

REVISTA INGENIERÍAS

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

Vol. 17 Núm. 33 Julio-Diciembre de 2018



**Universidad
de Medellín**
Ciencia y Libertad





**Universidad
de Medellín**
Ciencia y Libertad

REVISTA INGENIERÍAS

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

Volumen 17, número 33, julio-diciembre de 2018

ISSN (electrónico): 2248-4094

ISSN (impreso): 1692-3324

Nuestra publicación ha sido admitida en:

- ISI-Web of Science, Scielo Citation Index
- Índice Bibliográfico Nacional de Publicaciones Seriadas Científicas y Tecnológicas, Publindex, Colciencias, clasificación B
- Scientific Electronic Library Online (SciELO) Colombia
- Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias-Periódica, Universidad Nacional Autónoma de México
- Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal-Latindex
- Bases de datos "Fuente Académica", "Fuente Académica Premier" y "Academic Search Complete" de Ebsco Information Services
- Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Redalyc)
- Base de datos "Scifinder" de Chemical Abstracts Service
- Base de datos "Informe Académico" de Gale Cengage Learning
- Dialnet. Red de revistas científicas de investigación de habla hispana
- IET-Inspecc
- Directory of Open Access Journals (DOAJ)

Aura Marlienny Arcila Giraldo
Presidenta Honorable Consiliatura

Néstor Hincapié Vargas
Rector

Nubia Palacio
Vicerrectora de Investigaciones

Amalia María Cano-Castaño
Jefe Editorial
Sello Editorial Universidad de Medellín
seloeditorial@udem.edu.co

Fredy López-Pérez
Editor | jflopez@udem.edu.co

Carlos Andrés Arredondo
Coeditor | caaredondo@udem.edu.co

Juan Felipe Vargas Martínez
Asistencia Editorial

InFolio. Corrección de textos
Corrección de estilo

Olga Gil Domínguez
Traductora (español-inglés)

Fabrizia Ribeiro
Traductora (español-portugués)

Hernán Durango
Diagramación

Claudia Castrillón
Diseño de carátula

Foto de carátula
Poder por Fredy López-Pérez

COMITÉ EDITORIAL

Editor: Dr. Fredy López-Pérez, Universidad de Medellín, Colombia
Coeditor: Dr. Carlos Andrés Arredondo, Universidad de Medellín, Colombia
Dr. Alejandro Zuleta Gil, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia
Dr. Ana María Cárdenas Soto, Universidad de Antioquia, Colombia
Dr. Bell Manrique Losada, Universidad de Medellín, Colombia
Dr. Damia Vericat, Universidad de Lleida, España
Dr. Diana Isabel Quevedo-Tejada, Universidad de Santiago de Chile, Chile
Dr. Germán Urrego Giraldo, Universidad de Antioquia, Colombia
Dr. Harveth Hernán Gil Sánchez, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Colombia
Dr. Jordi Morató, Universidad Politécnica de Cataluña, España
Dr. José Gallardo Arancibia, Universidad Católica del Norte, Chile
Dr. Juan Bosco Hernández, Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dr. María Guadalupe Valladares-Cisneros, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
Dr. Marta Silvia Tabares Betancur, Universidad Eafit, Colombia
Dr. Martín Solari Buela, Universidad ORT Uruguay, Uruguay
Dr. Mauricio González Betancourt, Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria, Colombia
Dr. Mauricio Hincapié, Institución Universitaria Salazar y Herrera, Colombia
M. Sc. Melissa Parra Obando, Universidad de Medellín, Colombia
Dr. Óscar Pastor López, Universidad Politécnica de Valencia, España
Dr. Paulo B. Lourenço, Universidad de Minho, Portugal
Dr. Pedro M. Wightman, Universidad del Norte, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Dra. Alice Elizabeth González, Universidad de la República, Uruguay
Dr. André Pacheco de Assis, Universidade de Brasília, Brasil
Dr. Claudio Meneses Villegas, Universidad Católica del Norte, Chile
Dr. Guillermo Franco, Catastrophe Risk Research-EMEA, Guy Carpenter, Reino Unido
Dr. Jorge A. Ramírez, Colorado State University, Estados Unidos
Dr. José Luis Rosúa Campos, Universidad de Granada, España
Dr. Juan Diego Jaramillo Fernández, Universidad Eafit, Colombia
Dr. Luis Joyanes Aguilar, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Pontificia de Salamanca, España
Dra. Teresa López Lara, Universidad Autónoma de Querétaro, México
Dra. Valeria Herskovic, Universidad Católica del Norte, Chile

Canje, correspondencia y suscripciones: Biblioteca de Facultades "Eduardo Fernández Botero" Universidad de Medellín
Teléfonos: 340 5252- 340 5276. Fax (57-4) 345 5216
Correo electrónico: rbarrientos@udem.edu.co, revistaingenierias@udem.edu.co
Sitio web: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias>
Medellín, Colombia, Suramérica

Impresión
Xpress Estudio Gráfico y Digital
Bogotá, Colombia

Fecha de impresión: diciembre de 2018
Tiraje: 200 ejemplares

Queda autorizada la reproducción total o parcial de los contenidos de la revista con finalidades educativas, investigativas o académicas siempre y cuando sea citada la fuente. Para poder efectuar reproducciones con otros propósitos, es necesario contar con la autorización expresa del Sello Editorial Universidad de Medellín. Las ideas, contenidos y posturas de los artículos son responsabilidad de sus autores y no comprometen en nada a la institución ni a la revista.

Misión

La Universidad de Medellín, fundamentada en su lema *Ciencia y Libertad* y comprometida con la excelencia académica, tiene como misión la formación integral, la generación de conocimiento y la promoción de la cultura, en un ambiente crítico, de innovación e inclusión, para contribuir a la solución de problemas, mediante el desarrollo de la docencia, la investigación y la extensión, en su entorno local, regional, nacional e internacional.

Visión

Para 2030 la Universidad de Medellín, inspirada en el pensamiento libre y el desarrollo humano, será reconocida como una de las mejores de Latinoamérica, por su excelencia académica e investigativa, la innovación y la responsabilidad social, en un marco global de pertinencia, inclusión y diversidad cultural.

Valores

Justicia
Excelencia
Respeto
Solidaridad
Pluralismo
Tolerancia
Autenticidad
Interdisciplinariedad

Misión de la Revista

Hacer difusión de resultados de investigación en los ámbitos de las ingenierías civil, ambiental, financiera, en energía, de telecomunicaciones, de sistemas y áreas afines, mediante la publicación de textos en forma de artículos de investigación científica, de reflexión, de revisión, artículos cortos, reportes de caso, revisión de tema, cartas al editor, editorial, traducciones o documentos de reflexión no derivados de investigación.

Mission of the Journal

To publish research results in fields such as civil engineering, environmental engineering, financial engineering, energy engineering, telecommunication engineering, computer sciences engineering, and related areas, through publication of text in the form of scientific research articles, reflection articles, revision articles, short articles, case reports, topic review, letters to the editor, editorials, translations, or reflection documents not resulting from research.

Missão do compartimento

Fazer difusão dos resultados da pesquisa nas áreas das Engenharias civil, ambiental, financeira, em energia, das telecomunicações, da computação e áreas afins, por meio da publicação de textos, na forma de artigos de pesquisa científica, de reflexão, de revisão, artigos curtos, reporte de casos, revisão de tópicos, cartas ao editor, editorial, traduções o documentos de reflexão não derivados da pesquisa.

Contenido

Presentación	7
<i>Introduction</i>	8
<i>Presentação</i>	9
Editorial	11
<i>Editorial (English)</i>	12
<i>Editorial (Português)</i>	13
Colaboradores.....	15
Parámetros explosivos para muestras de carbón (Antioquia, Colombia).....	19
<i>Explosive parameters for carbon samples (Antioquia, Colombia)</i>	
<i>Parâmetros explosivos para amostras de carvão (Antioquia, Colômbia)</i>	
<i>Rafael Fuentes, Jorge Molina y Astrid Blandón</i>	
La vivienda sostenible, desde un enfoque teórico y de política pública.....	39
<i>Guidelines for sustainable social interest housing study case: Medellín (Colombia)</i>	
<i>A moradia sustentável a partir de um enfoque teórico e de política pública na Colômbia</i>	
<i>Diana Elizabeth Valencia</i>	
Estudio de la resistencia a tracción en anclajes estructurales posinstalados con adhesivo epóxico.....	57
<i>Traction resistance study of post-installed epoxy adhesive anchors</i>	
<i>Estudo da resistência à tração em ancoragens estruturais pós-instaladas com adesivo epóxi</i>	
<i>Diego Fernando Páez Moreno y Jeniffer Hamón Caicedo</i>	
Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión.....	71
<i>Use of blast furnace and steel slags in asphalt mixtures: a review</i>	
<i>Uso de escórias de alto-forno e aço em misturas asfálticas: revisão</i>	
<i>Hugo Alexander Rondón Quintana, Marcio Muniz de Farias y Fredy Alberto Reyes Lizcano</i>	
Aceleraciones de piso para diseño de elementos no estructurales y estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica en edificios.....	99
<i>Floor accelerations for the design of non-structural and structural elements, which are not part of the earthquake-resistant system of buildings</i>	
<i>Acelerações de piso para o desenho de elementos não estruturais e estruturais que não fazem parte do sistema de resistência sísmica em edifícios</i>	
<i>Ricardo E. Barbosa, José J. Álvarez E. y Julián Carrillo León</i>	

Complemento de Vs.Net para la definición óptima de pruebas de software de caja negra mediante arreglos de cobertura.....121
Vs.Net plug-in for the optimal definition of black box software testing based on covering arrays
Complemento de vs.Net para a definição ideal de testes de software de caixa-preta por meio de covering arrays
Jaime Herney Meneses Ruiz, Eduar Alexis Peña Velasco, Carlos Alberto Cobos Lozada, Jimena Adriana Timaná Peña y José Torres-Jiménez

Metodología de aprendizaje del sistema numérico binario basado en la teoría de aprendizaje por descubrimiento.....139
A methodology for learning binary numeric system using Discovery learning theory
Metodologia de aprendizagem do sistema numérico binário baseada na teoria de aprendizagem por descoberta
Ómar Iván Trejos Buriticá

Control predictivo/adaptativo de sistemas complejos utilizando técnicas de ingeniería neuronal157
Predictive/adaptive control of complex systems using neuronal engineering techniques
Controle preditivo/adaptativo de sistemas complexos utilizando técnicas de engenharia neural
José Gallardo
Claudio Ayala
Rubén Castro

Priorización de despachos en empresas de manufactura usando QFD difuso173
Dispatch prioritization in manufacturing firms using fuzzy QFD
Priorização de despachos em empresas de manufatura usando QFD difuso
Juan Carlos Osorio Gómez, Mayra Alejandra Peña Vega y Deysi Yulieth Arias Giraldo

El “síndrome de echar la culpa” desde una mirada sistémica y sus repercusiones para la solución de problemas en la empresa187
“Vulnerable system syndrome” from a systemic perspective and its repercussions for problem solving in business contexts
A síndrome de “colocar a culpa” a partir de uma perspectiva sistemática e suas repercussões para a solução de problemas na empresa
Jorge Pérez-Rave y Favián González-Echavarría

Instrucciones a los autores 207
Guide for authors

<i>Revista Ingenierías</i> <i>Universidad de Medellín</i>	Medellín Colombia	Vol. 17	Núm. 33	Julio-Diciembre	2018	220 pp.	ISSN (electrónico): 2248-4094 ISSN (impreso) 1692-3324
--	----------------------	---------	---------	-----------------	------	---------	---

Presentación

Revista Ingenierías Universidad de Medellín es una publicación semestral que, desde el año 2002, ha estado orientada a construir comunidad académica entre los ingenieros del país y los de habla hispana en el mundo.

Por nacer en la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Medellín, la revista cubre los intereses temáticos de diferentes ramas de la ingeniería como un aporte al diálogo entre sus distintas especialidades. No obstante, por su historia en nuestra publicación, los contenidos de ingenierías ambiental, de sistemas, financiera, de telecomunicaciones y civil han tenido una mayor difusión.

En épocas recientes otras ingenierías como la industrial, la eléctrica y la electrónica, la administrativa y otras disciplinas conexas de las ciencias básicas como las matemáticas, la física y la química han hecho igualmente contribuciones interesantes en nuestra revista.

Considerando su crecimiento en el contexto de las revistas científicas nacionales, la *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* prioriza la recepción de producción derivada de proyectos de investigación que tengan como pretensión la divulgación de resultados y la apertura de la discusión en torno a ellos. Sin embargo, se abre igualmente a otro tipo de producción académica no derivada de investigación como las revisiones de literatura, las reflexiones, los análisis de caso y los ensayos, entre otros, bajo la convicción de que tienen un papel importante en el fortalecimiento y circulación del conocimiento en ingeniería.

Introduction

Scientific journal *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* is a biannual publication which, since year 2002, has been focused on the construction of an academic community from all the engineers of the country and those international Spanish-speaking engineers, in general terms.

Since it was created at Universidad de Medellín School of Engineering Programs, our scientific journal covers interests of its five undergraduate programas and related disciplines, in areas such as Environmental Engineering, Computer Science Engineering, Financial Engineering, Telecommunication Engineering, and Civil Engineering, in addition to basic sciences such as Mathematics, Physics, and Chemistry.

Bearing in mind its growth within the context of national scientific journals, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* gives priority to products resulting from research projects which main objective is to disclose results and open a discussion on them. However, academic production not resulting from research, such as literatura revisions, reflections, case analysis, essays, etc. are also accepted.

Apresentação da revista

A *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* é uma publicação semestral que, desde 2002, esteve orientada a construir uma comunidade acadêmica entre os engenheiros do país e os hispanofalantes no mundo.

Por nascer na Faculdade de Engenharias da Universidad de Medellín, a revista cobre os interesses temáticos de diferentes ramos da engenharia como uma contribuição ao diálogo entre suas diferentes especialidades. Contudo, por sua história em nossa publicação, os conteúdos das engenharias ambiental, de sistemas, financeira, de telecomunicações e civil tiveram uma maior difusão.

Recentemente, outras engenharias, como a industrial, a elétrica e a eletrônica, a administrativa, e outras disciplinas associadas com as ciências básicas, como a matemática, a física e a química, também trouxeram contribuições interessantes para a nossa revista.

Considerando seu crescimento no contexto das revistas científicas nacionais, a *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* prioriza a recepção de produção derivada de projetos de pesquisa que tenham a pretensão de divulgar resultados e dar espaço à discussão em torno deles. No entanto, abre-se igualmente a outro tipo de produção acadêmica não derivada de pesquisas, como as revisões de literatura, as reflexões, as análises de caso e os ensaios, entre outros, com a convicção de que têm um papel importante no fortalecimento e circulação do conhecimento em engenharia.

Editorial

Respetado lector:

Publicamos con gusto el número 33 de la *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.

La edición de revistas científicas en Colombia se enfrenta a retos cada vez mayores. Publindex viene generando espacios de fortalecimiento editorial y cambiando sus procesos de cara a sintonizar la producción de revistas en Colombia con las tendencias internacionales de mayor calidad. Este proceso se enfrenta con los obstáculos que supone la circunstancia de que la mayoría de revistas científicas en Colombia, incluida la nuestra, surgieron en un contexto y bajo una lógica casi opuesta a la actual.

Consolidar una imagen en la que la revista guarde independencia de la facultad y la universidad de origen, implementar el Open Journal System versión 3, aumentar la proporción de autores de fuera de Colombia, enriquecer la experiencia de navegación e interactividad en la página web de la revista, incrementar el índice de impacto de los editores, elevar la calidad de los procesos editoriales entre los que se cuentan menores tiempos de respuesta, mayores tasas de rechazo de artículos, publicación en inglés, eliminación de impresos, publicación en flujo continuo, entre otros, constituyen el reto para nuestra revista en este instante.

Esperamos que la comunidad que sirve de soporte a la *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* nos ofrezca el apoyo necesario para encarar las nuevas realidades de la revista. Como equipo editorial, esperamos no defraudar en el intento.

Confiamos en que los diez artículos que presentamos en este número empiecen a reflejar la transición que necesitamos materializar en muy poco tiempo.

Gracias por su acompañamiento permanente.

Fredy López-Pérez
Editor

Editorial (English)

Respected reader:

We are pleased to publish number 33 of *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.

The edition of scientific journals in Colombia is facing increasing challenges. Publindex has been generating spaces for editorial strengthening and changing its processes in order to tune the production of journals in Colombia with the highest quality international trends. This process faces the obstacles posed by the fact that the majority of scientific journals in Colombia, including ours, arose in a context and under a logic almost opposite to the current one.

Consolidating an image in which the journal maintains independence from the school and the university of origin, implementing the Open Journal System version 3, increasing the proportion of authors from outside Colombia, enriching the experience of navigation and interactivity on the journal's web page, increasing the impact index of editors, raising the quality of editorial processes among which are shorter response times, higher rates of rejection of articles, publication in English, elimination of printed materials, publication in continuous flow, among others, constitute the challenge for our journal at this time.

We hope that the community that supports la *Revista Ingenierías de la Universidad de Medellín* offers us the necessary support to face the new realities of the journal. As an editorial team, we hope not to disappoint it.

We hope that the ten articles we present in this issue will begin to reflect the transition that we need to materialize in a very short time.

Thank you for your permanent accompaniment.

Fredy López-Pérez
Editor

Editorial (Português)

Respeitado leitor,

É com prazer que publicamos o número 33 da *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.

A edição de revistas científicas na Colômbia enfrenta desafios cada vez maiores. O Publindex vem gerando espaços de fortalecimento editorial e alterando seus processos com o objetivo de sintonizar a produção de revistas na Colômbia com as tendências internacionais de maior qualidade. Esse processo enfrenta obstáculos que supõe a circunstância de que a maioria das revistas científicas na Colômbia, incluindo a nossa, surgiram em um contexto e sob uma lógica quase oposta à atual.

Consolidar uma imagem na qual a revista se mantenha independente da faculdade e universidade de origem, implementar o Open Journal System versão 3, aumentar a proporção de autores estrangeiros, enriquecer a experiência de navegação e interatividade na página web da revista, incrementar o índice de impacto dos editores, elevar a qualidade dos processos editoriais — que incluem menores tempos de resposta, maiores taxas de reprovação de artigos, publicação em inglês, eliminação de impressos, publicação em fluxo contínuo, entre outros —, constituem o desafio para a nossa revista neste instante.

Esperamos que a comunidade que serve de suporte à *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* nos ofereça o apoio necessário para encarar as novas realidades da revista. Como equipe editorial, esperamos não falhar nesse processo.

Esperamos que os dez artigos que apresentamos neste número comecem a refletir a transição que precisamos materializar em pouco tempo.

Obrigado por sempre nos acompanhar.

Fredy López-Pérez
Editor

Colaboradores

RICARDO LAÍN HUERTA, Ph. D.

Universidad Politécnica de Madrid, España

MIGUEL HESQUIO GARDUÑO, M. Sc.

Instituto Politécnico Nacional, México

ELOY ASENSIO DE LUCAS, Ph. D.

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, España

SHEYLA BAPTISTA SERRA, Ph. D.

Universidade Federal de São Carlos, Brasil

TOMÁS ANTONIO MOREIRA, Ph. D.

Instituto de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de São Paulo, Brasil

APOLINAR FIGUEROA, Ph. D.

Universidad del Cauca, Colombia

MARIO MILVER PATIÑO VELASCO, M. Sc.

Universidad del Cauca, Colombia

EDIER HUMBERTO PÉREZ, Ph. D.

Universidad del Cauca, Colombia

JULIO CÉSAR DALLA MORA ESQUERDO, Ph. D.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil

NICOLÁS PERALTA, Ph. D.

Sunvapor, Estados Unidos

LOREDANA CONTRAFATTO, Ph. D.

Universidad de Catalia, Italia

NORBERTO JOSÉ ROJAS MERCEDES, Ph. D.

Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana

RODRIGO DELGADILLO, Ph. D.

Universidad Técnica Federico Santa María, Chile

GUILLERMO BRANTE LARA, M. Sc.

Ministerio de Obras Públicas, Chile

EDÉN BOJÓRQUEZ, Ph. D.

Universidad de Sinaloa, México

PEDRO ROJAS CRUZ, Ph. D.

Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador

JOSÉ FUERTES CASTRO, Ph. D.

Universidad Politécnica de Madrid, España

ALEJANDRO ZUNINO, Ph. D.

Universidad Nacional del Centro, Argentina

DAVID MORALES OROZCO, M. Sc.

Instituto Tecnológico Superior del Sur Guanajuato, México

JUAN CRUZ-BENITO, Ph. D.

Universidad de Salamanca, España

ANTONIO MIGUEL SEOANE PARDO, Ph. D.

Universidad de Salamanca, España

JULIO DANIEL GUERRA HOLLSTEIN, M. Sc.

Universidad Austral de Chile, Chile

JAVIER BOTIA, Ph. D.

Universidad de Antioquia, Colombia

NATALIA GAVIRIA, Ph. D.

Universidad de Antioquia, Colombia

JESÚS CRUZ ÁLVAREZ, Ph. D.

Universidad Autónoma de Nuevo León, México

CARMEN PATRICIA JIMÉNEZ TERRAZAS, Ph. D.

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México

JOSÉ ORDÓÑEZ, Ph. D.

Fundación Universitaria de Popayán, Colombia

ALEXANDRE CAMARGO COUTINHO, Ph. D.

Embrapa Informática Agropecuária, Brasil

JORGE GÓMEZ GÓMEZ, Ph. D.

Universidad de Córdoba, Colombia

JUAN FRANCISCO MENDOZA MORENO, M. Sc.

Universidad Santo Tomás Sede Tunja, Colombia

FERNANDA DOS SANTOS, Ph. D.

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

ÁLVARO GUARÍN, Ph. D.

Universidad Eafit, Colombia

Parámetros explosivos para muestras de carbón (Antioquia, Colombia)*

Rafael Fuentes**
Jorge Molina***
Astrid Blandón****

Recibido: 08/05/2017 • Aceptado: 07/03/2018

<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a1>

Resumen

Mediante análisis próximos (humedad residual, HR, cenizas, Cz, materia volátil, MV, carbono fijo, CF, azufre total, ST y poder calorífico, PC), granulométricos, pruebas de temperatura mínima de ignición en nube (TMIn), límite inferior de explosividad (LIE) y severidad de la explosión (Kmáx); se propone identificar cuál carbón produce el polvo más explosivo.

