha el hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Fourcroy explica que el K_2SO_4 es el resultado de una combinación del H_2SO_4 y del KOH : $2\text{KOH} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$, que no puede ser descompuesto individualmente por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ni por el HNO_3 en frío, pero que poniendo una cantidad conveniente de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -formado por la unión del HNO_3 y del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - dentro de una solución de una sal neutra del K_2SO_4 , los dos compuestos se descompondrán mutuamente: el HNO_3 se unirá con el KOH para formar KNO_3 : $\text{HNO}_3 + \text{KOH} \rightarrow \text{KNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$, mientras que el H_2SO_4 se une

con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar el CaSO_4 que precipitará por ser menos soluble que el KNO_3 : $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 \downarrow + 2\text{H}_2\text{O}$. En el mismo interior del diagrama, junto al K_2SO_4 está el número 8, que representa el valor asignado (supuesto por Fourcroy) a la fuerza de adhesión del H_2SO_4 con el KOH y junto al $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ está un 4 que representa la fuerza de adhesión entre el HNO_3 y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$; ambos números, cuya suma es 12, están unidos por la frase *quiescent attractions*, que es la tendencia a preservar a los dos compuestos unidos; justo debajo del KNO_3 está un 7 y sobre el CaSO_4 se ubica un 6, que son los valores estimados de la fuerza de adhesión del KOH con el HNO_3 y del H_2SO_4 y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, respectivamente; ambos números, cuya suma es 13, están unidos por la frase *divellent attractions* para indicar el valor (supuesto) que contraataca y destruye a las *quiescent attractions*, por lo que, si el valor de la suma de las primeras (en este caso 13) es mayor al de las segundas (12) existirá una doble descomposición y una nueva doble combinación. En la descripción anterior se ha traducido el lenguaje alquímico que se continuaba usando en el siglo XVI -el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aparece en el diagrama como *cal*, el KOH como *potasa*, el CaO como *cal viva* y el KNO_3 como *nitre*- al lenguaje químico actual, cuyas bases sentaron Lavoisier y sus colaboradores y que Forcroy incluyó en la última edición de su libro (1791). Del ejemplo de Fourcroy nace la idea de las dos parejas de la novela de Goethe. No todos los químicos de la época estaban de acuerdo con la teoría de la afinidad por lo que hubo objeciones, una general procedió de las condiciones en las que se medía la afinidad: en seco o por vía húmeda; otra, vino de Antoine Fizes (1689-1765), quien afirmó que afinidad y atracción eran conceptos incapaces de explicar ningún hecho químico y otra más de Antoine Monnet (1744-1829), quién decía que era químérico pensar que la afinidad pudiera aportar algo útil a la ciencia. Su intuición fue cierta pues los intentos no fueron exitosos; sin embargo, el trabajo realizado alrededor de estos conceptos permitió entender y avanzar en otros importantes para la química.

Durante los primeros tres cuartos del siglo XVIII lo comúnmente aceptado era que las sustancias que se unían perdían algunas de sus propiedades, mientras que los compuestos resultantes tomaban algo de esas propiedades originales. Las ideas respecto a la afinidad, que prevalecieron durante un poco más del tercer cuarto del siglo XVIII en Europa e Inglaterra, se encuentran en el libro del francés Pierre J. Macquer (1718-1784) [20], en el cual establece siete propuestas para explicar “la naturaleza de las afecciones de la materia”; en ellas están dos definiciones de afinidad, una en el aspecto físico “todas las sustancias similares tienen una Afinidad entre ellas y están consecuentemente dispuestas a unirse; como el agua con el agua y la tierra con la tierra; y otra en el químico, “si un cuerpo consiste de dos sustancias y se le presenta una tercera, que ninguna afinidad tiene con una de las primeras, pero tiene una gran afinidad con la otra, mayor de lo que las dos primeras tienen entre ellas, habrá una descomposición y una nueva unión; esto es, la tercera sustancia separará a las dos primeras para unirse con la que tiene gran afinidad, dejando en libertad a la otra. Algunas