Para la mayoría de las muestras, la más alta cantidad de volumen de partículas de carbón se encuentra entre los 100 μm y los 200 μm . Para la muestra de Amagá, el volumen de partículas menores de 10 μm es el mayor, lo cual está de acuerdo con los resultados de la TMIn, que es la más baja (400 °C), el menor LIE (30 g/m^3) y el mayor valor Kmáx (176 bar, m/s). Por el contrario, la muestra de Angelópolis presenta una curva muy sesgada hacia tamaños entre los 60 μm y 300 μm , por tanto, su TMIn es la más alta (480 °C) de la zona oriental de la cuenca del Sinifaná y su LIE es bajo 60 g/m^3 , e igualmente presenta el menor valor de Kmáx (106 bar, m/s), así, se observa, que existe una relación directa entre la granulometría y los resultados de severidad y sensibilidad a la explosión.

En general se ve un comportamiento diferente entre las muestras de los municipios de Amagá y Titiribí, especialmente entre el LIE y los resultados de los análisis de MV, CF y PC, con respecto a las demás muestras, lo cual también está de acuerdo con su mayor susceptibilidad a la inflamación y a la explosividad.

Palabras clave: polvo de carbón; explosividad; análisis próximos.

* Proyecto de investigación *Determinación del grado de explosividad del polvo de carbón y cuantificación del contenido de gas metano en los mantos de carbón de la cuenca del Sinifaná*, Gobernación de Antioquia, Sistema General de Regalías, Medellín, 2014-2015.

** Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen. Medellín, Colombia. Calle 65 N.º 78-28, bloque M. Correo electrónico: refuentesc@unal.edu.co. Teléfono: +57+4 5365190. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5132-4289>

*** Ph. D. Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen. Medellín, Colombia. Calle 65 N.º 78-28, bloque M. Correo electrónico: jmmolina@unal.edu.co. Teléfono: +57+4 4255230. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6068-2571>

**** Ph. D. Ingeniera Geóloga. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo Materia Orgánica Sedimentaria y Análisis de Imagen. Medellín, Colombia. Calle 65 N.º 78-28, bloque M. Correo electrónico: asblando@unal.edu.co. Teléfono: +57+4 4255243. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4537-2046>

Explosive Parameters for Coal Samples (Antioquia, Colombia)

Abstract

Through proximate analysis (residual moisture, RM, ashes, As, volatile matter, VM, fixed carbon, FC, total Sulphur, TS and calorific value, CV), granulometric, minimum cloud ignition temperature tests (TMIn), lower explosion limit (LEL) and explosion severity (K_{máx}); it is proposed to identify which coal produces the most explosive dust.

For most samples, the highest amount of coal particle volume is between 100 µm and 200 µm. For the Amagá sample, the volume of particles smaller than 10 µm is the largest, which agrees with the results of the TMIn, which is the lowest (400 °C), the lowest LEL (30 g/m³) and the highest K_{máx} value (176 bar, m/s). On the contrary, the Angelópolis sample presents a very skewed curve towards sizes between 60 µm and 300 µm, therefore, its TMIn is the highest (480 °C) of the Eastern Zone of the Sinifaná basin and its LEL is under 60 g/m³, and it also presents the lowest value of K_{máx} (106 bar, m/s), thus, it is observed that there is a direct relationship between the granulometry and the results of severity and sensitivity to the explosion.

In general, there is a different behavior between the samples of the municipalities of Amagá and Titiribí, especially between the LIE and the results of the analyses of VM, FC and CV, with respect to the other samples, which is also in agreement with their greater susceptibility to inflammation and explosiveness.

Keywords: coal dust; explosiveness; proximate analysis.

Parâmetros explosivos para amostras de carvão (Antioquia, Colômbia)

Resumo

Por meio de análises próximas — umidade residual (UR), cinzas (Cz), matéria volátil (MV), carbono fixo (CF), enxofre total (ST) e poder calorífico (PC) —, granulométricas, testes de temperatura mínima de ignição na nuvem (MIT), limite inferior de explosividade (LIE) e severidade da explosão (K_{máx}), propõe-se identificar qual carvão produz o pó mais explosivo.

Para a maioria das amostras, a quantidade mais alta de volume de partículas de carvão se encontra entre 100 µm e 200 µm. Para a amostra de Amagá, o volume de partículas menores que 10 µm é maior, o que está de acordo com os resultados da MIT, que é a mais baixa (400 °C), o menor LIE (30 g/m³) e o maior valor K_{máx} (176 bar, m/s). Por outro lado, a amostra de Angelópolis apresenta uma curva muito inclinada para tamanhos entre 60 µm e 300 µm, portanto sua MIT é a mais alta (480 °C) da zona oriental da bacia do Sinifaná e seu LIE é baixo (60 g/m³) e, igualmente, apresenta o menor valor de K_{máx} (106 bar, m/s). Assim, observa-se que existe uma relação direta entre a granulometria e os resultados de severidade e sensibilidade à explosão.

Em geral, nota-se um comportamento diferente entre as amostras dos municípios de Amagá e Titiribí — especialmente entre o LIE e os resultados das análises de MV, CF e PC — com respeito às demais amostras, o que também está de acordo com uma maior suscetibilidade à inflamação e à explosividade.

Palavras-chave: pó de carvão; explosividade; análises próximas.

INTRODUCCIÓN

Debido a la falta de control y conocimiento acerca de los peligros que tiene el polvo de carbón dentro de las minas subterráneas, es importante saber controlar la polución y evitar catástrofes, en especial la pérdida de vidas. Solo hasta el año 2014 se comienza un estudio riguroso de las situaciones de riesgo generadas por el polvo de carbón en la pequeña minería situada en la cuenca del Sinifaná [1]. Otros hechos que motivan a esta publicación son los accidentes ocurridos en esta región [2].

Conocer las propiedades que hacen explosivo al polvo de carbón, identificarlas y saber manejarlas o suprimirlas, permitirá tener un ambiente de trabajo seguro. Del análisis de las explosiones alimentadas por material pulverulento se tiene muy poco registro en Colombia debido a que ha sido un fenómeno muy poco recurrente, pero al momento en que suceden estos desafortunados eventos las consecuencias son catastróficas y mortales [1, 3-6]. Casualmente, dentro de la minería subterránea de carbón se manejan los mayores riesgos en cuanto a explosiones por material pulverulento. El polvo de carbón es un material explosivo, y a la vez omnipresente en las actividades mineras, lo cual lo hace objeto de este estudio.

El avance en la prevención de las explosiones de polvo de carbón en las minas ha sido notable, sin embargo no ha dejado de ser un problema, a veces incontrolable. Algunas empresas encargadas de extraer el carbón cuentan con poca información acerca del manejo del polvo de carbón, lo que dificulta garantizar la seguridad de las personas y reducir los riesgos [4, 7-9]. La caracterización de los parámetros de inflamabilidad dará una herramienta más para poder catalogar o dar una clasificación a los polvos de carbón y así poder determinar cuáles son más explosivos desde el punto de vista químico [10].

La explosión de un combustible en el aire consiste en la oxidación rápida del material, lo cual llega a un aumento de la temperatura y la presión. La violencia de una explosión está relacionada con la tasa de energía liberada por la reacción química, en relación con el grado de confinamiento y la pérdida de calor [11-15].

Como las explosiones de polvo de carbón no son un problema único del país (Colombia), en otros países han expedido una serie de normativas que permiten medir algunos parámetros de las explosiones por material particulado. Así mismo, han creado una serie de reglamentaciones para la prevención de estos eventos. En España, por ejemplo, promulgaron las normas ATEX (para el control de atmósferas explosivas) que establecen pruebas de laboratorio para determinar los límites permisibles de un material particulado dentro de un entorno confinado [16], también identifican las temperaturas mínimas a las cuales explota una nube de polvo [17] e, incluso, le dan categorías al

poder de destrucción que pueda causar una explosión [18]; esto entre muchas más condiciones que permiten tener un entorno de trabajo seguro [19].

1. MÉTODOS

La parte experimental de este estudio consiste en analizar los parámetros relacionados con las características del carbón que influyen en una explosión de material particulado. Para lograr el objetivo se tomaron muestras de canal en cinco minas que pertenecen a la región conocida como la cuenca del Sinifaná en el departamento de Antioquia en Colombia. Se hicieron análisis granulométricos, próximos, pruebas de temperatura mínima de ignición en nube, límite inferior de explosividad y severidad de la explosión.

• Muestreo

Los mantos de carbón presentan variaciones verticales en el contenido y tipo de materia orgánica. Estas variaciones no se tienen en cuenta al momento de extraer el material a superficie, por lo tanto, se empleó la técnica de muestreo de canal para lograr analizar todo el manto de carbón. Esta técnica consiste en obtener un volumen de carbón triturado que incluya todo el espesor del manto mediante un corte uniforme, continuo y perpendicular a la estratificación. Para que la muestra fuera representativa, el muestreo de los mantos de carbón se hizo en el frente de explotación de la mina, garantizando que las condiciones naturales del material estuvieran lo más frescas posibles [1].

• Ensayos de laboratorio

Los ensayos realizados a las muestras de carbón recolectadas no se encuentran disponibles en laboratorios colombianos a excepción de los análisis próximos realizados en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Los ensayos restantes fueron realizados en el Laboratorio Oficial J. M. de Madariaga (LOM) en España. A continuación, se hace una breve descripción de dichos ensayos [1, 19-21]

1.1 Análisis próximos de carbón

Según la norma [22], estos análisis se definen como el contenido de humedad residual [23, 24], cenizas [25], materia volátil [26] y carbono fijo. Sin embargo, también se realizan los análisis próximos completos, los cuales incluyen la determinación del poder calorífico [27] y el azufre total [28].

1.2 Granulometría

La granulometría es un parámetro crucial para entender el comportamiento de las partículas dentro de una explosión. Una vez preparada la muestra dentro de los laboratorios, el tamaño medio de partícula se mide por difracción láser en vía seca [29].

1.3 Temperatura mínima de ignición en nube (TMIn)

Es la menor temperatura a la que se inicia el proceso de inflamación de una muestra de polvo. Se puede realizar el ensayo con la muestra dispersada en forma de nube (TMIn), de acuerdo a norma UNE-EN 50281-2-1: 1999.

1.4 Límite inferior de explosividad (LIE)

Es la mayor concentración de polvo en suspensión a la que no se registra inflamación y representa el límite para el cual la mezcla aire-polvo es potencialmente explosiva. Esta se hizo bajo la norma UNE-EN 14034-3: 2006.

1.5 Severidad de explosión

Cuando la inflamación de una sustancia se produce en un recinto cerrado, se produce una explosión. Se pueden determinar experimentalmente ciertas características que permiten evaluar las consecuencias de la explosión (severidad de la explosión o explosividad). De esta forma se obtienen los parámetros básicos para el diseño de medidas de protección contra la explosión [19, 21].

La presión máxima de explosión ($P_{m\acute{a}x}$), es la diferencia entre la presión en el instante de la ignición (presión normal) y la presión en el punto culminante de la curva del registro presión-tiempo. La velocidad máxima de aumento de presión con el tiempo $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ se define como la máxima pendiente de la tangente a la curva presión-tiempo a cada concentración nominal de polvo. La constante característica ($K_{m\acute{a}x}$) se obtiene mediante el producto de $(dP/dt)_{m\acute{a}x}$ y la raíz cúbica del volumen del recinto de explosión. En función del valor de $K_{m\acute{a}x}$ se define la clase de explosión, según se indica en la tabla 1.

Estos parámetros ($P_{m\acute{a}x}$ y $K_{m\acute{a}x}$), se determinan en un aparato esférico de 20 litros de capacidad, que tiene una fuente de ignición en su centro geométrico y con un dispositivo de dispersión que asegura una correcta dispersión del polvo en el interior de la cuba, según las normas EN 14034-1: 2004 +A1, 2011 y EN 14034-2: 2006+A1, 2011 respectivamente [19, 21].

Tabla 1. Clase de explosión de polvo en función de $K_{m\acute{a}x}$

<i>Clase de explosión</i>	<i>$K_{m\acute{a}x}$ (m.bar/s)</i>
St0	0
St1	1-200
St2	201-300
St3	> 300

Fuente: elaboración propia

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez conocidos los resultados de las diferentes pruebas o ensayos realizados a las muestras de carbón, se buscó una explicación que permitiera identificar los parámetros que tornan el polvo de carbón sensible a una explosión. Así mismo, se procuró utilizar los análisis próximos realizados por los laboratorios colombianos como una primera herramienta y punto de partida al momento de identificar un polvo de carbón altamente explosivo. En la tabla 2, se relacionan los códigos asignados a las muestras analizadas en España y los códigos asignados a las mismas muestras en el Laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 2. Código otorgado por los laboratorios de España y Colombia a las muestras tomadas

<i>Municipios</i>	<i>LOM</i>	<i>Laboratorio de Carbones</i>
Fredonia	UNC - 2	140312
Venecia	UNC - 8	140336
Titiribí	UNC - 14	140341
Angelópolis	UNC - 15	140349
Amagá	UNC - 19	140494

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con Molina y Blandón [5], es necesario tener en cuenta que, a la hora de evaluar los resultados, hay que hacerlo por tipo y rango de carbón, por esa razón se separan los carbones de la zona oriental (Angelópolis, Amagá, Fredonia y Venecia, los cuales se clasifican como subbituminosos) y los de la zona occidental (Titiribí, el cual es bituminoso alto en volátiles C)

2.1 Análisis próximos

La tabla 3 muestra los resultados de los análisis próximos de algunas muestras representativas de cada una de los municipios que conforman la cuenca del Sinifaná.

Tabla 3. Análisis próximos de muestras analizadas

Municipio	Humedad		Cz	MV	CF	CF (lac)	ST	PC
	Res	Total						
<i>Zona oriental</i>								
Angelópolis	9,95	11,92	2,53	40,40	47,12	53,84	0,27	6026
Amagá	8,49	9,79	3,03	42,28	46,20	52,22	0,56	6248
Fredonia	10,11	12,91	4,60	39,98	45,31	53,12	0,32	6055
Venecia	9,34	12,26	7,39	38,71	44,56	53,51	1,48	5760
<i>Zona occidental</i>								
Titiribí	5,78	7,67	3,25	40,75	50,22	55,21	0,65	6722

Res: residual (%); Cz: cenizas (%); MV: materia volátil (%); CF: carbono fijo (%); ST: azufre total (%); PC: poder calorífico (cal/g); lac: libre de agua y cenizas.

Fuente: elaboración propia

En la figura 1 se puede observar que no hay relación entre la humedad total, el contenido de cenizas y el azufre total. Tampoco hay relación entre la materia volátil, el carbono fijo y el azufre total. Pero sí se nota una variación en el contenido de carbono fijo a medida que se va de norte a sur en la zona oriental de la cuenca (Angelópolis, Amagá, Fredonia y Venecia). Con respecto a la materia volátil y al poder calorífico, se observa que hay una relación directa en la zona oriental, así, a mayor contenido de materia volátil, mayor poder calorífico, y en la zona occidental (Titiribí) también ocurre lo mismo.

Los carbones de mayor calidad (menor porcentaje de cenizas y azufre) se presentan en los municipios de Amagá y Angelópolis, mientras que en los municipios de Venecia y Fredonia se encuentran los de mayor porcentaje de material inerte. Por otro lado, los del municipio de Titiribí se encuentran en un término medio con relación al contenido de cenizas como se ve en la figura 2.

Al comparar los resultados de materia volátil (MV), carbono fijo (CF) y poder calorífico (PC) en base seca libre de humedad y cenizas (lac), se puede observar que la muestra de Amagá es la que tiene mayor porcentaje de MV y aunque tiene el menor

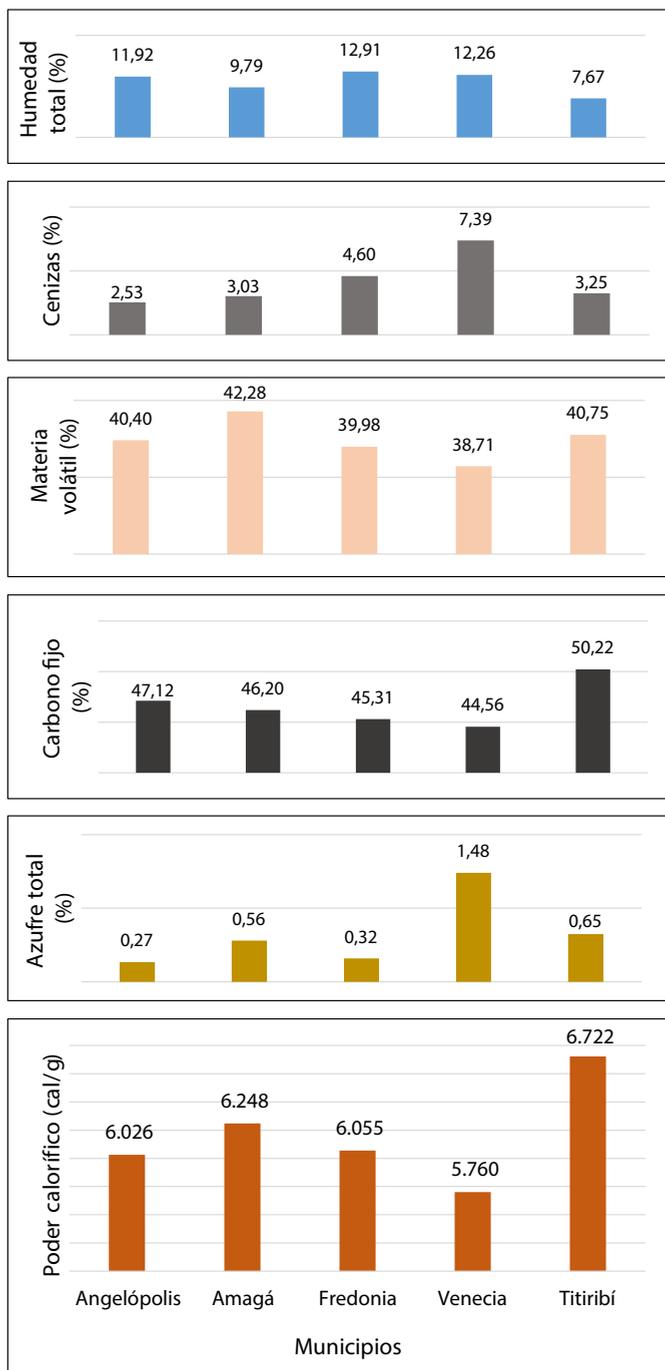


Figura 1. Diferencias entre los análisis próximos de cada una de las muestras analizadas

Fuente: elaboración propia

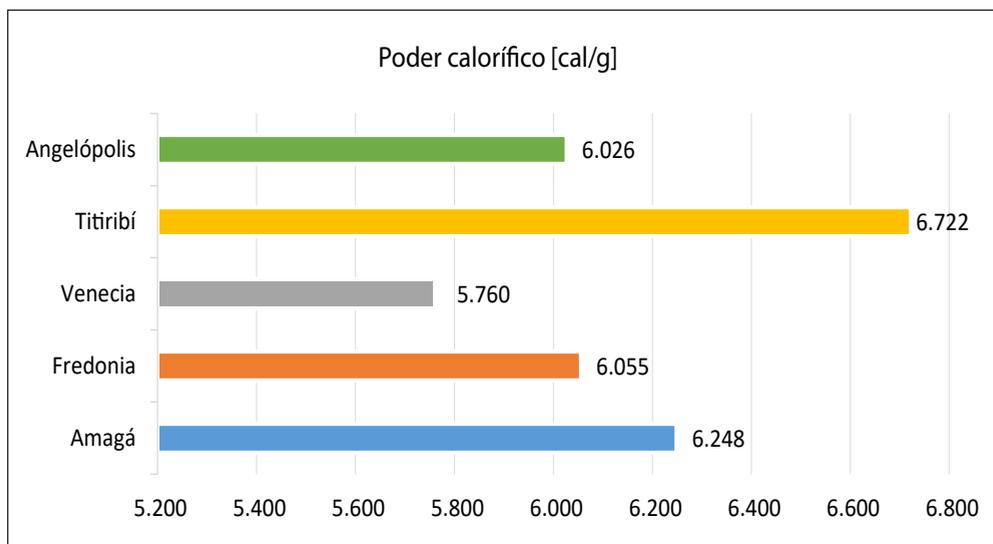


Figura 2. Poder calorífico en cada uno de los municipios

Fuente: elaboración propia

porcentaje de carbono fijo de la zona oriental, no es la que tiene el menor PC, lo que indica que en este caso, las materias volátiles pueden corresponder en gran parte a hidrocarburos y, por lo tanto, la mayor susceptibilidad a la explosión del polvo de carbón de esta muestra. Para el caso de la zona occidental, se nota que la muestra tiene un mayor contenido de CF y mayor poder calorífico, pero no tiene el menor contenido de MV, lo que podría explicar por qué esta muestra que, aunque tiene mayor rango y partículas más grandes, presenta mayor susceptibilidad a la explosión que las otras muestras de la zona oriental.

2.2 Granulometría

Cuando llega la muestra desde la mina al laboratorio se somete a un proceso de molienda con el fin de preparar el carbón para el resto de los ensayos. En las siguientes figuras se ilustran las curvas granulométricas del polvo analizado.

La mayor cantidad de volumen de partículas de carbón, para la mayoría de las muestras, se encuentra entre los 100 μm y los 200 μm (figuras 3 a 7). Para la muestra de Amagá (figura 4), el volumen de partículas menores de 10 μm es el mayor, lo que está de acuerdo con los resultados de la temperatura mínima de ignición en capa que es la más baja (400 $^{\circ}\text{C}$), el menor límite inferior de explosión (30 g/m^3) y el mayor valor de la constante característica ($K_{\text{máx}} = 176 \text{ bar, m/s}$), al respecto, ver tabla 4.

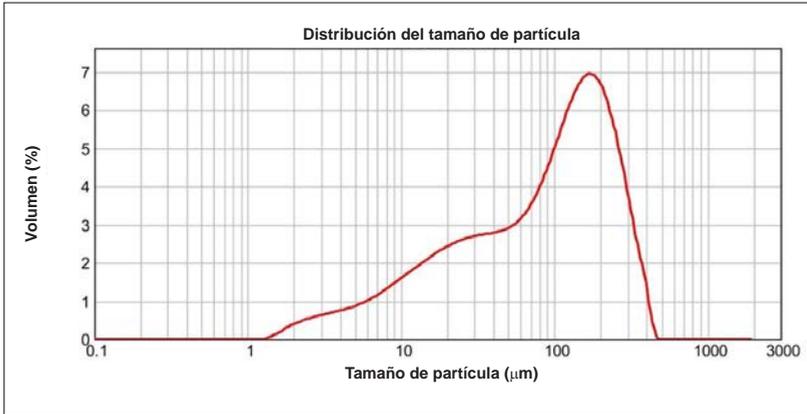


Figura 3. Curva granulométrica, muestra de Angelópolis (UNC-15)
Fuente: [21].

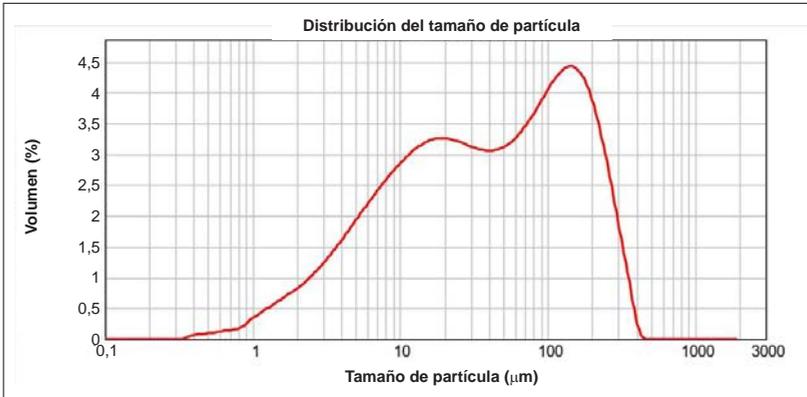


Figura 4. Curva granulométrica, muestra de Amagá (UNC-19)
Fuente: [21].

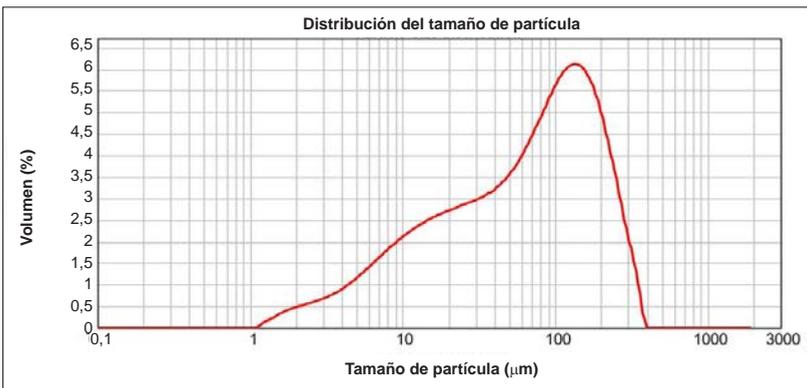


Figura 5. Curva granulométrica, muestra de Fredonia (UNC-2)
Fuente: [21]

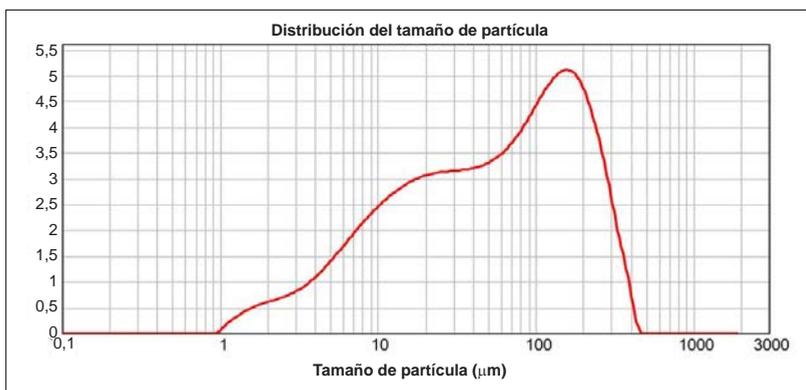


Figura 6. Curva granulométrica, muestra de Venecia (UNC-8)

Fuente: [21].

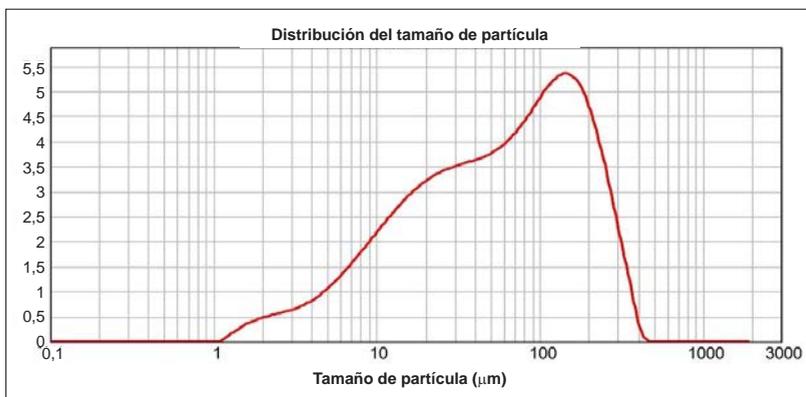


Figura 7. Curva granulométrica, muestra de Titiribí (UNC-14)

Fuente: [21].

Por el contrario, la muestra de Angelópolis presenta una curva muy sesgada hacia tamaños entre los 60 μm y 300 μm (figura 3), por tanto, su temperatura mínima de ignición en capa es la más alta (480 $^{\circ}\text{C}$), de la zona oriental de la cuenca del Sinifaná y su límite inferior de explosividad es bajo 60 g/m^3 , e igualmente presenta el menor valor de la constante característica $K_{\text{máx}} = 106 \text{ bar, m/s}$ (ver tabla 4). Lo anterior se debe a que la transferencia de energía en partículas de estos tamaños es más lenta. Por tanto, se observa que existe una relación inversa entre la granulometría y los resultados de severidad y sensibilidad a la explosión. Además, se comprueban los resultados obtenidos por [5, 6, 10, 20], en donde se demuestra que el tamaño de grano es uno de los parámetros más influyentes en la explosividad del polvo de carbón ya que, a menor tamaño de grano, el porcentaje de inertización puede ser mayor al 80 %.

Para la zona occidental de la cuenca solo se tiene la muestra de Titiribí cuyo carbón tiene un rango un poco mayor (bituminoso alto en volátiles C), razón por la cual, a pesar de tener una granulometría relativamente gruesa y una temperatura mínima de ignición en capa de 510 °C, el límite inferior de explosividad es de 30 g/m³ y la constante característica es relativamente alta (148 bar, m/s), lo que hace que el polvo de carbón sea explosivo, además se comprueba que el poder calorífico es un factor importante a la hora de evaluar el potencial de explosividad del polvo de carbón, tal como concluyeran [5, 10].

2.3 Análisis de severidad y sensibilidad

Algunas propiedades físico-químicas, las cuales indican qué tan sensible es una partícula de carbón al reaccionar ante un estímulo inducido, se revisan a la temperatura mínima a la cual se debe exponer una nube de polvo de carbón para que esta inicie una reacción en cadena, las cantidades mínimas que deben encontrarse en un lugar determinado para que exista una explosión y, por último, qué tanto poder destructivo pueden desatar.

Tabla 4. Resultados de severidad y sensibilidad

<i>Municipio de la muestra</i>	<i>TMIn (°C)</i>	<i>LIE (g/m³)</i>	<i>Kmáx (bar,m/s)</i>
Angelópolis	480	60	106
Amagá	400	30	176
Fredonia	450	60	153
Venecia	430	60	121
Titiribí	510	30	148

TMIn: temperatura mínima de ignición en nube; LIE: límite inferior de explosividad; Kmáx: la constante característica.

Fuente: elaboración propia

Las muestras que necesitan de una mayor temperatura para que se inicie una explosión dentro de una nube de polvo, son las de Angelópolis y las de Titiribí con 480 °C y 510 °C respectivamente. Esto es un poco contradictorio con lo esperado debido a que estas son las muestras con mayor porcentaje de carbono fijo encontrado, lo cual indica que hay otras variables a tener en cuenta. De otro lado, se demuestra que, para poder definir el mayor o menor grado de explosividad de las partículas de carbón, es necesario hacerlo de acuerdo al rango, así, por ejemplo, se agrupan en el rango de los subbituminosos los carbones de Amagá, Fredonia, Venecia y Angelópolis como los de la zona oriental de la cuenca, y en el rango de bituminosos altos en volátiles C, los de Titiribí, como de la zona occidental de la cuenca. Igualmente se comprueba que el

poder calorífico y el tamaño de partícula son parámetros importantes a tener en cuenta, es decir que no se deben comparar carbones con diferente rango, como lo demostraron Blandón *et al.* en 2015.

Las muestras pertenecientes a los municipios de Amagá y Titiribí son las que necesitan de menos cantidad de material particulado acumulado dentro de un recinto cerrado para iniciar una explosión, ya que solamente requieren de la mitad de la concentración en comparación con el resto.

La muestra de Amagá es la más sensible al momento de generar una explosión, por lo tanto, genera más violencia explosiva y provocaría un mayor poder destructivo que el resto de las muestras. A pesar de ser la de mayor $K_{máx}$, (176 bar, m/s) se cataloga como ST1, en comparación con otros tipos de materiales (por ejemplo; polvos metálicos), su poder destructivo sería bajo, pero en realidad, en la mina y bajo las condiciones de confinamiento, alta temperatura y posible presencia de metano, se vuelve muy peligroso.

2.4 Relación entre análisis próximos y los de inflamabilidad y explosividad

Al relacionar la temperatura mínima de inflamación en nube con los análisis de MV, CF y PC, se nota que para la muestra de Amagá esta relación es inversa, es decir que a mayor MV, CF y PC, menor es la temperatura mínima de inflamación en nube, mientras que para las muestras de los demás municipios es directa (ver figuras 8 a 10).

Para el caso de la relación entre el límite inferior de explosividad y los resultados de los análisis de MV, CF y PC, se observa una relación inversa para el caso de la muestra de Amaga y Titiribí, en donde a mayor MV, CF y PC, menor es el límite inferior de explosividad, mientras que, para las demás muestras, aunque la relación es inversa, a menor MV, CF y PC, mayor es el LIE (ver figuras 11 a 13).

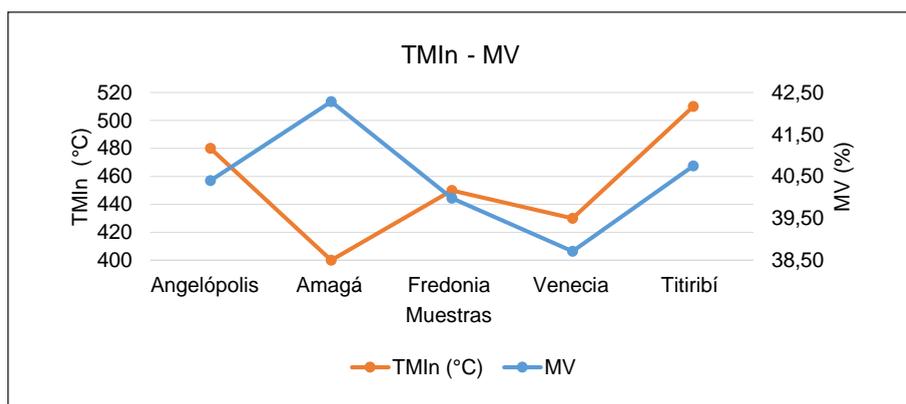


Figura 8. TMIn–materia volátil

Fuente: elaboración propia

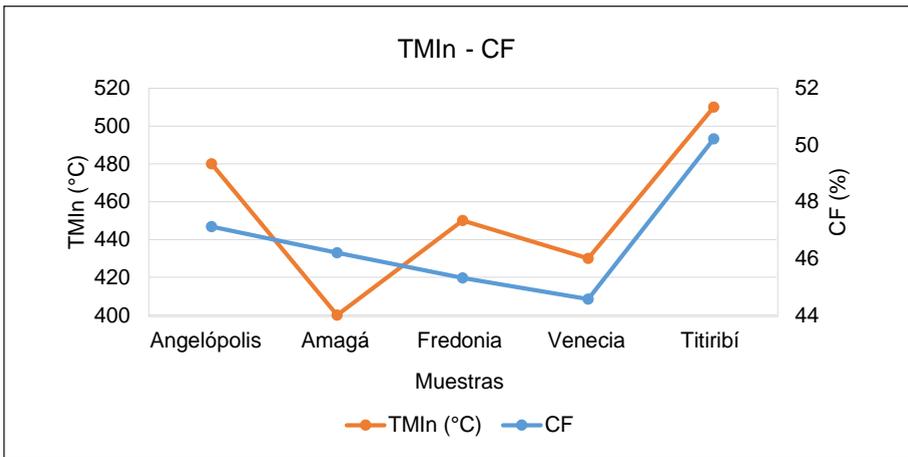


Figura 9. TMIn-carbono fijo

Fuente: elaboración propia

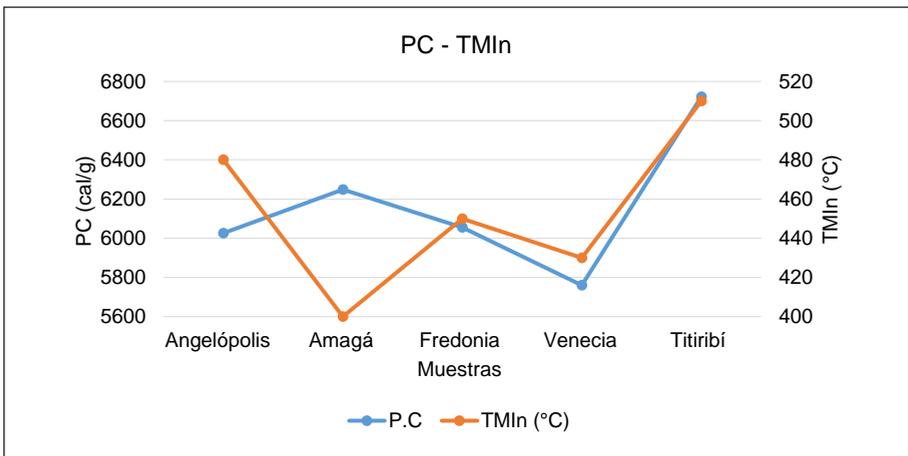


Figura 10. Poder calorífico-TMIn

Fuente: elaboración propia

La relación entre MV, CF y PC entre MV y $K_{máx}$ es directa, y con respecto a CF y PC es un poco inversa en las muestras de Angelópolis y Titiribí, mientras que para las de los otros municipios es directa, de tal modo que, a menor CF y PC, mayor es el $K_{máx}$ (ver figuras 14 a 16).

De lo anterior se puede decir que, en general, se ve un comportamiento diferente entre las muestras del municipio de Amagá y Titiribí, especialmente entre el límite inferior de explosividad y los resultados de los análisis de MV, CF y PC con respecto a las demás muestras, lo cual también está de acuerdo con su mayor susceptibilidad a la inflamación y explosividad.

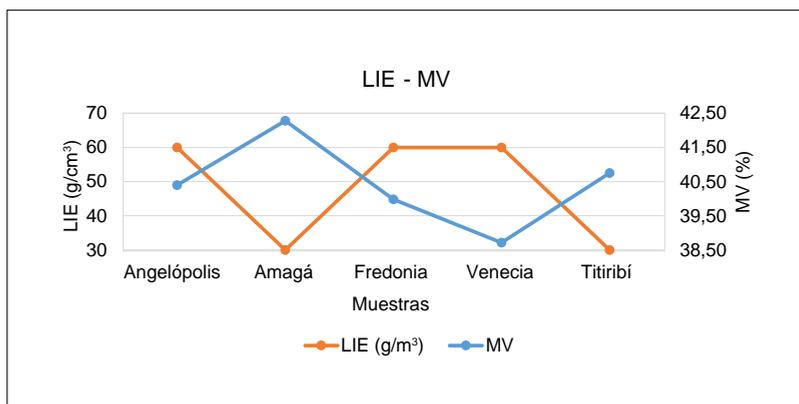


Figura 11. Límite inferior de explosividad–materia volátil
Fuente: elaboración propia

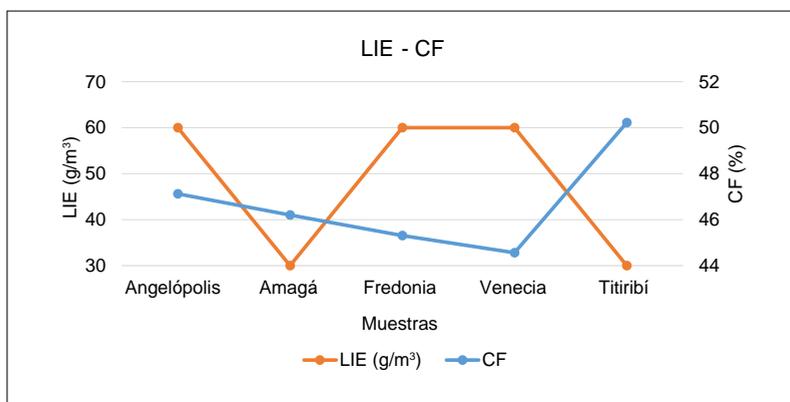


Figura 12. Límite inferior de explosividad–carbono fijo
Fuente: elaboración propia

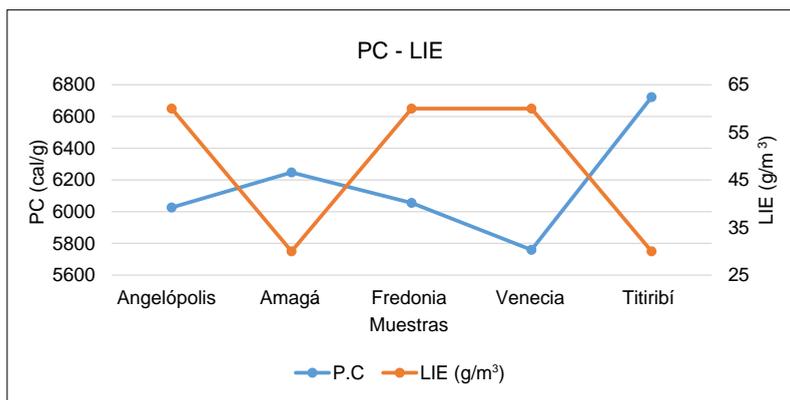


Figura 13. Poder calorífico–límite inferior de explosividad
Fuente: elaboración propia

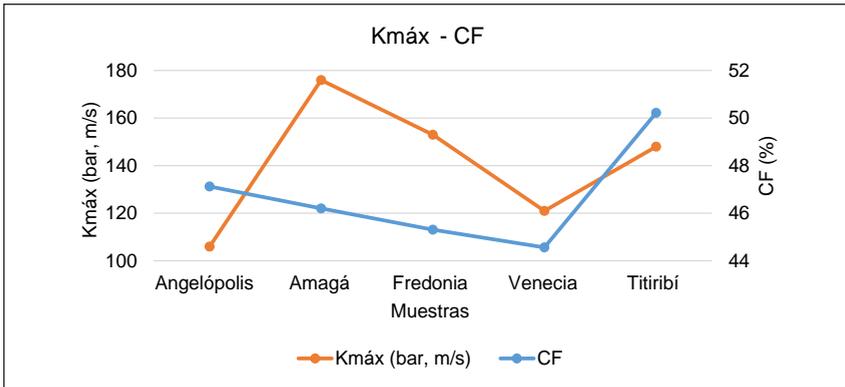


Figura 14. Kmáx-carbono fijo
Fuente: elaboración propia

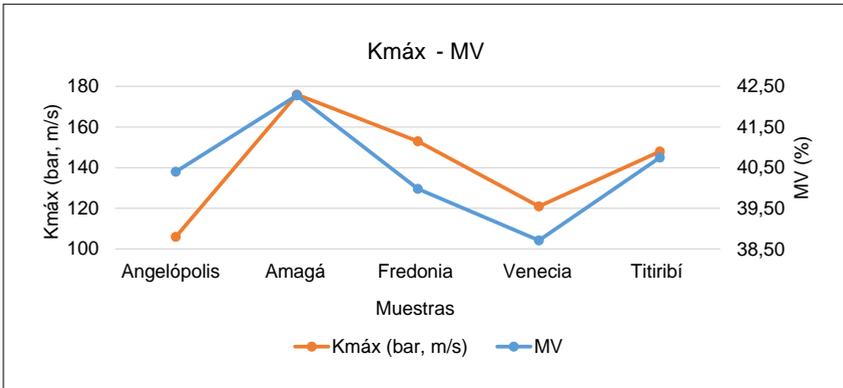


Figura 15. Kmáx-materia volátil
Fuente: elaboración propia

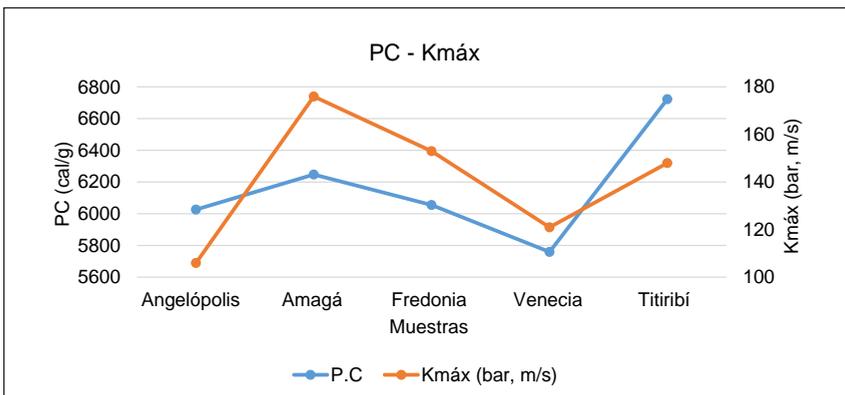


Figura 16. Poder calorífico-Kmáx
Fuente: elaboración propia

3. CONCLUSIONES

Los carbones estudiados se clasifican como subbituminosos y bituminosos altos en volátiles C.

De las muestras analizadas, las que presentan menor porcentaje de cenizas son las de los municipios de Amagá y Angelópolis, seguidas por las del municipio de Titiribí y, por último, las de Venecia y Fredonia.