veces la tercera sustancia no separa la unión de las dos primeras, sino que se une al compuesto, formando uno nuevo. En 1789, 25 años después de la publicación de los libros de Macquer, sale a la luz el libro de un colaborador del francés Antoine Lavoisier, el también francés Antoine Francois Fourcroy (1755-1809) *Elements of Natural History and of Chemistry* [19]. Él también hace una distinción entre una afinidad física y otra química; a la primera le llama “Atracción” o “Afinidad de agregación” y ofrece como ejemplo “cuando dos glóbulos de mercurio están separados por cierta distancia y tienden, en virtud a una fuerza, a unirse para formar una esfera”; a la segunda la define como “Atracción” o “Afinidad de composición”; para esta plantea ocho leyes, en las que puede notarse un cambio respecto a las 7 proposiciones de Macquer; en resumen dicen: 1. Las sustancias deben de ser de naturaleza diferente; 2. La atracción actúa sólo entre las partículas diminutas de los cuerpos; 3. Se pueden unir más de dos sustancias; 4. Por lo menos una de las sustancias debe de estar en estado fluido; 5. Al combinarse dos sustancias sufren un cambio de temperatura; 6. Dos sustancias unidas forman un compuesto cuyas propiedades son diferentes al de las sustancias que lo formaron; 7. La afinidad es medible por la dificultad de destrucción del compuesto formado; y 8. Existen diferentes grados de atracción química entre las sustancias, que puede determinarse por observación. Este resumen presenta la idea que para entonces se tenía de la afinidad.

4. La afinidad química a través de la lógica

El mismo año (1789) Antoine Lavoisier publicó su libro *Traité Élémentaire de Chimie*; en el *Discurso preliminar* Lavoisier explica dos aspectos muy importantes: 1. Que en sus trabajos anteriores no había evidenciado los principios de la lengua establecidos por su amigo el abad Etienne Bonnot De Condillac (1715-1780), contenidos en su obra relativa a la lógica [21], los cuales establecen que “no pensamos más que con el auxilio de las palabras; que las lenguas son verdaderos métodos analíticos; que el álgebra más sencilla, exacta y adecuada en la forma de expresar su objeto, es a la vez una lengua y un método analítico; y que el arte de razonar no es más que una lengua bien hecha”, por lo que, dice, recapacitó y estableció que su único objeto al ocuparse de la nomenclatura era perfeccionar la lengua química. Lavoisier había publicado el trabajo *Méthode de nomenclature chimique* (1787), realizado junto a Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816), quien había tenido la idea de reformarla, Claude Louis Berthollet (1748-1822) y Antoine Fourcroy. Ellos quedarían como herederos del prestigio de Lavoisier después de que murió guillotinado durante la revolución francesa. 2. Que él mismo se había impuesto una ley rigurosa: la de nunca pasar más que de lo conocido a lo desconocido; de no deducir ninguna consecuencia que no se derive inmediatamente de las experiencias y observaciones; y de encadenar los hechos y las verdades químicas en el orden más apropiado que facilite la comprensión, todos principios contenidos en la obra del abad de Condillac- y que, fundamentado en esta ley, decidió omitir el tema de las

afinidades químicas o atracciones electivas en su libro porque “sin dejar de apreciarlo como la parte de la química más susceptible quizás de llegar a ser un día una ciencia exacta, no se tienen aún los datos básicos o estos no son lo bastante precisos y exactos como para que puedan llegar a ser el apoyo fundamental de una parte tan importante de la química”. Sin la influencia del pensamiento del abad De Condillac, la obra de Lavoisier no sería lo que es.

4. Conclusión

Sin la liberación del pensamiento europeo, suscitado por el conocimiento del pensamiento clásico griego, la historia del desarrollo de la ciencia hubiera sido diferente y habría tomado otros caminos y, tal vez, mucho más tiempo. De cualquier forma, no fue sencillo desembarazarse de las creencias medievales y lograr encauzar el entendimiento por el camino de la lógica y la razón. La idea de crear tablas y diagramas de afinidad entre las sustancias y todo el trabajo desarrollado a su alrededor como instrumentos para entenderla, no fueron del todo vanos pues abrieron otros caminos.