Para la mayoría de las muestras, la mayor cantidad de volumen de partículas de carbón se encuentra entre los 100 μm y los 200 μm . Para la muestra de Amagá, el volumen de partículas menores de 10 μm es el mayor, lo cual está de acuerdo con los resultados de la temperatura mínima de ignición en capa que es la más baja (400 °C), el menor límite inferior de explosión (30 g/m^3) y el mayor valor de la constante característica ($K_{\text{máx}} = 176 \text{ bar, m/s}$).

Por el contrario, la muestra de Angelópolis presenta una curva muy sesgada hacia tamaños entre los 60 μm y 300 μm , por tanto, su temperatura mínima de ignición en capa es la más alta (480 °C) de la zona oriental de la cuenca del Sinifaná y su límite inferior de explosividad es bajo 60 g/m^3 , e igualmente presenta el menor valor de la constante característica $K_{\text{máx}} = 106 \text{ bar, m/s}$, así, se observa que existe una relación directa entre la granulometría y los resultados de severidad y sensibilidad a la explosión.

Para la zona occidental de la cuenca, solo se tiene la muestra de Titiribí cuyo carbón tiene un rango un poco mayor (bituminoso alto en volátiles C), razón por la cual, a pesar de tener una granulometría relativamente gruesa y una temperatura mínima de ignición en capa de 510 °C, el límite inferior de explosividad es de 30 g/m^3 y la constante característica es relativamente alta (148 bar, m/s).

Las muestras que necesitan de una mayor temperatura para que se inicie una explosión dentro de una nube de polvo, son las de Angelópolis y las de Titiribí con 480 °C y 510 °C respectivamente. Esto es un poco contradictorio con lo esperado debido a que estas son las muestras con mayor porcentaje de carbono fijo encontrado, lo cual indica, que hay otras variables a tener en cuenta, como es el caso del tamaño de las partículas.

Las muestras que necesitan de menos cantidad de material particulado acumulado dentro de un recinto cerrado para iniciar una explosión son las pertenecientes a los municipios de Amagá y Titiribí, estos dos carbones necesitan solamente la mitad de la concentración en comparación con el resto.

La muestra de Amagá es la más sensible al momento de generar una explosión, por ende genera más violencia explosiva y podría provocar un mayor poder destructivo que el resto de las muestras.

El contenido de carbono fijo dentro de las partículas de carbón influye de forma notoria en el LIE, es decir, son propiedades directamente proporcionales, mientras que los contenidos de azufre y materia volátil también pueden influir de forma directa en el TMI_n y el K_{máx}.

REFERENCIAS

- [1] Universidad Nacional de Colombia, *Determinación del grado de explosividad del polvo de carbón y cuantificación del contenido de gas metano en los mantos de carbón de la cuenca del Sinifaná*, Medellín: Gobernación de Antioquia, 2014.
- [2] T. Abbasi y S. A. Abbasi, "Dust explosions-cases, causes, consequences, and control," *J. Hazard. Mater.*, vol. 140, N.º 1, pp. 7-44, 2007.
- [3] W. Cybulski, *Coal dust explosions and their suppression*, Bureau of Warsaw, Varsovia, Foreign, Special Science, Currency Program, Information, 1975.
- [4] A. Jiménez, M. A. Alfonso, V. Aguirre, E. F. Morales, J. Martínez, R. Sguerra, J. M. J. Navarro y M. Alzate, "Informe preliminar de la investigación del accidente fatal de 73 trabajadores sucedido el miércoles 16 de junio de 2010 en la Mina San Joaquín título 11338 beneficiario Carbones San Fernando, Ubicada en el municipio de Amaga, (vereda Paso Nivel) Antioquia," Ministerio de Minas, pp. 4-5, Bogotá, 2010.
- [5] J. Molina y A. Blandón, "Evidencias del choque térmico en partículas de polvo después de una explosión en minería de carbón," *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 16, N.º2, pp. 23-33, 2014.
- [6] Casas, A. Blandón y J. Molina, "Evaluación de los parámetros para determinar el grado de explosibilidad del polvo de carbón," *Boletín Ciencias de la Tierra*, N.º36, pp. 42-54, 2014.
- [7] Ministerio de Minas y Energía, "Política Nacional de Seguridad Minera," Bogotá, Dirección de Minas, 2011, pp. 13-17.
- [8] P. Amyotte, "Some myths and realities about dust explosions," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, N.º4, pp. 292-299, 2014.
- [9] J. D. McAteer, "Upper Big Branch The April 5, 2010, explosion: a failure of basic coal mine safety practices," Report to the Governor, Governor's Independent Investigation Panel, Virginia del Este, 2011.
- [10] J. García-Torrent, N. Fernández-Anez, L. Medic-Pejic, A. Blandón-Montes y J. M. Molina-Escobar, "Ignition and explosion parameters of Colombian coals," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 43, pp. 706-713, 2016.
- [11] K. L. Cashdollar, "Coal dust explosibility," *Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 9, N.º 1, pp. 65 - 76, 1996.
- [12] J. Michelis, B. Margenburg, G. Müller y a. W. Kleine, "Investigations into the buildup and development conditions of coal dust explosions in a 700-m underground gallery," de *Industrial*

- Dust Explosions, ASTM STP 958*, Filadelfia, American Society for Testing and Materials, 1987, pp. 124 - 137.
- [13] P. Amyotte y E. R., “Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview,” *Journal of Chemical Health and Safety*, vol. 17, N.º 1, pp. 15–28, 2010.
- [14] A. García, A. Di Benedetto, P. Russo, E. Salzano y R. Sanchirico, “Dust/gas mixtures explosion regimes,” *Powder Technology*, vol. 205, N.º 1–3, pp. 81-86, 2011.
- [15] L. Qingming, B. Chunhua, L. Xiaodong, J. Li y D. Wenxi, “Coal dust/air explosions in a large-scale tube,” *Fuel*, vol. 89, N.º 2, pp. 329-335, 2010.
- [16] BSI Group, British Standards Institution, EN 14034-3, 2006+A1, *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Determination of the Lower Explosion Limit LEL of Dust Clouds*, 2011.
- [17] BSI Group, British Standards Institution, EN 50281-2-1, *Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust - Part 2-1: Test methods - Methods for determining the minimum ignition temperatures of dust*, 1998.
- [18] BSI Group, British Standards Institution, EN 14034 - 1, 2004+A1, *Determination of Explosion Characteristics of Dust Clouds. Determination of the Maximum Explosion Pressure Pmax of Dust Clouds*, 2011.
- [19] Directivas ATEX (atmósfera explosiva), *Guía técnica para a seguridad y salud en atmósferas explosivas*, Madrid, pp.41-108, 2003.
- [20] K. Baquero, A. Blandón y J. Molina, “Analysis of the factors that affect in the explosibility of coal dust in underground mines,” *Ing. y Compet.*, vol. 14, N.º 2, pp. 147-160, 2012.
- [21] Laboratorio Oficial J.M. Madariaga, LOM, “Caracterización de parámetros explosivos para muestras de polvo de carbón (LOM 14SOLI8175),” Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2014.
- [22] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3172 - 13, *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*, 2013.
- [23] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3302M - 15, *Standard Test Method for Total Moisture in Coal*, 2015.
- [24] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3173 - 11, *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*, 2011.
- [25] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D3174 - 12, *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke*, 2012.
- [26] ISO, International Organization for Standardization, ISO 562, *Volatile matter in the analysis sample of coal and coke*, 3.^a ed., 2010.
- [27] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D5865 - 13, *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*, 2013.

- [28] ASTM International, American Society for Testing and Materials, ASTM D4239 - 14, *Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion*, 2014.
- [29] M. Frías, M. P. de Luxan, M. I. Sánchez de Rojas , “Espectrometría de difracción por rayos laser,» *Materiales de construcción*, vol. 38, N.º 212, pp. 37-52, 1988.

La vivienda sostenible, desde un enfoque teórico y de política pública en Colombia*

| Diana Elizabeth Valencia**

Recibido: 07/09/2017 • Aceptado: 02/04/2018
<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a2>

Resumen

La vivienda social en Colombia no incluye, como parámetros de diseño, criterios de orden ambiental, ni social pues prima el cierre financiero, es por esto que el objetivo del artículo es proponer lineamientos para el diseño de prototipos de vivienda de interés social (VIS) sostenible, a partir de la aplicación de la matriz línea base.

Respecto a la metodología empleada, para el ejercicio de esta investigación se parte de la matriz elaborada en el proyecto de investigación denominado *Propuesta de lineamientos para el diseño arquitectónico y construcción de un prototipo VIS para Medellín, que incluya en su diseño criterios de sostenibilidad a partir de la línea base elaborada en la fase II y aplicable a Medellín y el Área Metropolitana*. Esta matriz está compuesta por cuatro ejes temáticos: selección del sitio o emplazamiento, uso racional del agua, materiales y habitabilidad. Luego de aplicada, los resultados sirvieron para definir lineamientos de intervención en las diferentes escalas.

El proyecto arrojó como resultados unos lineamientos de intervención que pueden ser aplicados en la etapa de diseño de este tipo de proyectos o que pueden ser utilizados como punto de referencia para evaluar la sostenibilidad en los proyectos de VIS desarrollados.

Palabras clave: habitabilidad; sostenibilidad; desarrollo humano; vivienda social.

* Artículo de investigación desarrollado en el marco del proceso de investigación de la formación doctoral de la autora, en Criterios Territoriales y Urbanos, llevado a cabo en el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), La Habana, Cuba, dirigida por el Dr. Ing. Arq. Rubén Andrés Bancroff Hernández y elaborada entre octubre del año 2013 y junio de 2017.

** M. Sc. Profesora de tiempo completo de la Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia. Carrera 56C N.º 51-110. Teléfono: +57+4 51475600. Correo electrónico: diana.valencia@usbmed.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4542-4128>

Sustainable Housing, from a Theoretical and Public Policy Approach in Colombia

Abstract

Social housing in Colombia does not include, as design parameters, environmental or social criteria, since financial closure is a priority. This is why the objective of this article is to propose guidelines for the design of prototypes of sustainable social housing (VIS), based on the application of the baseline matrix.

With respect to the methodology used, this research is based on the matrix elaborated in the research project called *Proposal for Guidelines for the Architectural Design and Construction of a VIS Prototype for Medellín, which includes sustainability criteria in its design based on the baseline elaborated in phase II and applicable to Medellín and the Metropolitan Area*. This matrix is composed of four thematic axes: site selection, rational use of water, materials and habitability. Once applied, the results served to define guidelines for intervention at the different scales.

The project resulted in intervention guidelines that can be applied in the design stage of this type of project or that can be used as a reference point to evaluate sustainability in VIS projects developed.

Keywords: habitability; sustainability; human development; social housing.

A moradia sustentável a partir de um enfoque teórico e de política pública na Colômbia

Resumo

A moradia social na Colômbia não inclui, como parâmetro de desenho, critérios de ordem ambiental nem social, pois prima pelo fechamento financeiro. Por esse motivo, o objetivo do artigo é propor alinhamentos para o desenho de protótipos de habitação de interesse social (HIS) sustentável a partir da aplicação da matriz linha base.

Com respeito à metodologia empregada, para o exercício dessa pesquisa parte-se da matriz elaborada no projeto de pesquisa denominado *Proposta de alinhamentos para o desenho arquitetônico e construção de um protótipo HIS para Medellín que inclua em seu desenho critérios de sustentabilidade a partir da linha base elaborada na fase II e aplicável a Medellín e Área Metropolitana*. Essa matriz é composta por quatro eixos temáticos: seleção do lugar ou posicionamento, uso racional da água, materiais e habitabilidade. Após a aplicação, os resultados serviram para definir alinhamentos de intervenção nas diferentes escalas.

O projeto teve como resultados alguns alinhamentos de intervenção que podem ser aplicados na etapa de desenho desse tipo de projetos ou que podem ser utilizados como ponto de referência para avaliar a sustentabilidade nos projetos de HIS desenvolvimentos.

Palavras-chave: habitabilidade; sustentabilidade; desenvolvimento humano; moradia social.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se recogen los resultados iniciales del proceso de investigación realizado como parte de la formación doctoral de la autora, cuya temática son los criterios territoriales y urbanos aplicados en la etapa de diseño de un proyecto, para la evaluación de la sostenibilidad ambiental de la vivienda social desarrollada en Colombia bajo la tipología de multifamiliares (caso de estudio Medellín), y da cuenta de los resultados alcanzados en la primera etapa de la tesis doctoral.

En general, en los países latinoamericanos, la mayor problemática de orden habitacional se concentra en la vivienda social o vivienda para población de bajos ingresos. Sin embargo, la inversión que se destina a dicha infraestructura no es proporcional a la magnitud del problema. Es por esto que las soluciones arquitectónicas entregadas por el Estado carecen de las siguientes condiciones, que son vitales para dar cuenta de un hábitat integral y sostenible: relación con el contexto cultural, social y biofísico, concepción de la vivienda como un espacio para el habitar que implica una cualificación del mismo y una relación con el entorno y como el ámbito que posibilita el desarrollo humano.

Las soluciones arquitectónicas a través de las cuales se resuelve el déficit habitacional de las poblaciones de bajos recursos distan mucho de los factores antes mencionados y canalizan su respuesta en una ecuación simple en la que el dinero se convierte en metros cuadrados. Pero esta misma ecuación no es garantía, ni para la población ni para el Estado, de ser la respuesta integral a un problema de múltiples aristas y prioritario en cuanto a la calidad de vida.

Es por esto que a través de este artículo se presentan aquellos criterios o elementos que, derivados del análisis teórico y de política pública, siguen vigentes en la propuesta de sostenibilidad de la vivienda social en Colombia, desde una mirada integral del hábitat.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso investigativo del cual se deriva el presente artículo (primera etapa), se concentra en un análisis documental que elabora un marco teórico y normativo de carácter internacional y nacional aplicable a la vivienda social en Colombia, de tal manera que arroje luces sobre los aspectos relevantes en el análisis de dicha tipología arquitectónica. Se realiza un estudio cualitativo de los diferentes conceptos buscando correlacionar los mismos, de tal manera que el proceso analítico arroje elementos en común a considerar en un modelo teórico que evalúe la sostenibilidad ambiental en la vivienda.

Se iniciará con la conceptualización de los términos vivienda y sostenibilidad, y su interpretación en el contexto internacional y nacional para, posteriormente, ponerla

en contraste con lo especificado en el marco normativo que regula las actuaciones que en materia de vivienda se desarrollan en el país.

2. REFERENTES CONCEPTUALES DE ORDEN INTERNACIONAL

Cuando se pretende entender el término de sostenibilidad se hace necesario remontar el concepto propuesto en la Cumbre de la Tierra de 1992, Conferencia de la Organización de las Naciones Unidas que, partiendo de una visión economicista, define el desarrollo sostenible como aquel que garantiza el crecimiento económico y el bienestar social sin poner en riesgo la conservación y preservación de los recursos naturales para las generaciones futuras [1].

El informe Brundtland planteó que “el desarrollo sostenible implica límites, no límites absolutos, sino limitaciones que el estado actual de la tecnología y de la organización social, así como la capacidad de la biosfera de absorber los efectos de las actividades humanas, imponen a los recursos del medio ambiente” [2].

Una de las grandes conclusiones arrojadas por la Cumbre de la Tierra y por el Informe Brundtland, fue la necesidad de generar cambios en los modelos de desarrollo y comprometer a los diferentes sectores productivos a incorporar procesos de gestión ambiental en el desarrollo de su actividad. Una de las actividades productivas que mayor impacto genera sobre el ambiente es la actividad constructora, es por esto que el gremio de arquitectos en el marco del congreso celebrado por la Unión Internacional de Arquitectos en 1993, estableció la corresponsabilidad en la crisis ambiental por los altos impactos de la industria de la construcción. Adicionalmente, se incorporó un nuevo concepto como directriz de actuación derivado del compromiso del congreso así: “el diseño sostenible integra consideraciones de eficiencia en el uso de recursos y de la energía, ha de producir edificios sanos, ha de utilizar materiales ecológicos y debe considerar la sensibilidad estética que inspire, afirme y emocione” [3].

“En conjunto con el Programa de Naciones Unidas para el Ambiente –PNUMA– desarrolló en 1992 la Agenda 21 para la Construcción Sostenible en Países en Desarrollo, en la cual, se definió el concepto de construcción sostenible de la siguiente manera: la construcción sostenible significa que los principios del desarrollo sostenible son aplicados al proceso de la construcción del entorno construido (durante todo su ciclo de vida), desde la extracción de los materiales, pasando por la planeación, diseño y construcción de los edificios y la infraestructura, hasta su demolición final y la gestión de sus residuos. Es un proceso holístico que apunta a restaurar y mantener la armonía entre los sistemas naturales y el entorno construido, mientras se construyen ciudades que reafirmen la dignidad humana e impulsen la equidad económica” [4].

En la tabla 1, se presenta la síntesis de los conceptos que se asocian a los términos de arquitectura y sostenibilidad.

Tabla 1. Conceptos asociados a la arquitectura sostenible

<i>Denominación</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Criterios o variables que considera</i>	<i>Observaciones</i>
<p>Arquitectura ecológica [10]. Concepto tomado del documento: <i>Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana.</i></p>	<p>Propende por la cuidadosa inserción de las construcciones en el entorno natural, buscando que su emplazamiento genere el menor impacto nocivo posible permitiendo la coexistencia armónica entre el lugar, el edificio y el hombre que lo habita.</p>	<p>Esta arquitectura tiene 10 principios básicos: Valorar el sitio y las necesidades constructivas. Proyectar la obra de acuerdo con el clima local. Ahorrar energía. Pensar en fuentes de energía renovables. Ahorrar agua. Construir edificios de mayor calidad. Evitar riesgos para la salud. Utilizar materiales obtenidos de materias primas generadas localmente. Utilizar materiales reciclables. Gestionar ecológicamente los desechos.</p>	<p>Reflexiona sobre el impacto ambiental de todos los procesos implicados en la construcción y puesta en operación de la misma, pasando por la extracción de materiales, el proceso constructivo y la implantación en el lugar.</p>
<p>Arquitectura bioclimática. [10] Concepto tomado del documento: <i>Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana.</i></p>	<p>Generar espacios con óptimas condiciones de confort y bienestar, incorporando determinantes de diseño que permitan la interrelación de variables climáticas para lograrlo.</p>	<p>Clima. Condiciones del entorno. Confort térmico en el interior de la vivienda.</p>	<p>Se concentra exclusivamente en el diseño y los elementos arquitectónicos, sin necesidad de utilizar sistemas mecánicos complejos.</p>
<p>Construcción sostenible. [10] Concepto tomado del documento: <i>Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana.</i></p>	<p>Una construcción sostenible es aquella que está en sincronía con el sitio, hace uso de energía, agua y materiales de un modo eficiente y provee confort y salud a sus usuarios. Todo esto es alcanzado gracias a un proceso de diseño consciente del clima y la ecología del entorno donde se construye la edificación [5].</p>	<p>Eficiencia energética. Eficiencia en agua. Materiales de construcción de baja energía embebida. Calidad del ambiente interior. Sostenibilidad del emplazamiento. Edificaciones y entorno exterior. Sostenibilidad urbana.</p>	<p>A pesar de que la guía colombiana menciona múltiples aspectos a considerar en una construcción sostenible, se decidió que los siguientes aspectos fueran tomados en la primera fase de creación de la guía nacional de construcción sostenible: Eficiencia energética de las edificaciones. Eficiencia del uso de agua en las edificaciones [5].</p>

<i>Denominación</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Criterios o variables que considera</i>	<i>Observaciones</i>
<p>Arquitectura sostenible. [10] Concepto tomado del documento: <i>Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana.</i></p>	<p>Aquella que tiene en cuenta el impacto que va a tener el edificio durante todo su ciclo de vida, desde su construcción, pasando por su uso y su derribo final.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ubicación adecuada. 2. Integración en su entorno más próximo. 3. Aplicación de variables bioclimáticas. 4. Uso de materiales de construcción, que involucren aspectos de disponibilidad, estética y accesibilidad. 5. Utilización de materiales y tecnologías que tengan la menor cantidad de CO₂ en el entero ciclo de vida. 6. Implementación de sistemas energéticos alternativos. 7. Implantar circuitos cerrados de aguas y residuos. 	<p>Presenta una mirada más abarcante de la sostenibilidad, incluyendo el contexto físico biótico como un elemento determinante y de integración con el entorno.</p>
<p>Conferencia de las Naciones Unidas Hábitat I [6], tomado de: <i>Satisfacción residencial en la vivienda básica, Serviú: la perspectiva de capital social.</i></p>	<p>La vivienda es entendida no solamente como una unidad que cobija a una familia, sino como un sistema integral, que comprende también el terreno, la infraestructura para los servicios de urbanización y servicios y el equipamiento social y comunitario, dentro de un contexto cultural, socio-económico, político y físico ambiental.</p>	<p>La vivienda se manifestó en diversas escalas y lugares, que son: localización urbanas o rurales, vecindarios, conjuntos habitacionales, entornos y unidades de vivienda.</p>	<p>Los diversos atributos son expresados en aspectos funcionales, espaciales, formales (estéticos y significado), materiales y ambientales [6].</p>
<p>Concepto de hábitat en el modelo chileno [6] tomado de: <i>Satisfacción residencial en la vivienda básica, Serviú: la perspectiva de capital social.</i></p>	<p>“Puede entenderse como la percepción y valoración que diversos observadores y participantes le asignan al total y a los componentes de un conjunto habitacional, en cuanto a sus diversas propiedades o atributos en sus interacciones mutuas y con el contexto en el cual se inserta”.</p>	<p>“El concepto de hábitat establece distintas jerarquizaciones de acuerdo con variables de orden axiológico, sicosocial, cultural, económico y político” [6].</p>	<p>El concepto de hábitat propuesto por el modelo chileno enfatiza en el componente humano, anteponiendo el mismo a la respuesta de infraestructura.</p>

<i>Denominación</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Criterios o variables que considera</i>	<i>Observaciones</i>
Desarrollo sistémico de la política de vivienda en Cuba [7], tomado del texto <i>Desarrollo sistémico de la política de vivienda en Cuba</i> .	“La vivienda no puede considerarse como un hecho aislado, deberá enfocarse como un sistema que garantice una visión coherente, integral, con la necesaria interrelación entre las políticas y estrategias sociales, de vivienda, de planeamiento, urbanística, constructiva y de producción de materiales, entre otras, bajo un principio general de desarrollo sustentable. Implicados [7].	Espacios suficientes que satisfagan los estilos de vida y la diversidad familiar. Servicios básicos (agua, alcantarillado, entre otros), servicios extradomiciliarios (alimentación, educación, salud), calidad ambiental, condiciones de habitabilidad acordes con el desarrollo social en educación, salud, cultura, deporte.	Ese enfoque sistémico, multidimensional deberá combinar de manera equilibrada las tres dimensiones: económica, social y ambiental. Además, será un proceso multidisciplinario y con multiplicidad de actores.

Fuente: elaboración propia

Observando los objetivos y criterios planteados por los cuatro conceptos descritos en la tabla 1, se encuentra que coinciden en la necesidad de garantizar una selección de materiales de construcción que generen un mínimo impacto ambiental y la necesidad de presentar una propuesta para el manejo de los residuos de la construcción. En el caso de la arquitectura bioclimática, esta concentra su actuar en el confort térmico. Podría decirse que el concepto que mira, de manera más amplia, la sostenibilidad, es el de arquitectura sostenible, sin embargo, hace énfasis de manera especial en resolver los requerimientos funcionales de la arquitectura y la demanda que deriva de esta en términos de consumo de recursos, pero deja de lado aspectos de orden sociocultural y económico claves según se plantea en la siguiente cita: “el desarrollo verdaderamente sostenible pasa por una sociedad más equitativa, donde hayan disminuido significativamente las desigualdades de género y en la cual los objetivos y metas a lograr estén bien definidas y se correspondan para todos. La sostenibilidad en su dimensión social permanece todavía pobremente definida, y sus vínculos o articulación con el componente ecológico o ambiental pendientes de ser esclarecidos” [8].

A continuación, en la tabla 2 se presenta el análisis sistémico de los referentes conceptuales mencionados anteriormente.

Tabla 2. Análisis sistémico de los referentes conceptuales.

<i>Sistema</i>	<i>Concepto</i>	<i>Temáticas relacionadas</i>	<i>Observaciones</i>
Múltiples sistemas	Arquitectura sostenible [10]	Lectura del contexto: biofísico y físico biótico.	Presenta una mirada integral de los determinantes físicos.
	Hábitat I (1976) [6]	Contexto cultural, socio-económico, político y fisicoambiental.	Los diversos atributos son expresados en aspectos funcionales, espaciales, formales (estéticos y significado), materiales y ambientales [6].
	Construcción sostenible [5]	Sincronía con el sitio, uso eficiente de energía, agua y materiales, confort, salud.	Articula las dimensiones físicoespacial, biofísica y sociocultural.
Biofísico o ecológico	Arquitectura ecológica [10]	Consumo de recursos naturales. Producción de desechos.	Evalúa lo impactos generados por el proceso constructivo.
	Arquitectura bioclimática [10]	Clima como determinante para el diseño.	Prioriza el confort como criterio director.

Fuente: elaboración propia

El tomar la decisión de realizar un abordaje para el análisis del problema desde un enfoque sistémico, parte de reconocer cómo cada una de las dimensiones está respaldada en referentes de orden nacional e internacional que la han destacado como de relevancia, tanto para la comprensión del problema como para la generación de estrategias de intervención. En la tabla 3, se presentan las dimensiones y factores.

Tabla 3. Factores incluidos en el análisis sistémico por dimensiones

<i>Dimensión</i>	<i>Referente</i>	<i>Factores incluidos</i>
Mirada multidimensional	Usaid, 2013 [4].	“Es un proceso holístico que apunta a restaurar y mantener la armonía entre los sistemas naturales y el entorno construido, mientras se construyen ciudades que reafirmen la dignidad humana e impulsen la equidad económica” [4].
	Metodología ciudades emergentes y sostenibles (CES) (Banco Interamericano de Desarrollo), 2016. Pretende abordar el análisis de la sostenibilidad de las ciudades en tres dimensiones	Dimensión del riesgo de desastres y cambio climático: Gerencia ambiental Control de la contaminación local Mitigación del cambio climático y la prevención y reducción de la vulnerabilidad a los desastres naturales. Dimensión del desarrollo urbano integral:

<i>Dimensión</i>	<i>Referente</i>	<i>Factores incluidos</i>
	fundamentales: i) el riesgo de desastres y cambio climático, ii) el desarrollo urbano integral y iii) el ámbito fiscal y las cuestiones de gobernabilidad y transparencia [9].	diseño de la ciudad y a su huella, (desigualdad social y la distribución desequilibrada de los servicios, la eficacia del transporte urbano, la competitividad y la seguridad ciudadana). Dimensión fiscal: y capacidad del gobierno local de financiar las inversiones necesarias, lograr la prestación de los servicios, controlar correctamente sus gastos y su deuda y tomar decisiones de una manera transparente, planificada y eficaz.
Biofísica o ecológica	Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana, 2012 [5].	Criterios ambientales para la producción y uso de la vivienda [10]: Agua. Suelo. Materiales. Energía.
	Comisión Nacional de Medio Ambiente del gobierno de Chile, 2007 [11].	Balance entre la oferta ambiental y el consumo de recursos.
	Documento ejecutivo política pública de ecorurbanismo y construcción sostenible de Bogotá, 2014 [12].	Desde una perspectiva ecosistémica se consideran cuatro ciclos urbanos básicos: el hidrológico, atmosférico, energético y de la materia orgánica y los residuos [13].
	Metodología ciudades emergentes y sostenibles (CES) (Banco Interamericano de Desarrollo), 2016 [9].	Dimensión del riesgo de desastres y cambio climático: Gerencia ambiental. Control de la contaminación local. Mitigación del cambio climático y la prevención y reducción de la vulnerabilidad a los desastres naturales.
Fisicoespacial	Modelo de indicadores de urbanismo ecológico, Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2013 [14].	Plantea cuatro objetivos básicos de la sostenibilidad urbana: 1) cohesión social, 2) eficiencia, 3) complejidad y 4) compacidad y funcionalidad.
	Decreto 2190 de 2008, en su artículo 2 [15].	Solución de vivienda: habitación en condiciones sanitarias satisfactorias de espacio, servicios públicos y calidad de la estructura.
	Documento técnico de soporte –recomendaciones de política pública de construcción y urbanismo sostenible– informe final, 2013, p. 197 [4].	Cuatro componentes del entorno construido: o infraestructura vial y de servicios públicos o espacio público o VIS (construcción) o equipamientos públicos.
	Decreto 1285 de 2015. Lineamientos de construcción sostenible para edificaciones [16].	Porcentajes obligatorios de ahorro en agua y energía según clima y tipo de edificaciones. Sistema de aplicación gradual para el territorio de conformidad con el número de habitantes de los municipios.

<i>Dimensión</i>	<i>Referente</i>	<i>Factores incluidos</i>
Fisicoespacial		<p>Procedimiento para la certificación de la aplicación de las medidas.</p> <p>Procedimiento y herramientas de seguimiento y control a la implementación de las medidas. Promoción de incentivos a nivel local para la construcción sostenible.</p>
	<p>Metodología de evaluación integral sostenible urbana (Portugal) [17]</p> <p>Su objetivo principal es ser una evaluación integral, equilibrada y justificada por los aspectos importantes para generar barrios sostenibles</p>	<p>Morfología urbana: calidad del diseño de edificios, fisonomía y calidad de imagen urbana, conectividad y movilidad, densidad de planificación.</p> <p>Sintaxis urbana: edificios sostenibles, uso mixto de la comunidad, infraestructura y servicios, estrategias de futuro.</p>
	<p>Metodología ciudades emergentes y sostenibles (CES) (Banco Interamericano de Desarrollo), 2016, p. 7 [9].</p>	<p>Dimensión del riesgo de desastres y cambio climático: Gerencia ambiental.</p> <p>Control de la contaminación local.</p> <p>Mitigación del cambio climático y la prevención y reducción de la vulnerabilidad a los desastres naturales.</p> <p>Dimensión del desarrollo urbano integral: diseño de la ciudad y su huella, (desigualdad social y la distribución desequilibrada de los servicios, la eficacia del transporte urbano, la competitividad y la seguridad ciudadana.</p> <p>Dimensión fiscal: y capacidad del gobierno local de financiar las inversiones necesarias, lograr la prestación de los servicios, controlar correctamente sus gastos y su deuda y tomar decisiones de una manera transparente, planificada y eficaz.</p>
Sociocultural (incluye lo legal)	<p>Política pública de construcción sostenible, Medellín, 2016 [18].</p>	<p>Viabilidad: relacion de costo-eficiencia economica de la implementacion de lineamientos y estrategias de sostenibilidad en el ciclo de vida de los proyectos.</p>
	<p>Guía de asistencia técnica para la vivienda de interés social N.º 1, 2011 [19].</p>	<p>El derecho a la vivienda adecuada,</p> <p>seguridad jurídica de la tenencia,</p> <p>disponibilidad de servicios, materiales e infraestructuras.</p> <p>Gastos de vivienda soportables.</p> <p>Vivienda habitable.</p> <p>Vivienda asequible.</p> <p>Lugar.</p> <p>Adecuación cultural de la vivienda.</p>
Económica	<p>Lineamientos Ley de vivienda de 2006 de Mexico. Usaid, p. 140 [4].</p>	<p>Promover seguridad jurídica y disminución de costos de la vivienda.</p>

Dimensión	Referente	Factores incluidos
	<p>Metodología ciudades emergentes y sostenibles (CES) (Banco Interamericano de Desarrollo), 2016. Pretende abordar el análisis de la sostenibilidad de las ciudades en tres dimensiones fundamentales: i) el riesgo de desastres y cambio climático, ii) el desarrollo urbano integral y iii) el ámbito fiscal y las cuestiones de gobernabilidad y transparencia, p. 7 [9].</p>	<p>Dimensión del desarrollo urbano integral: diseño de la ciudad y su huella, (desigualdad social y la distribución desequilibrada de los servicios, la eficacia del transporte urbano, la competitividad y la seguridad ciudadana.</p> <p>Dimensión fiscal: y capacidad del gobierno local de financiar las inversiones necesarias, lograr la prestación de los servicios, controlar correctamente sus gastos y su deuda, y tomar decisiones de una manera transparente, planificada y eficaz.</p>

Fuente: elaboración propia

En la tabla 3 se observa cómo los diferentes estudios que abordan la problemática de la sostenibilidad en contextos urbanos y territoriales asumen el análisis desde cuatro dimensiones básicas: biofísica o ecológica, fisicoespacial, sociocultural y económica. El desarrollo conceptual llevado a cabo por Usaid como documento preparatorio de la política pública de urbanismo y construcción sostenible en Colombia, y la propuesta metodológica del BID de ciudades emergentes y sostenibles (CES), asumen una estrategia holística, que involucra una perspectiva sistémica e integral. Predominan las metodologías que se enfocan en la dimensión fisicoespacial, buscando resolver la relación entre el componente natural y construido a través del funcionamiento de la infraestructura física.

En el nivel local se han desarrollado varias guías desde el año 2011 encaminadas a dar lineamientos que apunten a condiciones de sostenibilidad en el ambiente construido, sin embargo, las mismas no pasan de hacer recomendaciones que pueden ser asumidas o no por los diferentes actores que participan del sector de la construcción.

A pesar de que el Decreto 1285 de 2015, denominado *Lineamientos de construcción sostenible para edificaciones*, muestra una mirada integral del problema partiendo de la definición de edificaciones sostenibles y considerando los siguientes aspectos: eficiencia energética, eficiencia en agua, materiales de construcción de baja energía embebida, calidad del ambiente interior, sostenibilidad del emplazamiento, edificaciones y entorno exterior y sostenibilidad urbana [16], solo se encuentra desarrollado en la *Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones* que se remite a una respuesta particular desde el medio físico que no genera articulaciones con otras dimensiones, ni propende por un enfoque holístico. De igual forma el decreto centra su atención en la sostenibilidad en edificaciones, y aunque incluye un apartado

en relación con la sostenibilidad urbana, se observa en la guía su énfasis en el resultado final arquitectónico [5, 16].

3. LAS POLÍTICAS PÚBLICAS COLOMBIANAS Y SU INCORPORACION DE LA SOSTENIBILIDAD EN LA VIVIENDA

La historia de la vivienda en Colombia, permite observar cómo han sido los criterios económicos los que han primado en la toma de decisiones, tanto en la selección del lugar como en el diseño arquitectónico de la vivienda, dejando ver que se ha entendido la vivienda como un hecho en el que prima lo arquitectónico y donde el análisis de la calidad de la misma desde el entorno y su relación con el contexto sociocultural no son aspectos importantes a integrar.

En la tabla 4, se presenta un ejercicio de comparación de las políticas públicas en Colombia en relación a la vivienda.

Tabla 4. Cuadro comparativo enfoque de las políticas públicas.

<i>Política pública</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Énfasis temático</i>
Constitución Política de Colombia, 1991, artículo 5 [20].	Derecho a una vivienda digna.	Espacio, comodidad, servicios públicos, durabilidad, seguridad, esparcimiento y calidad de vida.
Política de gestión ambiental urbana, 2008 [21].	Establecer directrices para el manejo sostenible de las áreas urbanas.	Vivienda, espacio público, transporte urbano, recurso hídrico, servicios públicos y residuos.
Política de producción y consumo sostenible, 2010 [22].	Plantear estrategias para modificar los patrones de producción y consumo.	Ciclo de vida.
Política pública de urbanismo y construcción sostenible, 2014 [12].	Armonizar el urbanismo y las construcciones.	Suelo urbano, transporte y movilidad; servicios públicos, vías y espacio público, VIS, edificaciones públicas y edificaciones privadas.
Política pública de urbanismo y construcción sostenibles del valle de Aburrá, 2016 [18].	La política presenta dos niveles de indicadores: el primer nivel está constituido por indicadores técnicos que permiten evaluar la sostenibilidad en los diferentes ámbitos de aplicación y las fases del ciclo de vida de los proyectos constructivos. El segundo nivel corresponde a los indicadores de política pública los cuales permitirán evaluar la efectividad de la implementación de la política pública.	Se compone de cinco ejes: Ecoeficiencia. Habitabilidad. Viabilidad. Complejidad. Resiliencia. Los ejes de movilidad y equidad dependen de otros instrumentos de planificación (POT), por lo cual no están incluidos en el modelo.

Fuente: elaboración propia

La primera de las políticas derivadas de la Constitución de 1991, y que tiene relación directa con los conceptos de vivienda, ciudad y medio ambiente, es la política de *Ciudades amables*, desarrollada por el Departamento Nacional de Planeación en el año 2006 y de la cual se valora la inclusión por primera vez del concepto de “ciudad sostenible” como aspiración del Estado colombiano, para lo cual plantea una serie de estrategias que dividen el entorno construido en cuatro componentes y cada uno cumple un papel en la aproximación al concepto de ciudad sostenible. Los componentes que dicha política incluye son: desarrollo urbano, vivienda, agua y saneamiento básico y transporte [23]. Cabe anotar que, a pesar de haber definido dichos componentes como estratégicos para alcanzar ciudades sostenibles, el no contar con instrumentos y mecanismos que condicionen el accionar de los diferentes sectores involucrados, no ha permitido que la política se materialice y genere cambios que permitan aproximarnos a ciudades sostenibles.

En el año 2008 se formula la *Política de gestión ambiental urbana*, la cual tenía como objetivo establecer directrices para el manejo sostenible de las áreas urbanas, buscando armonizar la gestión y las políticas sectoriales a través de espacios de coordinación interinstitucional y de participación ciudadana. “Dicha política estableció, como uno de sus objetivos de gestión, contribuir al mejoramiento de la calidad del hábitat urbano, con una meta específica enfocada a la definición y establecimiento de principios y lineamientos ambientales para el diseño y la construcción de vivienda sostenible” [10], todo ello enmarcado en una estrategia de calidad del hábitat urbano. La política antes mencionada presenta como debilidad el concentrarse únicamente en áreas urbanas, dejando de lado la sostenibilidad en el territorio rural y urbano-rural. Dicha política propone, en contraposición con los ejes temáticos propuestos por la política de ciudades amables, cinco temas de importancia en la búsqueda de la sostenibilidad, estos son: vivienda, espacio público, transporte urbano, recurso hídrico, servicios públicos y residuos. Se observa cómo las temáticas que prioriza tienen relación directa con la infraestructura de soporte de los contextos urbanos, pero no pone en discusión otros aspectos de la sostenibilidad urbana relacionados con el modelo de ocupación, con el modelo de consumo, aprovechamiento de los recursos naturales o desarrollo humano. Igual que sucede en las políticas anteriores, adolece de falta de concreción y de formular programas precisos en las diferentes líneas temáticas.

Más recientemente, en el año 2010, se formuló la política de producción y consumo sostenible, política que aparentemente no tiene relación con la vivienda y la ciudad, sin embargo, lo más valorable de la misma es la comprensión de los problemas de insostenibilidad que están ligados a las actividades productivas, aborda el problema de la sostenibilidad desde una perspectiva de sectores productivos de oferta y demanda,

reconoce la importancia de impactar los ciclos productivos y de consumo, tomando como referencia el ciclo de vida [23].

Esta política busca plantear estrategias para modificar los patrones de producción y consumo. En el caso particular del sector de la construcción la aplicación de la política implicará evaluar de dónde provienen las materias primas que se emplean, qué se hace con los residuos sólidos provenientes de la demolición, excavación y materiales empleados en la construcción de obras de infraestructura, buscando que la mayor parte de ellos se incorporen de nuevo al sistema productivo de la construcción en nuevos materiales y dentro de la misma obra en procesos constructivos diferentes al de origen.

La *Política pública de urbanismo y construcción sostenible*, la cual estuvo en proceso de perfeccionamiento y discusión desde el año 2013, presentaba un enfoque integral y multidimensional del problema. Sin embargo, en el año 2015 se expidió el Decreto 1285 de 2015, que reglamenta dicha política y tiene por objeto establecer lineamientos de construcción sostenible para edificaciones, encaminados al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social, objeto que se desarrolla a partir de generar medidas para el ahorro de agua y energía en las edificaciones. Este decreto deja de lado muchos de los aspectos que el documento preparatorio de la política había enunciado, y que podrían aportar a armonizar el urbanismo y las construcciones con la base biofísica y sociocultural leídos desde una perspectiva multidimensional [12].

Frente a la problemática habitacional, se ha planteado una solución de infraestructura que se ve reflejada en un concepto generalizado asociado a dicho problema –denominado política de vivienda–, en ella, la vivienda se entiende como la solución arquitectónica resultado de la aplicación de la norma. Allí radica el primer obstáculo en la visión del problema, ya que concebirlo únicamente como un asunto de vivienda, implica sesgar tanto la lectura como la construcción de estrategias de solución solo a lo que atañe a la dimensión fisicoespacial, lo que lleva a concentrar de manera particular el interés en entregar una vivienda como respuesta al déficit.

“De igual forma, somos conscientes de que la mirada debe ser ampliada en un mayor sentido de integralidad, pues no se puede desconocer que el entorno creado de la ciudad incide directamente en el desarrollo de la vivienda y que la ocupación y consolidación de los sectores residenciales influye a su vez en el desarrollo y expansión de la ciudad. Así, la calidad de la vivienda está asociada al entorno urbano y a la satisfacción de las necesidades inherentes de movilidad, recreación, abastecimiento, trabajo, educación, salud y demás factores que requieren el desarrollo social y ambiental de los ciudadanos y las áreas urbanas” [10].

En Colombia existen pocos ejemplos de propuestas de vivienda sostenible, la mayoría de ellas se han desarrollado en la zona rural, por ejemplo, iniciativas privadas (tal es el caso de los concursos desarrollados por la Fundación Corona y la Revista Escala que se enfocan en propuestas que buscan generar un hábitat sostenible en contextos urbanos y rurales) y que en algunos casos hacen énfasis en la recuperación de materiales y sistemas constructivos tradicionales que ofrecen adecuadas condiciones para garantizar confort térmico y lumínico haciendo uso de materiales locales. También en el último año, se ha visto la afluencia de proyectos de vivienda de estratos altos que buscan la certificación LEED, como una forma de presentar un valor agregado en un mercado inmobiliario muy competitivo, donde la construcción sostenible se vuelve una aspiración que da estatus a la vivienda y la posiciona con relación a sus iguales.

4. RESULTADOS

El desarrollo sostenible se entiende como una aspiración que, llevada al campo de la construcción sostenible, se ve aplicada a diferentes escalas. Para el caso de la vivienda implicará una lectura de la sostenibilidad que interrelacione diferentes escalas involucradas así: la escala territorial al concepto de ciudades sostenibles, la escala urbana, al de sostenibilidad urbana y la escala de intervención micro al concepto de arquitectura sostenible. Adicionalmente, hablar de sostenibilidad de la vivienda implica vincular también los estructurantes naturales de la realidad con los estructurantes artificiales, de tal manera que cualquier propuesta que evalúe la sostenibilidad de la vivienda implica una perspectiva sistémica donde los elementos a considerar hacen parte de las diferentes interrelaciones.

La manera como se han desarrollado los asentamientos humanos, y la ciudad como su mayor expresión, han llevado a que el no considerar los determinantes ambientales y sociales en la producción del hábitat, ocasione múltiples desequilibrios y problemáticas socioambientales.

Si se quiere aspirar a permear la arquitectura y los asentamientos humanos con el concepto de sostenibilidad, es necesario cambiar el paradigma que tradicionalmente define la vivienda como técnica arquitectónica y derivar hacia un nuevo paradigma que entienda la vivienda en relación con su entorno, en el que la producción de hábitat no se circunscriba a la solución arquitectónica y donde, partiendo del concepto internacional de desarrollo sostenible, se entienda que pensar en lo sostenible es un asunto que supera los límites de lo arquitectónico e interactúa y modifica los sistemas colindantes al mismo: entorno urbano, ciudad y territorio.