5. Referencias

- [1] Salas, G., Ramírez, J., Restrepo, O., Cockrell, B. y Noguez, M. La importancia de llamarse afinidad química. Parte I: La semilla. *Dyna*, Año 79, No. 173, pp. 135-144, 2012.
- [2] Salas, G., Ramírez, J., Restrepo, O., Noguez, M. y Cockrell, B. La importancia de llamarse afinidad química. Parte II: La semilla germina. *Dyna*, Año 80, No. 177, pp. 162-170, 2013.
- [3] Salas, G., Ramírez, J., Restrepo, O., Noguez, M. y Cockrell, B. La importancia de llamarse afinidad química. Parte III: El crecimiento vano. *Dyna*, Año 80, No. 181, pp. 219-144, 227, 2013.
- [4] Pagden, A. *The idea of Europe*, Cambridge University Press/Woodrow Wilson Center Press, Cambridge y Washington, p.81, 2002.
- [5] *Ibid.*, p.84.
- [6] Southern, R.W. *Scholastic humanism and the unification of Europe* Volume I: Foundations, Basil Blackwell, Oxford, p.1, 1995.
- [7] *Ibid.*, pp. 205-206.
- [8] Crombie, A.C. Grosseteste's position in the history of science, en Robert Grosseteste: Scholar and Bishop, D. A. Callus (ed.), Clarendon Press, Oxford, p. 98, 1955.
- [9] Morris, C. *The discovery of the individual: 1050-1200*, SPCK, Londres, pp.161-166, 1972.
- [10] Boyle, R. *The sceptical chymist*, en Birch, T. (ed.) *The Works of the Honorable Robert Boyle*, Johnson *et. al.*, Londres, 1772.
- [11] Mi Gyung, K. *Affinity, that elusive dream*, The MIT Press, Cambridge y Londres, p. 1, 2003.
- [12] Adler, J. *Goethe's use of chemical theory in his elective affinities*, en Cunningham, A. and Jardin, N. (eds). *Romanticism and Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 263-279, 1990.
- [13] Boyle, R. *About the mechanical origin or production of divers particular qualities among which is inserted a Discourse of the imperfection of the chemist's doctrine qualities; Together with some Reflections upon the Hypothesis of Alkali and Acidum*, Flesher, Oxford, 1675.
- [14] Geoffroy, E.F. *Table des différents rapports observés en Chimie entre différentes substances*, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences. Avec des Mémoires de Mathématique & de Physique pour la même Année*, 202-212, 1718.
- [15] Portela, E. *La química ilustrada*, Vol. 33; Akal, Madrid, p. 20, 1999.
- [16] Grapí, P. *La relevancia de la textualización en la implantación de una innovación científica, el caso de las afinidades químicas a principios del siglo XIX en Francia*, *ÉNDOXA*, Series Filosóficas, No. 14, pp. 137-155, 2001.
- [17] Bertomeu, J.R. *La constitución de la química moderna*, disponible en <http://www.uv.es/~bertomeu/material/museo/GUIA4.html>. [Consultado el 8 de enero de 2014].
- [18] Lavoisier A. *Traité elementaire de chimie présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes*, Tome premier, Paris, chez Couchet libraire, pp. 203-322, 1789.
- [19] Fourcroy, A.F. *Elements of natural history and of chemistry*, Vol. I, impreso para C. Elliot and T. Kay; and C. Elliot (Edimburgo), Londres, pp 63-65, 1790.
- [20] Maquer, P.J. *Elements of the theory and practice of Chemistry*, Vol. I, impreso para A. Millar y J. Nourse, Londres, p. 11-14, 1758.
- [21] De Condillac, E.B. *La logique, ou les premiers développemens de l'art de penser*, L'esprit & Debure l'ainé, Paris, 1780.