Desde la perspectiva normativa, que reglamenta el actuar en el tema de vivienda en el país, se rescata lo propuesto en las diferentes políticas públicas analizadas así:

- Constitución política de Colombia (1991): calidad en el diseño de la vivienda y el urbanismo, búsqueda de una vivienda digna (segura, sana, confortable) [20].
- Ciudades amables: se asegura la sostenibilidad ambiental en el entorno construido a través de cuatro componentes: desarrollo urbano, vivienda, agua y saneamiento básico y transporte.
- Gestión ambiental urbana: se busca con ella garantizar la calidad del hábitat urbano a partir de analizar los siguientes factores: vivienda, espacio público, transporte urbano, recurso hídrico, servicios públicos y residuos [21].
- Urbanismo y construcción sostenible: se desarrolla en dos componentes, el primero urbanismo, que evalúa factores como: suelo urbano transporte y movilidad. El segundo construcciones, considera factores: VIS, edificaciones públicas y edificaciones privadas [12].

Se observa que todas las políticas consideran unos temas en común, lo que le otorga relevancia a los mismos e implica considerarlos en el modelo a proponer, estos son: vivienda, saneamiento básico y transporte. Se requiere además superar el nivel de la política de tal manera que se generen instrumentos que hagan viable la inspiración planteada por la política y no quedarnos en enunciados teóricos que no transforman, ni impactan el desarrollo humano de la población.

5. CONCLUSIONES

Los conceptos asociados a la arquitectura sostenible, y reconocidos a nivel internacional, buscan una inserción armónica del elemento construido en el contexto natural, un uso eficiente de los recursos naturales requeridos para su funcionamiento empleando, en algunos casos, el análisis del ciclo de vida de los materiales como estrategia para evaluar los mismos desde su origen hasta su conclusión como residuo sólido. En el caso particular de la arquitectura bioclimática, esta se concentra en apostar al confort térmico y bienestar como indicadores de coherencia con el contexto. Aunque la mayor parte de dichas propuestas conceptuales abordan el contexto biofísico como determinante, ninguna incluye el contexto sociocultural como condicionante de la respuesta urbana y arquitectónica, por esta razón las soluciones que se entregan son extrapolables a contextos biofísicos similares, lo que hace que pierdan su carácter específico y particular.

No ha habido una conciencia de ocupación del territorio en coherencia con las restricciones ambientales del mismo, se entiende el suelo como aquellas áreas no

ocupadas por infraestructura y que son susceptibles de admitir un módulo de habitación, sea este informal, de invasión o formal. Es por esto que los recursos naturales se ven afectados, ya que elementos como los retiros de quebradas no se consideran como áreas de protección necesarias para evitar riesgo por inundación, sino que son tomadas como áreas disponibles para la población que llega desplazada y no encuentra otro lugar que le sea asequible.

REFERENCIAS

- [1] Organización de las Naciones Unidas, “Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo,” Río de Janeiro, 3 a 14 de junio de 1992, vol. I, 1992.
- [2] Organización de las Naciones Unidas, Informe Brundtland “Nuestro futuro común”, 1987.
- [3] Unión Internacional de Arquitectos, Informe Definición de la UIA International Union of Architects y la AIA American Institute of Architects, 1993.
- [4] United States Agency for International Development -Usaid, *Documento técnico de soporte-recomendaciones de política pública de construcción y urbanismo sostenible informe final*, AECOM, Bogotá, 2013.
- [5] Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Anexo 1. “Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones, Bogotá, Colombia,” [En línea], vol. 85, Disponible: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/Viceministerio-Vivienda/ANEXO%201%200549%20-%202015.pdf>, 2016.
- [6] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Satisfacción residencial en la vivienda básica, SER-VIU: “La perspectiva de capital social,” Santiago de Chile, [En línea], pp. 54, Disponible: http://www.minvu.cl/incjs/download.aspx?gls_cod_nodo=20070411164455&hdd_nom_archivo=Satisfacci%C3%B3n%20Residencial%20Capital%20Social.pdf, 2001.
- [7] M. M. Garcilaso de la Vega, “Desarrollo sistémico de la política de vivienda en Cuba”, *Arquitectura y Urbanismo*, vol. XXXII, N.º 2, pp. 16-20, 2011.
- [8] C. Gómez Gutiérrez, y A. Gómez Sal, *Referencias para un análisis del desarrollo sostenible*, ESPA: Universidad de Alcalá, 2013, p. 200.
- [9] Banco Interamericano de Desarrollo –BID, “Metodología ciudades emergentes y sostenibles,” 3.ª ed., [En línea], p. 172, Disponible: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8119/Guia-Metodologica-Programa-de-Ciudades-Emergentes-y-Sostenibles-Tercera-edicion.pdf>, 2016.
- [10] Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana,” Bogotá, [En línea], p. 200, Disponible: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/cartilla_criterios_amb_diseno_construc.pdf, 2012.
- [11] R. Quiroga Martínez, “Indicadores regionales de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe,” CEPAL, Santiago de Chile, [En línea], p. 228, Disponible:

- http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/5498/S0700589_es.pdf;jsessionid=D31389A3C391422D6C66BCCF7802088C?sequence=1, 2007.
- [12] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., “Documento técnico de soporte política pública de ecourbanismo y construcción sostenible de Bogotá,” [En línea], p. 51, Disponible: http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/Normativa/ProyectosDecreto/Politica_Publica_Ecourbanismo/DTS_PPECS_V5_140526_1.pdf, 2014.
- [13] E. Higuera, “El reto de la ciudad habitable y sostenible,” [En línea], Dapp, p. 226, Disponible: http://www.coag.es/websantiago/pdf/ester_higuera.pdf
- [14]. BCN Ecología &AL21, “Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y Medianas,” [En línea], p. 81, Disponible: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/medio-ambiente-urbano/INDICADORES_CIUDADES_GRANDES_Y_MEDIANAS_tcm7-177731.pdf, 2013.
- [15] Colombia, Ministro del Interior y Ministro de Justicia, Decreto 2190 de 2009, Bogotá, 2009
- [16] Colombia, Ministro de Defensa Nacional, Decreto 1285 de 2015, Bogotá, 2015.
- [17] J. E. Reyes Nieto, L. Simões da Silva, V. Murtinho, C. Rigueiro, H. Gervasio, Y A. Bettencourt, “Desarrollo de una metodología de evaluación integral de sustentabilidad a nivel urbano”, Portugal, [En línea], pp. 1669–1678, Disponible: https://www.researchgate.net/profile/Jocelyn_Reyes_Nieto/publication/307977714_Desarrollo_de_una_metodologia_de_evaluacion_integral_de_sustentabilidad_a_nivel_urbano/links/57d56ebf08ae601b39aa6c44.pdf?origin=publication_list
- [18] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Política pública de construcción sostenible, Medellín, 2016.
- [19] Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, “Calidad en la vivienda de interés social. Serie Guías de asistencia técnica para vivienda de interés social,” Bogotá, Colombia, [En línea], p. 61, Disponible: http://www.minvivienda.gov.co/Documents/guia_asis_tec_vis_1.pdf, 2011.
- [20] Constitución Política de Colombia, Bogotá, 1991.
- [21] Colombia, Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Sostenible, “Política de Gestión Ambiental Urbana,” Bogotá, [En línea], p. 54, Disponible: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Politica_de_Gestion_Ambiental_Urbana.pdf, 2008.
- [22] Colombia, Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Sostenible, “Política de producción y consumo sostenible,” Bogotá, [En línea], p. 72, Disponible: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Politica_de_Gestion_Ambiental_Urbana.pdf, 2010.
- [23] Presidencia de la República de Colombia, *Construir ciudades amables, propuesta para discusión*, Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, y Ministerio de Ambiente y Vivienda y Desarrollo Sostenible, p. 108, 2006.

Estudio de la resistencia a tracción en anclajes estructurales posinstalados con adhesivo epóxico*

Diego Fernando Páez Moreno**
Jeniffer Hamón Caicedo***

Recibido: 29/06/2016 • Aceptado: 04/03/2018
<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a3>

Resumen

Investigaciones realizadas en anclajes estructurales posinstalados, han evidenciado un vínculo entre la longitud de embebido y el diámetro de perforación con la resistencia máxima a tracción. El presente artículo, resultado de una investigación financiada por la dirección de investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, analiza este vínculo a partir de la variación de la resistencia y el tipo de falla en prototipos de anclaje estructural con variaciones en la longitud de embebido y diámetro de perforación, en concreto de resistencia a la compresión 28 MPa, adhesivo epóxico, barra de refuerzo, 15 unidades de grafil de diámetro 0,007 m, y 15 unidades de acero corrugado de diámetro 0,0095 m, para un total de 30 sistemas solicitados a tracción directa en la máquina universal. Los resultados mostraron que la resistencia a tracción y el tipo de falla están en función de la longitud de embebido y la estructura corrugada de la barra de refuerzo anclada.

Palabras clave: resina epóxica; anclajes adhesivos; resistencia.

* Artículo original derivado de investigación terminada financiada por la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

** Magíster en Ingeniería Civil. Ingeniero Civil. Profesor investigador de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ingeniería, grupo de investigación Grinfavial. Avenida Central del Norte N.º 39-115. Teléfono: +57 +8 7405626. Correo electrónico: diego.paez@uptc.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-1141-8819>.

*** Ingeniera civil, estudiante de Maestría en Ingeniería Civil, miembro del grupo de investigación Grinfavial de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Avenida Central del Norte N.º 39-115. Teléfono: +57 +8 7405626. Correo electrónico: jennifer.hamoncaicedo@uptc.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3013-5611>.

Study of Tensile Strength in Structural Anchors Post-Installed with Epoxy Adhesive

Abstract

Research carried out on post-installed structural anchors has shown a link between the embedded length and the diameter of the bore with maximum tensile strength. This paper, is the outcome of research funded by the research department of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, analyzes this link from the variation of resistance and failure type in structural anchor prototypes with variations in embedded length and drilling diameter, in particular compressive strength 28 MPa, epoxy adhesive, reinforcing bar, 15 graphite units of 0.007 m diameter, and 15 corrugated steel units of 0.0095 m diameter, for a total of 30 systems requested for direct traction in the universal machine. The results showed that tensile strength and failure type are a function of the embedded length and corrugated structure of the anchored reinforcing bar.

Keywords: epoxy resin; adhesive anchors; strength.

Estudo da resistência à tração em ancoragens estruturais pós-instaladas com adesivo epóxi

Resumo

Pesquisas realizadas em ancoragens estruturais pós-instaladas evidenciaram um vínculo entre o comprimento de incorporação e o diâmetro de perfuração com a resistência máxima à tração. O presente artigo, resultado de uma pesquisa financiada pela direção de pesquisas da Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, analisa esse vínculo a partir da variação da resistência e do tipo de falha em protótipos de ancoragem estrutural com variações no comprimento de incorporação e diâmetro de perfuração em concreto de resistência à compressão 28 MPa, adesivo epóxi, barra de reforço, 15 unidades de arame trefilado de 0,007 m de diâmetro e 15 unidades de aço corrugado de 0,0095 m de diâmetro, para um total de 30 sistemas solicitados à tração direta na máquina universal. Os resultados mostraram que a resistência à tração e ao tipo de falha ocorrem em função do comprimento de incorporação e da estrutura corrugada da barra de reforço ancorada.

Palavras-chave: resina epóxi; ancoragens adesivas; resistência.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existe una cantidad importante de edificaciones construidas antes de la entrada en vigencia de documentos técnicos como el *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente* NSR-10 [1], y por ello se justifica la necesidad de reforzar y restaurar este tipo de edificaciones con el fin de actualizarlas respecto a los nuevos requisitos de funcionalidad y servicio. Entre los métodos constructivos para el reforzamiento y la restauración de estructuras se encuentran los anclajes estructurales posinstalados con adhesivo epóxico [2].

Como lo especifica el Committee ACI 503 [3], dichos anclajes consisten en barras roscadas o conformadas que se cementan utilizando compuestos químicos de dos componentes formados. Estos se cargan principalmente a través de dispositivos de fijación del anclaje embebido y la sollicitación puede ser de flexión, tracción, corte o una combinación de las anteriores. Investigaciones analíticas y experimentales se han desarrollado en esta temática con el fin de aportar claridad respecto a la interacción de las variables que actúan en los anclajes con adhesivo epóxico y la influencia que estas tienen en su comportamiento mecánico. Entre las analíticas se destacan varias. Una de ellas es la elaborada por Gesoğlu *et al.* [4] en la cual, con el uso de programación de expresión de genes (GEP), se desarrolló un modelo de predicción de la capacidad de cortante en anclajes posinstalados en concreto endurecido. Otra es expuesta por Obataa *et al.* [5], que estudió experimental y analíticamente la influencia del borde libre en la resistencia a la tracción de los anclajes exhibiendo una relación entre la longitud de embebido y la falla. Finalmente, la de Upadhyaya y Kumar [6] hizo énfasis en predecir el esfuerzo que causaría la falla por cortante o tracción en anclajes estructurales posinstalados, determinando que, con el aumento en la longitud de embebido, se reduce el esfuerzo máximo a cortante.

Respecto a las experimentales, la investigación realizada por Çalışkan *et al.* [7] evaluaron anclajes estructurales con concreto de baja resistencia a compresión sollicitados a cortante y concluyen que, al aumentar el diámetro del anclaje, se disminuye su resistencia a cortante. Yang *et al.* [8] por su parte, analizaron el arrancamiento del anclaje en un sistema compuesto por anclaje-mortero-concreto estableciendo que la carga máxima se incrementa linealmente con la longitud de embebido. En cuanto a los anclajes estructurales con concreto de alta resistencia, la investigación de Çolak [9] se enfocó principalmente en el comportamiento del adhesivo epóxico, señala la importancia en la dosificación de este e indica que, en este tipo de anclajes, no se obtienen mejores resultados con una profundidad de embebido mayor a 10 veces el diámetro de la barra.

Ruda y Páez [10] por su parte, evaluaron la resistencia a tracción directa en anclajes con dos tipos de barra refuerzo y concretos de alta resistencia, evidenciando

que con una longitud de embebido de diez veces el diámetro de la barra de refuerzo es constante el desarrollo de la fluencia del acero, y que para este tipo de sistemas de anclaje es más recomendable emplear diámetros menores de acero de refuerzo. McVay [11] analizó las características propias del proceso de falla determinando que, en el concreto, el tipo de falla “cono” se debe a la tracción, mientras que la falla en la interface de concreto–adhesivo se debe al corte.

A partir de las investigaciones referenciadas, se evidencia la clara influencia de la longitud de embebido y diámetro de perforación en el comportamiento de los anclajes estructurales posinstalados.

Otras investigaciones, como la desarrollada por Contrafatto y Cosenza [12] y Puigvert *et al.* [13], demostraron la posibilidad de emplear estos sistemas estructurales en basalto, arenisca y caliza al igual que nuevas aplicaciones como el reemplazo de las barras de refuerzo corrugadas por CFRP. Respecto al proceso constructivo de los anclajes estructurales posinstalados, el documento elaborado por Gerber y Ekel [14] expone el contraste entre los requisitos establecidos por diferentes estándares para la inspección de anclajes estructurales posinstalados. Adicionalmente, documentos técnicos como el de Hilti [15] compilan lineamientos a considerar en cuanto a directrices de diseño e instalación de anclajes estructurales. Particularmente, en este documento se incluye un capítulo con la descripción de las ecuaciones de diseño congregadas en el Committee ACI 318-11 [16] para establecer la longitud de embebido (empotramiento) en anclajes, sin embargo, en las hojas técnicas de fabricantes de adhesivo epóxico como lo es SIKA [17] se establece un valor específico para la longitud de embebido y diámetro de perforación según el diámetro de la barra de refuerzo.

Con base en el contexto descrito previamente, y dada la necesidad de continuar evaluando la influencia que tienen las variables de diámetro de perforación y longitud de embebido sobre los anclajes estructurales posinstalados, se estructura la presente investigación con anclajes estructurales posinstalados solicitados a tracción directa, contruidos a partir de probetas de concreto con un tipo de resistencia a la compresión y dos tipos de barra de refuerzo. De esta forma, los parámetros a evaluar fueron la carga última resistida por cada sistema de anclaje estructural y su respectivo tipo de falla. Cabe destacar que esta investigación no considera las condiciones de confinamiento del concreto reforzado.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

Con énfasis en los métodos y materiales constructivos regionales, se emplearon probetas de concreto con un tipo de resistencia a la compresión comúnmente empleada en el sector de la construcción [18], barras de refuerzo con dos diámetros nominales diferentes, y adhesivo epóxico Sikadur® AnchorFix-4 de Sika S. A.

1.1 Concreto

Se usaron 30 probetas cilíndricas de concreto para desarrollar los ensayos de resistencia de los anclajes estructurales posinstalados y 16 probetas para evaluar la resistencia a la compresión a los 28 días de edad. Se estableció la resistencia máxima a compresión promedio en 28 MPa según la NTC 673 [19], asimismo, se estableció la homogeneidad de este parámetro respecto a la media aritmética establecida con base en los datos dados por los proveedores. La caracterización del concreto se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Características elementos de anclaje estructural posinstalado

<i>Características físicas</i>					<i>Características mecánicas</i>		
<i>Material</i> \emptyset		<i>Dimensiones</i> (m) Longitud		<i>Cantidad</i>	<i>Parámetro fabricante</i>	<i>Fuente laboratorio</i>	
Concreto	Lote 1	0,15	0,3	27	Resistencia efectiva a la compresión	28,95 MPa	31,33 MPa
	Lote 2			27		25 MPa	33,92 MPa
Barra de refuerzo	Acero corrugado	0,009	0,15	22	Carga rotura última	–	35,2 kN
					Carga fluencia	–	26,4 kN
					Resistencia fluencia	420 MPa	–
	Grafil	0,007	0,15	20	Resistencia mínima a la tracción	585 MPa	–
					Resistencia fluencia	485 MPa	–

Fuente: elaboración propia

1.2 Barra de refuerzo

Para los ensayos de tracción directa, se emplearon barras de refuerzo de diámetro 7 mm tipo grafil con características mecánicas dadas por el fabricante. También se utilizaron barras de refuerzo de diámetro 3/8" (9,5 mm) tipo acero corrugado Grado 60. De estas últimas se ensayaron dos unidades, con base en la NTC 2 [20] y se obtuvo su carga última de rotura, fluencia y la gráfica carga vs. alargamiento. La caracterización de las barras de refuerzo se muestra en la tabla 1.

1.3 Adhesivo epóxico

El adhesivo empleado es un sistema de tipo epóxico de dos componentes, 100 % sólidos. Una vez mezclados los componentes, se obtiene una pasta suave de gran adherencia y resistencia mecánica para anclajes estructurales posinstalados. Cumple los requerimientos de la norma ASTM C-881-99, tipo IV, grado 3 [17]. Las características mecánicas principales del adhesivo epóxico utilizado se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Principales características mecánicas adhesivo epóxico

<i>Características adhesivo epóxico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Resistencia</i>
Tensión	29,7 MPa
Corte	25,5 MPa
Módulo de rotura	46,2 MPa

Fuente: elaboración propia

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Diseño experimental

El diseño experimental empleado se ilustra en la figura 1 y se basa, tanto en la variación de la longitud de embebido (L_e) definida como n veces el diámetro de la barra de refuerzo a anclar, como en la variación del diámetro de perforación ($\varnothing P$) en el que se establecen tres medidas (bajo $\varnothing B$, medio $\varnothing M$, y alto $\varnothing A$).

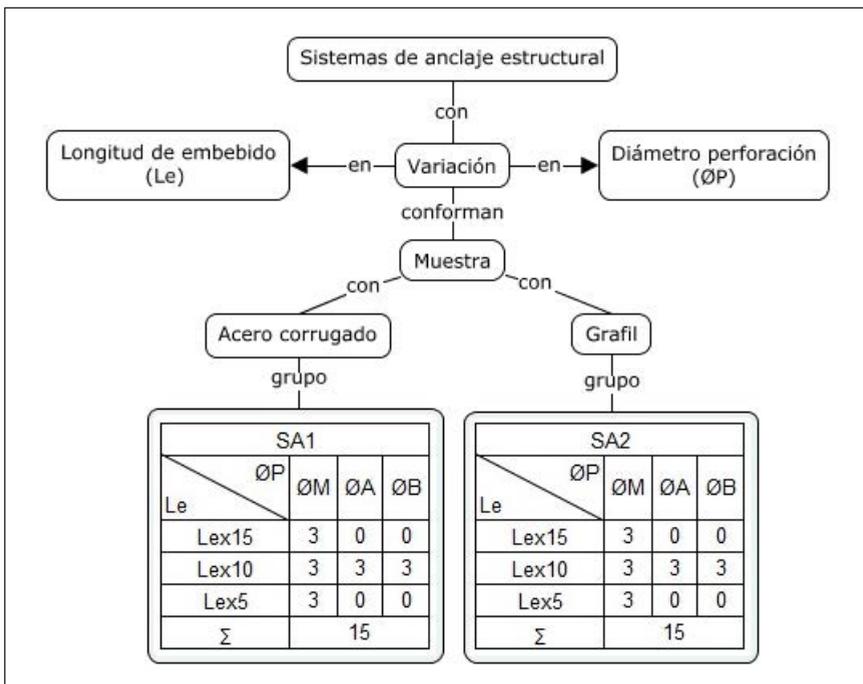


Figura 1. Diseño experimental para los ensayos en anclaje estructural posinstalado

Fuente: elaboración propia

En el caso de los anclajes estructurales posinstalados con grafil, a continuación, se especifica la equivalencia en el diámetro de perforación: $\text{ØB} = 7,93$ mm; $\text{ØM} = 9,52$ mm y $\text{ØA} = 12,7$ mm, y la equivalencia en la longitud de embebido (L_e): $\text{Øx}5 = 3,5$ mm; $\text{Øx}10 = 7,0$ mm $\text{Øx}15 = 10,5$ mm. Por otra parte, para los anclajes estructurales posinstalados con acero corrugado la equivalencia en el diámetro de perforación es: $\text{ØB} = 9,52$ mm; $\text{ØM} = 12,7$ mm y $\text{ØA} = 15,8$ mm, y la equivalencia en la longitud de embebido (L_e) es: $\text{Øx}5 = 4,7$ mm; $\text{Øx}10 = 9,5$ mm $\text{Øx}15 = 14,2$ mm. Cabe destacar que, para los anclajes con acero corrugado, el diámetro de perforación ØM y la longitud de embebido $\text{Øx}10$ son las especificadas por el fabricante del adhesivo epóxico [17].

2.2 Preparación de los especímenes para el ensayo

Para el desarrollo de los anclajes estructurales posinstalados se tuvieron en cuenta las instrucciones del fabricante del epóxico [17], siguiendo el orden que se enuncia:

- Perforación de probetas de concreto (pasado los 28 días de edad).
- Limpieza de la perforación con aire a presión.
- Aplicación del adhesivo epóxico mezclado en la boquilla hasta aproximadamente la mitad de la perforación.
- Inserción de la barra de refuerzo mediante movimientos rotativos.
- Curado de dos días.

2.3 Ensayo a tracción directa

Se procedió a someter los 30 anclajes estructurales posinstalados a un ensayo a tracción directa en máquina universal (como se muestra en la figura 2), con base en los lineamientos de ASTM E488M [21] para garantizar la estabilidad del anclaje estructural a ensayar, un área libre para el desarrollo de la falla, y que las fuerzas que fueran aplicadas a través de la barra de refuerzo fueran perpendiculares a la superficie de la sección del elemento de ensayo. Se empleó en la máquina universal un complemento de un armazón laminar y una platina de acero con un orificio circular dispuesto en el centro geométrico de 0,10 m como se muestra en la figura 3. La velocidad de carga empleada en el ensayo fue de 5 MPa/s de manera constante hasta llegar al punto de carga última del elemento. Inmediatamente finalizado el ensayo se procedió a tomar registro filmico y fotográfico del tipo de falla presentado para su posterior caracterización según Committee ACI 355 [22].



Figura 2. Montaje en máquina universal para ensayo a tracción directa en anclaje estructural post instalado

Fuente: elaboración propia



Figura 3. Soporte laminar y platina de acero para ensayo a tracción directa en anclaje estructural posinstalado

Fuente: elaboración propia

3. RESULTADOS

El análisis se basa en una evaluación cuantitativa y una cualitativa de los resultados. La cualitativa consiste en la caracterización del tipo de falla clasificándola en falla por arrancamiento, falla del acero o falla por rotura del concreto. En contraste, la cuantitativa se basa en la premisa de que, en el desarrollo de los anclajes estructurales posinstalados, la fluencia de la barra anteceda la falla del sistema. Para este análisis de los resultados se tuvieron como referencia los valores de carga de fluencia, carga última y carga mínima de la barra de acero corrugado y el grafil. Con esto, se desarrollaron

dos tipos de gráficas: una de tipo columna que exhibe la carga máxima soportada por cada anclaje adhesivo incluyendo líneas que representan los parámetros de carga mencionados según el caso, y otra de tipo línea que muestra las curvas de resistencia en función de la carga (kN) vs. alargamiento (mm).

Para el grupo de anclajes estructurales posinstalados con acero corrugado de diámetro 3/8" (9,5 mm), el análisis cualitativo permitió establecer que, en la mayoría de anclajes la falla se dio por rotura del concreto, como se muestra en la figura 4. En contraste, se destaca que el tipo de falla presentado en los anclajes con mayor longitud de embebido (Lex15) fue por acero, lo cual se muestra en la figura 5. Esta falla está caracterizada porque la longitud embebida del anclaje fue suficiente para que la resistencia del acero controlara la rotura excluyendo así las fallas del concreto.



Figura 4. Falla por rotura del concreto en anclaje estructural posinstalado

Fuente: elaboración propia



Figura 5. Falla del acero en anclaje estructural posinstalado

Fuente: elaboración propia



Figura 6. Falla por arrancamiento en anclaje estructural posinstalado

Fuente: elaboración propia

En cuanto al análisis cuantitativo, a partir de la figura 7 se puede observar que para un mismo diámetro de perforación de 12,7 mm ($\varnothing M$) y una longitud de embebido de 15 veces el diámetro de la barra (Lex15) se desarrolla el 130 % de la fluencia del acero llegando a su carga de rotura o carga última. Por su parte, con el mismo diámetro de perforación ($\varnothing M$) pero longitud de embebido de diez veces el diámetro de la barra a anclar (Lex10), se logró desarrollar el 113% de la fluencia del acero, pero no se llegó a la carga de rotura; y en el caso de los anclajes con diámetro de perforación ($\varnothing M$) y la longitud de embebido más baja, es decir cinco veces el diámetro de la barra de refuerzo (Lex5) solo se alcanzó a desarrollar el 56 % de la carga de fluencia. Para el resto de combinaciones de diámetro de perforación–longitud de embebido, en los cuales la longitud de embebido fue diez veces el diámetro de la barra a anclar (Lex10) y la condición a variar era el diámetro de perforación, solo dos de los nueve anclajes fallados logró desarrollar la fluencia del acero.



Figura 7. Carga máxima anclaje estructural post instalado con acero corrugado $\varnothing = 3/8''$

Fuente: elaboración propia

Respecto a la curva de resistencia de este tipo de anclajes, al analizar la figura 8 se observa claramente la semejanza entre la curva del acero y las curvas de los anclajes con mayor longitud de embebido (Lex15) dado que en estas se pueden diferenciar las zonas elástica, plástica y las cargas de fluencia y última. Asimismo, es evidente que en las curvas de resistencia correspondientes a las demás combinaciones de diámetro de perforación–longitud de embebido, la mayoría no alcanza a desarrollar zona plástica y por ende pasan súbitamente de la zona elástica a la falla. Es claro que en este tipo de anclajes el desarrollo de la fluencia, y que la falla sea de tipo dúctil o frágil, está intrínsecamente relacionado con la longitud de embebido.

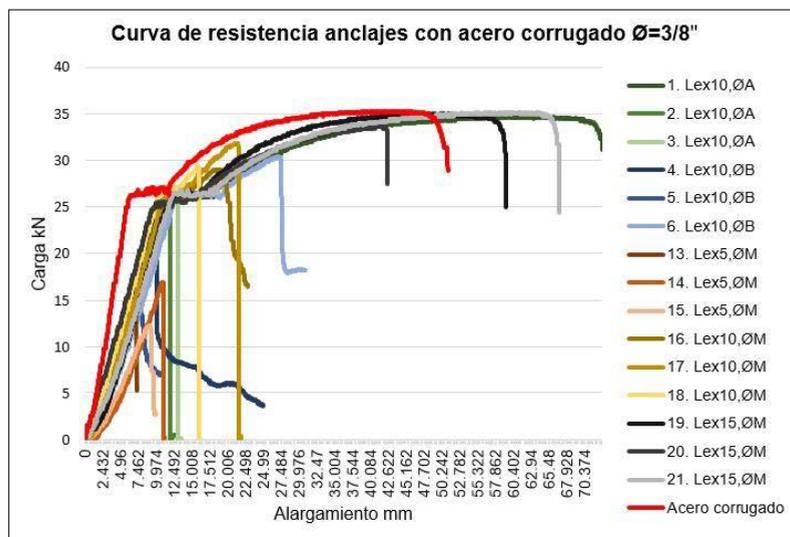


Figura 8. Curva de resistencia anclaje estructural posinstalado con acero corrugado $\phi = 3/8''$

Fuente: elaboración propia

Por otra parte, respecto al grupo de anclajes estructurales posinstalados con grafil de diámetro 7 mm, en la mayoría de estos la falla presentada fue de tipo arrancamiento como se exhibe en la figura 6. Asimismo, con base en la figura 9 se evidencia que solo uno de los quince anclajes fallados logró llegar a la carga de fluencia, mientras que a partir de la figura 10 se observa que el comportamiento de las curvas de resistencia de este tipo de anclajes no es lo suficientemente claro para ser analizado. Es evidente que se deben desarrollar más investigaciones respecto a este tipo de anclajes con barra de refuerzo de tipo grafil.

4. CONCLUSIONES

Considerando los materiales, diseño experimental y análisis empleados en este estudio se pueden obtener las conclusiones que a continuación se presentan.

Los materiales empleados en esta investigación son de uso común en el sector construcción, especialmente el concreto [18] seleccionado. Esto permite generar trazabilidad en el desarrollo de nuevos estudios sobre esta temática, al igual que brinda la posibilidad de implementar los hallazgos encontrados en variedad de proyectos civiles como lo son aquellos de reforzamiento y restauración.

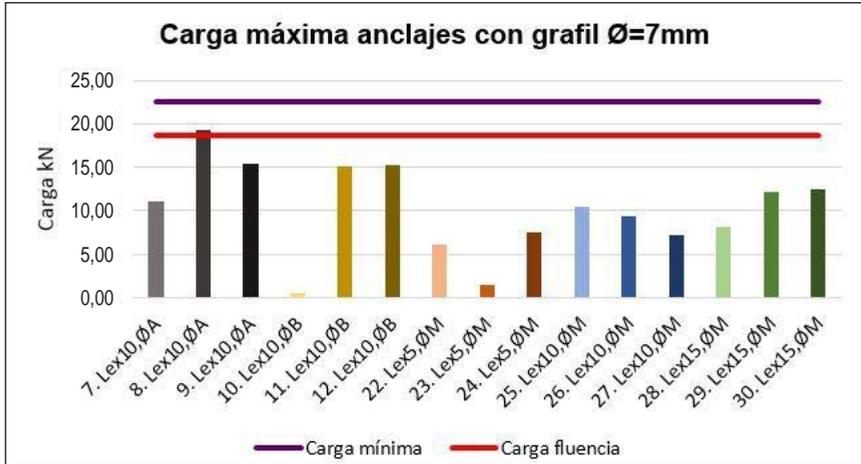


Figura 9. Carga máxima anclaje estructural posinstalado con grafil $\phi = 7$ mm

Fuente: elaboración propia

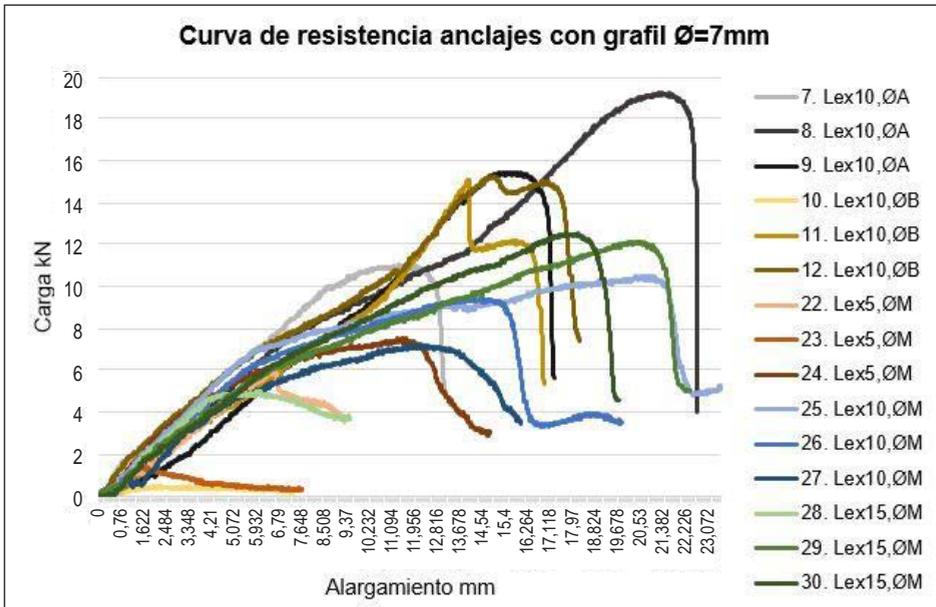


Figura 10. Curva de resistencia anclaje estructural post instalado con grafil $\phi = 7$ mm

Fuente: elaboración propia

La longitud de embebido ha sido una variable ampliamente estudiada en los anclajes estructurales posinstalados dada su incidencia en su comportamiento mecánico, y tal como se comprobó en esta investigación, esta variable es más determinante en el desempeño del anclaje que el diámetro de perforación.

Dados los resultados en los anclajes estructurales posinstalados con grafiles, se estableció la hipótesis de que la estructura de la corruga en este tipo de refuerzo no permite desarrollar suficiente adherencia en la interfaz refuerzo–adhesivo–concreto, razón por la cual la falla primaria de estos anclajes fue de tipo arrancamiento y su resistencia máxima no alcanza a desarrollar la fluencia de la barra. Es pertinente continuar investigando los anclajes estructurales posinstalados con adhesivo epóxico, específicamente anclajes con barra de refuerzo de tipo grafil.

Se estableció que, en los ensayos con barras de acero corrugado con anclajes en los que se usó longitud de embebido de cinco veces el diámetro de la barra (Lex5), la resistencia efectiva a tracción desarrolla hasta un 56 % de la carga máxima de fluencia del acero de refuerzo, por lo cual, esta longitud de embebido se descarta y no se recomienda su implementación.

Los resultados de las cargas máximas de los sistemas de anclaje con acero corrugado evidencian que, al usar una longitud de embebido de 10 veces el diámetro de la barra (Lex10), se puede desarrollar la fluencia del acero de refuerzo. La falla primaria obtenida para esta longitud de embebido se caracteriza por la rotura del concreto.

Al aumentar la longitud de embebido a 15 veces el diámetro de la barra (Lex15) se alcanza a desarrollar hasta un 130 % de la fluencia del acero, llegando incluso a la rotura de la barra. La falla primaria obtenida para esta longitud de embebido es de tipo dúctil, dado que el acero controla en su totalidad la capacidad del anclaje, excluyendo así las fallas en el concreto. Por lo anterior, esta longitud de embebido es la que se recomienda para la implementación de anclajes posinstalados.

REFERENCIAS

- [1] República de Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente Nsr-10*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.
- [2] J. Rendón, “Los anclajes adhesivos en la construcción”, *Noticreto*, vol. 126, pp. 43-47, 2014.
- [3] Committee ACI 503, *Use of epoxy compounds with concrete, ACI 503 R-93*, American Concrete Institute, 1998.
- [4] M. Gesoğlu *et al.*, “Modeling and analysis of the shear capacity of adhesive anchors post-installed into uncracked concrete,” *Composites: Part B: Engineering*, vol. 60, pp. 716-724, 2014.

- [5] M. Obataa *et al.*, “The failure mechanism and the pull-out strength of a bond-type anchor near a free edge,” *Mechanics of Materiales*, vol. 28, pp. 113-122, 1998.
- [6] P. Upadhyaya, y S. Kumar, “Pull-out capacity of adhesive anchors: An analytical solution,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 60, pp.54-62, 2015.
- [7] C. Ózlem *et al.*, “Shear strength of epoxy anchors embedded into low strength concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 723-730, 2012.
- [8] S. Yang *et al.*, “Theoretical analysis on pullout of anchor from anchor–mortar–concrete anchorage system,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 961-985, 2008.
- [9] A. Çolak, “Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 21, pp. 487-493, 2001.
- [10] Y. M. Ruda Arias y D.F. Páez Moreno “Anclajes posinstalados en concreto de alta resistencia,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, N.º 2, pp. 137-156, 2017.
- [11] M. McVay, *et al.*, “Pullout simulation of post installed chemically bonded anchors,” *Journal Structural Engineering*, Vol.122, pp. 1016-1024, 1996.
- [12] L. Contrafatto, y R. Cosenza, “Behavior of post-installed adhesive anchors in natural stone,” *Construction and Building Materiales*, vol. 68, pp. 355-369, 2014.
- [13] F. Puigvert *et al.*, “Static analysis of adhesively bonded anchorages for CFRP tendons,” *Construction and Building Material*, vol. 61, pp. 206-215, 2014.
- [14] B. Gerber and M. Ekenel, “Building Code Requirements for Inspection of Adhesive Anchors in Concrete”, *Journal of Construction Enigneering and Management*, vol. 139, 2013.
- [15] *Post-Installed Reinforcing Bar Guide*, Hilti Group, 2016.
- [16] Committee ACI 318-11, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, 2011.
- [17] Sika Colombia S.A., “Hoja técnica Sikadur AnchorFix-4,” [En línea], acceso 14 de abril, 2015; Disponible: <http://col.sika.com/es/rehabilitacion-y-reforzamiento/rehabilitar-reforzar/02a005/02a005sa01.html>
- [18] M. Lascarro, “Indicadores en concreto,” [En línea], acceso 14 de abril, 2015; Disponible: <https://www.construccionlatinoamericana.com/indicadores-en-concreto/128416.article>
- [19] Icontec, *Concretos. Ensayo resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, NTC 673*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación Icontec, 2012.
- [20] Icontec, *Siderurgia. Ensayo de tracción para materiales metálicos. Método de ensayo a temperatura ambiente, NTC 2*, Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación Icontec, 1995.
- [21] ASTM International, *ASTM E488/488M–10 Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements*, ASTM INTERNATIONAL, 2014.
- [22] Committee ACI 355, *Report on Anchorage to Concrete, ACI 355 IR-91 (Reapproved 1997)*, American Concrete Institute, 1997.

Uso de escorias de alto horno y acero en mezclas asfálticas: revisión*

Hugo Alexander Rondón Quintana**

Marcio Muniz de Farias***

Fredy Alberto Reyes Lizcano****

Recibido: 02/02/2017 • Aceptado: 04/03/2018

<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a4>

Resumen

En la fabricación de mezclas asfálticas se consumen grandes cantidades de agregados pétreos de origen natural lo que impacta negativamente el ambiente. Estos agregados pueden ser sustituidos parcial o totalmente por otros que son desechados en escombreras y producidos por las compañías siderúrgicas, como las escorias de alto horno (BFS) y acero (SS). Estos dos últimos materiales poseen propiedades químicas y físicas que los hacen aptos para ser utilizados en múltiples aplicaciones como la construcción, mantenimiento y rehabilitación de carreteras. En el artículo se presenta una revisión del estado del conocimiento del empleo de BFS y SS en la producción de mezclas asfálticas, se describen y definen ambos materiales, se presenta la problemática ambiental, su riesgo toxicológico de uso, sus propiedades químicas y físicas, las ventajas y limitaciones de uso y la forma como han sido estudiados para ser empleados como agregados pétreos de mezclas asfálticas. Con base en la revisión bibliográfica realizada, los autores al final del artículo exponen algunas recomendaciones para continuar los estudios tendientes a sustituir agregados pétreos naturales por BFS y SS en la fabricación de mezclas asfálticas.

Palabras clave: escoria de alto horno; escoria de acero; mezclas asfálticas; medioambiente.

* Artículo de revisión derivado del proyecto de investigación posdoctoral *Comportamiento de una mezcla asfáltica tibia fabricada con escorias de acero y alto horno* financiado por la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, por la Universidade de Brasília y por la Pontificia Universidad Javeriana.

** Doctor en Ingeniería. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Grupo de investigación Centro de Estudios en Pavimentos y Materiales Sostenibles. Carrera 5 Este N.º 15-82, sede El Vivero, Teléfono: (+57) 310 8687715. Correo electrónico: harondonq@udistrital.edu.co.

*** Doctor of Philosophy. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília — CEP 70910-900. Teléfono: (+55) 61 99970-5484. Correo electrónico: muniz@unb.br. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5257-911X>

**** Ph. D. en Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Grupo de investigación Cecata. Calle 40 carrera 7ª, Bogotá, Colombia. Teléfono (+57) 13208320 ext. 5270. Correo electrónico: fredy.reyes@javeriana.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6407-168X>

Use of Blast Furnace Slag and Steel in Asphalt Mixtures: Review

Abstract

In the manufacture of asphalt mixtures, large quantities of natural stone aggregates are consumed, which has a negative impact on the environment. These aggregates can be partially or totally replaced by others that are disposed of in dumps and produced by steel companies, such as blast furnace slag (BFS) and steel (SS). These last two materials have chemical and physical properties that make them suitable for use in multiple applications such as road construction, maintenance and rehabilitation. The article presents a review of the state of knowledge of the use of BFS and SS in the production of asphalt mixtures, describes and defines both materials, presents the environmental problems, their toxicological risk of use, their chemical and physical properties, the advantages and limitations of use and the way they have been studied to be used as stone aggregates of asphalt mixtures. Based on the bibliographic review, the authors at the end of the article present some recommendations to continue the studies tending to substitute natural stone aggregates with BFS and SS in the manufacture of asphalt mixtures.

Keywords: blast furnace slag; steel slag; asphalt mixtures; environment.

Uso de escórias de alto-forno e aço em misturas asfálticas: revisão

Resumo

Grandes quantidades de agregados pétreos de origem natural são consumidos na fabricação de misturas asfálticas, o que impacta negativamente o ambiente. Esses agregados podem ser substituídos parcial ou totalmente por outros que são descartados em aterros e produzidos pelas companhias siderúrgicas, como as escórias de alto-forno (BFS) e aço (SS). Esses dois últimos materiais apresentam propriedades químicas e físicas que os tornam aptos para serem utilizados em múltiplas aplicações, como a construção, a manutenção e a reabilitação de estradas. No artigo, apresenta-se uma revisão do estado do conhecimento do emprego de BFS e SS na produção de misturas asfálticas, ambos os materiais são descritos e definidos, apresenta-se a problemática ambiental, seu risco toxicológico de uso, suas propriedades químicas e físicas, as vantagens e limitações de uso e a forma como foram estudados para serem empregados como agregados pétreos de misturas asfálticas. Com base na revisão bibliográfica realizada, os autores ao final do artigo expõem algumas recomendações para continuar os estudos com tendência a substituir agregados pétreos naturais por BFS e SS na fabricação de misturas asfálticas.

Palavras-chave: escória de alto-forno; escoria de aço; misturas asfálticas; meio ambiente.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema y motivación

Por lo general, los agregados pétreos conforman más del 90 % y del 75 % de la masa y del volumen de mezclas asfálticas, respectivamente. Esto hace que, en la construcción, mantenimiento y rehabilitación de vías, se consuman grandes cantidades de este material, el cual es principalmente de origen natural. Lo anterior redundaría en un impacto ambiental negativo. En las últimas dos décadas ha venido creciendo el interés por reemplazar materiales granulares naturales (MGN) por otros alternativos, con el objetivo de conservar los recursos naturales, reducir el espacio que ocupan al final de su vida útil en las escombreras e impedir el deterioro del paisaje [1]. Uno de los materiales alternativos que pueden ser utilizados como sustitutos de MGN son las escorias de alto horno (BFS, por sus siglas en inglés) y las de acero (SS, por sus siglas en inglés). Importantes cantidades de estos materiales se generan como desecho diariamente en las industrias de acero. Para dar un ejemplo, de acuerdo con [2], en EE.UU. se producen aproximadamente ocho millones de toneladas de escoria de acero por año, mientras que en Europa se producen doce millones de toneladas [3]. El método convencional de eliminar escorias es llevándolas a escombreras. La creciente eliminación de escorias no solo ocupa espacios de terreno, sino que también desperdicia recursos que pueden ser reutilizados y que, potencialmente, pueden tener un impacto en el medio ambiente debido a la contaminación del agua, el aire y el suelo producto de la liberación de metales y elementos químicos que pueden causar problemas ambientales [4]. Desde el punto de vista ambiental, entonces, la sustitución de MGN por escorias es una alternativa interesante de estudio en el área de las mezclas asfálticas. Incluso las escorias pueden ser una alternativa técnica y económica en zonas donde escasean MGN de buenas propiedades físicas y donde es necesario traer dichos materiales de regiones distantes con el consecuente encarecimiento del costo de los proyectos viales [5]. Por otro lado, con respecto al uso de materiales alternativos, aún existen diversas inquietudes ligadas a la evaluación del desempeño técnico y ambiental en proyectos viales, las cuales no han sido respondidas de manera satisfactoria [6].

Diversos estudios han sido ejecutados en el mundo con el fin de evaluar las propiedades de las escorias para diferentes aplicaciones. En el presente estudio se realiza una revisión bibliográfica sobre el estado actual del conocimiento y se describen las diversas investigaciones que han sido ejecutadas sobre escorias (BFS y SS), con el fin de evaluar su uso potencial en la fabricación de mezclas asfálticas. De la bibliografía consultada no existe actualmente una revisión que profundice sobre el uso de escorias para producir mezclas asfálticas y, en ese sentido, el presente artículo hace un aporte. El objetivo principal del estudio es tomar las conclusiones del mismo como punto de

partida para la ejecución de un proyecto de investigación que se está realizando en la Universidad de Brasilia sobre el desarrollo de una mezcla asfáltica tibia reciclada bajo parámetros técnicos, económicos y medioambientales. Asimismo, la presente revisión bibliográfica sirve como punto de partida para que otros investigadores y grupos de investigación la consulten y tengan en cuenta en futuros estudios sobre el tema.

Riesgo toxicológico de uso de BFS y SS

La liberación de metales o elementos nocivos de las escorias puede causar problemas ambientales como la contaminación del agua y del suelo, y un riesgo toxicológico para los seres humanos a través de la inhalación de pequeñas partículas ($<10 \mu\text{m}$). Sin embargo, de acuerdo con [2] y [7], las escorias BFS y SS no deben considerarse como un residuo peligroso, ya que no superan la concentración de toxicidad especificada como peligrosa de acuerdo al criterio TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) [8]. En estos estudios se realizaron ensayos de lixiviación de metales pesados empleando las metodologías ICPAES (Inductively Coupled Plasma–Atomic Emission Spectrometer) y TCLP. Se concluyó que ambos materiales están dentro de los límites legales de emisiones contaminantes en Italia. En un estudio realizado por [9], se encontró que las SS no representan ninguna amenaza para los seres humanos, los animales o el medio ambiente. De acuerdo con [3], las carreteras construidas con SS, ya sea que se empleen como materiales granulares no tratados o ligados, no influyen en el medio ambiente por lixiviación. Por su parte [10], con base en un análisis químico y empleando un espectrofotómetro de absorción atómica de grafito para evaluar la toxicidad del metal lixiviado de SS, concluyen que los materiales estudiados pueden utilizarse de manera segura en la construcción de carreteras. De otro lado, Barišić *et al.* [11], realizaron ensayos para evaluar el efecto, sobre gusanos, de la composición química, el oxígeno disuelto, la radioactividad, los biomarcadores moleculares y los valores de pH del lixiviado de dos SS y concluyeron que no representan un riesgo para el medio ambiente cuando son usadas en proyectos de carreteras. Sin embargo, reportan que la cantidad de vanadio debe ser monitoreado en dichos proyectos. Según [12], la lixiviación de metales pesados en escorias es baja y no son caracterizados como materiales tóxicos (teniendo como base las especificaciones internacionales y griegas). Por su parte [13], basado en ensayos de lixiviación sobre SS confirma que los metales pesados de la SS no se pueden separar fácilmente, incluso en condiciones ácidas. En [14] fueron realizadas pruebas de lixiviación sobre cinco mezclas asfálticas fabricadas con agregado compuesto por 40 % de SS fabricadas en arco eléctrico. Ellos reportan que no puede considerarse insignificante la cantidad de lixiviado medido, sin embargo, resultó aceptable. Según [15], en proyectos de carreteras, las escorias pueden causar liberación de cromo y vanadio que son elementos tóxicos. Basados en ensayos de lixiviación, reportaron que la liberación de cromo es baja mientras que la de vanadio puede ser

importante. En [16] también reportaron que, en mezclas asfálticas compuestas por SS, la lixiviación de cromo es baja y no afecta al medio ambiente. Adicionalmente [17] y [18] concluyen que las escorias ayudan a incrementar el pH de aguas subterráneas. Asimismo, ayudan a aumentar el pH en los suelos [19]. Una conclusión similar con respecto al agua fue reportada por [20] en donde se menciona que el pH alto y el contenido de aluminio pueden lixiviar a niveles que pueden ser dañinos para la vida acuática. Sin embargo, estos últimos autores mencionan, que ninguna de las aplicaciones actuales de la escoria de la industria siderúrgica plantea un riesgo potencialmente significativo para la salud humana o una amenaza para las fuentes de agua potable de las aguas subterráneas.

1. ESCORIAS DE ALTO HORNO

1.1 Generalidades

Las escorias pueden ser clasificadas en tres categorías: las ferrosas, como las escorias de alto horno (BFS por sus siglas en inglés), las no ferrosas y las que se producen por incineración [4]. Las BFS se generan durante el proceso de obtención de hierro. Se forman cuando el mineral de hierro, coque y un fundente (ya sea de piedra caliza o dolomita) se funden juntos en un alto horno. Cuando el proceso de fundición metalúrgico se completa, la cal en el flujo se ha combinado químicamente con los aluminatos y silicatos de la ceniza de mineral y el coque, formando la escoria de alto horno [21, 22]. Las escorias al salir de los altos hornos son enfriadas lentamente al aire libre (ACBFS, Air-Cooled Blast Furnace Slag) o rápidamente aplicándoles chorros de agua fría (escorias expandidas) [23]. Las primeras son utilizadas principalmente en la construcción como agregado pétreo (concreto y materiales de relleno, entre otros), mientras las segundas son más utilizadas en la producción de cemento. Asimismo, las escorias expandidas, debido a su mayor porosidad y reducido peso en comparación con las ACBFS [24], son utilizadas en la fabricación de concretos y mampuestos ligeros. Las BFS contienen poco hierro ($FE < 2\%$) en comparación con las de acero (SS) [4].

De acuerdo con [2] y [25], la producción anual de BFS en Japón y Reino Unido es de 24,3 y 4,0 millones de toneladas, respectivamente. Según [2, 26, 27], por cada tonelada de hierro producido se genera una cantidad de BFS entre 220 y 370 kg, 340 y 421 kg y 260 y 300 kg, respectivamente. De acuerdo con [27], la producción de BFS representa casi el 30 % del calor residual liberado por las industrias manufactureras de hierro y acero. Hace tres décadas, más de 13 millones de toneladas de BFS eran producidas en EE. UU. [28].

El método convencional para eliminar escorias es transportándolas y depositándolas en escombreras. Lo anterior genera un problema ambiental, ya que ocupan

espacios dentro de los rellenos sanitarios y se desperdicia un material que puede ser reutilizado. Según [6], al utilizar BFS se podría i) reducir el uso de agregados pétreos naturales, evitando así, adicionalmente la liberación de contaminantes en el aire, el agua y el suelo durante el procesamiento de dichos materiales, ii) disminuir el consumo de energía durante el proceso de extracción de agregados naturales.

Las BFS han sido utilizadas ampliamente en el mundo desde hace más de un siglo. Algunos usos han sido: como fertilizantes [7], en la construcción de carreteras [29], en la recuperación de suelos y en la preparación de materiales tales como vidrio de cerámica, gel de sílice, ladrillos, entre otros [26]. Sin embargo, tal vez su mayor uso es en la producción de cemento [14, 26, 28, 30, 31], ya que este tipo de escoria [29]: i) contiene poco hierro, alto contenido de óxido de calcio y composición similar al *clinker*, ii) es un material que puede ser utilizado de forma segura junto con el *clinker* y el yeso, iii) debido al bajo contenido de hierro que contienen pueden ser usadas con seguridad en la producción de cemento, iv) ayudan a desarrollar en el cemento propiedades tales como bajo calor de hidratación, buena resistencia a largo plazo y a los ácidos, v) permiten hacer ahorros a las industrias del cemento. Adicional a lo anterior, [30] y [32] mencionan que las BFS exhiben propiedades cementantes. Con respecto al uso de BFS en proyectos de construcción, existen pocas preocupaciones ambientales, ya que los metales y componentes en dichas escorias están fuertemente adheridos a su matriz y no lixivian fácilmente.

1.2 Propiedades de las BFS y uso en mezclas asfálticas

En la tabla 1 se presenta la composición química típica de las BFS.

Tabla 1. Composición química de BFS en %.

Componente	[33]	[34]	[26]	[35]	[29]	[36]	[32]	[37]	[38]
Óxido de calcio (CaO)	36-45	40	37,4	43,3	46,98	36,44	40,35	20,83	40,37
Óxido de silicio (SiO ₂)	33-42	36,8	37,14	25,5	16,18	31,76	33,26	52,03	37,47
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	10-16	16	9,15	17	6,63	14,84	14,95	13,90	4,76
Fósforo (P)	-	-	-	2,3	-	-	-	-	-
Óxido de magnesio (MgO)	3-16	5,4	11,7	1,45	4,02	9,08	8,58	-	3,65
Óxido de sodio (Na ₂ O)	-	-	-	1,4	1,06	0,56	-	0,65	2,55
Azufre (S)	1-3	0,4	-	1,0	-	-	-	-	-
Óxido de hierro (FeO)	0.3-0.2	0,2	-	-	-	0,6	-	-	-
Hierro (Fe)	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-

Componente	[33]	[34]	[26]	[35]	[29]	[36]	[32]	[37]	[38]
Óxido de hierro III (Fe ₂ O ₃)	-	-	1,05	0,71	11	-	1,07	6,52	0,15
Óxido de manganeso (MnO)	0,2-1,5	0,5	-	-	2,62	0,5	-	2,26	-
Óxido de titanio (TiO ₂)	-	0,3	-	-	1,26	-	-	0,98	-
Óxido de potasio (K ₂ O)	-	0,4	-	0,14	0,51	-	-	0,86	0,62

Fuente: elaboración propia

Tal como se observa en la tabla 1, las BFS se componen principalmente de SiO₂, CaO y Al₂O₃. Mineralógicamente, las BFS se componen principalmente de cuarzo (SiO₂) y la cristobalita (fase cúbica de alta temperatura del sílice –SiO₂) [37]. El SiO₂ y el Al₂O₃ son compuestos puzolánicos los cuales, en tamaños de partículas muy finas, pueden desarrollar propiedades autocementantes (no necesitan ser activadas con agua o cal) [39]. Esta propiedad puzolánica puede incrementar la resistencia al daño por humedad de mezclas asfálticas [40]. Además, la presencia de un alto contenido de cuarzo en el BFS revela que este puede desarrollar una buena resistencia mecánica. Asimismo, el SiO₂ y el Al₂O₃ pueden mejorar la adhesión superficial asfalto–agregado [41]. De acuerdo con [41, 42], el CaO es una composición alcalina que contribuye a aumentar la adhesión entre el asfalto y el agregado, y mejora la resistencia de las mezclas al daño por humedad y al *stripping*. [42] reporta que el SiO₂ es un material de alta dureza y resistencia mecánica, y el Al₂O₃ puede mejorar la adherencia entre el agregado y el asfalto, incrementando la resistencia de las mezclas al ahuellamiento.

Con respecto a la utilización de BFS en la producción de mezclas asfálticas, muy pocos estudios han sido realizados en comparación con los otros usos reportados con anterioridad y con el empleo de SS. [24, 25, 37, 43] reportan que, al triturarse estos materiales, producen un agregado con una textura superficial rugosa de alta porosidad que resulta en buenas características adhesivas con ligantes asfálticos. Sin embargo, estas propiedades llevan a la necesidad de mayores cantidades de asfalto para producir una mezcla, generando un incremento en el costo [21, 25]. Adicionalmente, las BFS podrían precisar de mayores periodos de calentamiento en plantas de asfalto para secarlas [44]. A pesar de lo anterior, este mayor costo se podría compensar con el mayor rendimiento (volumen por masa) de BFS como agregado debido al menor peso unitario de la mezcla, ya que las BFS tienden a presentar menor densidad y gravedad específica en comparación con MGN [24, 37, 43]. En [37], utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB), se reportan que la porosidad promedio de una BFS osciló entre 9 % y 63 % mientras que un MGN fue del 7 %. Asimismo, el diámetro de las gargantas porales de la BFS fue mayor (entre 30,3 y 82,6 μm) comparado con las de la MGN (12 μm).

Algunas conclusiones obtenidas por la FHWA [21] son: i) debido a su forma angular y textura superficial rugosa, las BFS generan un alto ángulo de fricción (entre 40° y 45°, evaluadas a través de ensayos triaxiales [24]). Lo anterior ayuda a que, al ser usadas para conformar mezclas asfálticas en capas de rodadura, generen buena resistencia a la fricción neumático-pavimento. ii) Mezclas asfálticas fabricadas con BFS han demostrado buena resistencia al fenómeno del *stripping* y alta estabilidad. Incluso en algunos estudios se ha evidenciado buena resistencia a las deformaciones permanentes bajo carga cíclica [28]. Sin embargo, la resistencia al impacto y a la abrasión en algunos casos no es alta y el material puede descomponerse en condiciones de tráfico pesado [37]. Por lo anterior, estos materiales como agregados han sido más utilizados en la conformación de capas asfálticas de pavimentos con bajo tráfico. iii) La variabilidad en el proceso de producción de hierro puede dar lugar a heterogeneidad en las propiedades físicas (gradación, gravedad específica, absorción y angulosidad) y químicas (ver tabla 1). iv) Aunque la resistencia al desgaste por abrasión de las escorias de alto horno en la máquina de los ángeles no es particularmente favorable, el rendimiento de campo ha sido satisfactorio. Por tal razón, este ensayo ha sido eliminado de algunas especificaciones estándar para caracterizar escorias de alto horno. v) Tienen buena afinidad con el asfalto, lo que ayuda a desarrollar una buena adherencia. vi) Por ser un material poroso en comparación con agregados convencionales, puede ser necesario un tiempo de secado más largo en plantas de producción de mezclas asfálticas.

Con base en los resultados de desgaste en *Micro-Deval* y 10 % de finos, en [37] reportan que las BFS presentan una buena resistencia al desgaste por abrasión por fricción entre partículas y al fracturamiento bajo carga monotónica, respectivamente. Sin embargo, tal como se reporta en estudios anteriores, las BFS son materiales que experimentan baja resistencia al desgaste por abrasión por impacto en la máquina de los ángeles. Asimismo, reportan, que dicho material presenta partículas con formas ideales (redondeadas con caras angulares y fracturadas con muy poco contenido de partículas alargadas y aplanadas) para desarrollar un buen esqueleto granular que ayude en procesos de compactación de mezclas asfálticas, así como a resistir cargas estáticas, dinámicas o de impacto. Las partículas finas no presentan contenido de arcilla, materia orgánica o de polvo que genere disminución de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, y disminución de resistencia y durabilidad de la mezcla por exceso de finos o contaminantes.

En comparación con las SS, las BFS son volumétricamente más estables [25, 45]. Sin embargo, a largo plazo, estos materiales pueden tener problemas asociados a reacciones químicas con el agua (principalmente hidratación de partículas con propiedades puzolánicas presentes en las BFS que no han sido previamente activadas), ciclos de

congelamiento–secado que pueden producir transformaciones químicas, entre otros factores, que generen agrietamientos y alteraciones en las partículas [46].

2. ESCORIAS DE ACERO

2.1 Generalidades

Las escorias de acero se producen en hornos básicos de oxígeno (BOF) y en hornos de arco eléctrico (EAF). De acuerdo con [2, 47] se producen en una cantidad entre el 10 %–15 % y 15 %–20 % en peso de la producción de acero, respectivamente. La BOF se produce soplando oxígeno al hierro fundido, el cual es mezclado con flujos adicionales y chatarra de acero reciclado. El proceso refina el hierro mediante fusión con un fundente, tal como piedra caliza o dolomita, en condiciones oxidantes. Las impurezas del hierro, tales como el carbono y el silicio, se oxidan o se combinan químicamente con la escoria. La EAF se genera durante la producción de aceros más especializados [25] y por lo general presenta mayor cantidad de hierro y menor contenido de óxidos de magnesio y calcio libres que la escoria BOF [3, 48, 49]. Lo anterior las hace ser más densas y resistentes a la abrasión, a cargas monotónicas y por impacto, que las BOF. Adicionalmente, a diferencia del proceso BOF, en las EAF no se utiliza metal caliente [30].

La cantidad de SS de diferentes industrias siderúrgicas es de 150 a 200 kg/tonelada de acero producido [26]. La producción anual de SS en China es de cerca de 17 millones de toneladas [50]. Según [51], en China cerca de 100 millones de toneladas de SS se generan todos los años y la cantidad de almacenamiento acumulado ha superado los 1,2 billones de toneladas. La producción anual de acero y SS en 2010 en China fue de 626,7 millones de toneladas y 90 millones de toneladas, respectivamente, y la tasa de utilización de SS fue del 22 % [52]. Cincuenta millones de toneladas por año de SS se producen como subproducto en el mundo [53]. En Grecia, las tasas de producción anual de SS se han estimado en 1,6 millones de toneladas [49]. En Irán dicha tasa anual es de 3 millones [54]. En Letonia se producen anualmente entre 100 y 200 mil toneladas de SS [55]. En Brasil, alrededor de 3 millones de toneladas por año de SS son generadas por las fábricas de acero [56]. La industria de fabricación de acero en los Estados Unidos genera de 9 a 16 millones de toneladas de SS al año, de las cuales se utiliza como agregado pétreo en carreteras y en la construcción de pavimentos aproximadamente entre 50 % y 70 %, y en otras aplicaciones diversas aproximadamente 10 % a 15 % [57, 58]. En Alemania más del 90 % de las escorias son reutilizadas en proyectos viales [59]. En Europa se producen más de 12 millones de escorias al año [3]. En [11] reportan en Croacia, la existencia de vertederos con aproximadamente 1,5 millones de toneladas de SS.

Algunos usos de las SS identificados son: producción de concreto [5, 60, 61], cemento y la construcción de carreteras [49], en estabilización de suelos y empleo como materiales granulares no tratados en diferentes aplicaciones y en pavimentos (base, subbase, afirmados, entre otros) [62–64], como fertilizantes [3, 52], como material adsorbente en el tratamiento de aguas residuales urbanas y aguas residuales industriales [65], en la agricultura [52, 66, 67], en la estabilización de bancas para los ríos [3], y en la recuperación de acero residual (se estima en un 10 % [52]) y de metales [26]. En esta última aplicación, los contenidos de Mn, CaO y MgO presentes en el hierro recuperado o reciclado de las SS podrían mejorar el nuevo hierro o acero obtenido a partir de dicho reciclaje [68].

2.2 Propiedades de las SS y uso en mezclas asfálticas

En la tabla 2 se presenta la composición química típica de las SS.

Tabla 2. Composición química de SS

Componente	[69] EAF	[70] EAF	[58] BOF	[71]	[52] EAF	[52] BOF	[72] EAF	[57] EAF	[30] EAF	[30] BOF	[60] EAF
CaO [%]	0,4-52	25,58	39,4	50,5	30-50	45-60	33,2	37,78	35-60	30-55	27
SiO ₂ [%]	0,8-19	18,72	11,97	14,4	11-20	10-15	10,08	16,47	9-20	8-20	11
Al ₂ O ₃ [%]	1-14,07	2,75	2,16	1,35	10-18	1-5	1,66	5,76	2-9	1-6	5
P [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01-0,25	0,2-2	-
P ₂ O ₅ [%]	0,48-1,24	-	1	1,1	2-5	1-4	-	0,76	-	-	-
MgO [%]	0,4-10,2	7,50	1,69	4,5	8-13	3-13	13,09	4,81	5-15	5-15	5
Cromo (Cr) [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1-1	0,1-0,5	-
Na ₂ O [%]	-	0,29	0,25	-	-	-	0,02	0,06	-	-	-
FeO [%]	20,4-37,2	-	30,23	14,8	8-22	7-20	-	-	15-30	10-35	25
Fe [%]	15-30	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-
S [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,08-2	0,05-0,15	-
SO ₃ [%]	-	-	0,12	-	-	-	-	0,34	-	-	-
Fe ₂ O ₃ [%]	24,2-37,2	35,16	-	5,2	5-6	3-9	29,64	31,02	-	-	25
MnO [%]	1,07-15,58	0,304	2,74	-	5-10	2-6	6,18	-	3-8	2-8	4
Cr ₂ O ₃	0,78-4,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO ₂ [%]	0,35-0,6	1,595	0,4	0,5	-	-	-	-	-	0,4-2	-
K ₂ O [%]	-	0,13	0,05	-	-	-	0,06	0,02	-	-	-

P₂O₅: óxido de fósforo (III), Cr₂O₃: óxido de cromo (III), SO₃: óxido de azufre (VI).

Fuente: elaboración propia

En [59], basados en múltiples estudios consultados, se hacen reportes sobre nueve escorias BOF y once EAF, composición química similar a las reportadas en la tabla 2. Los resultados presentados en la tabla 2 son coherentes con los reportados por [30, 73] sobre cuatro tipos de SS estudiadas en Suecia y por [8, 50, 53, 74, 75]. Como se observa en la tabla 2, los principales componentes de las SS son CaO, Fe, SiO₂, MgO y MnO. Estos componentes le podrían atribuir a las SS alta dureza, resistencia a la abrasión, a cargas de impacto, monotonías y cíclicas. Adicionalmente, la alta magnitud de la relación CaO/SiO₂ de las SS genera una mejor adherencia entre el agregado y el asfalto [44, 56, 70, 76, 77]. La composición química y la microtextura rugosa de las SS permite que se formen fuertes entrecruzamientos de partículas [78, 79] y enlaces adherentes con el asfalto [49, 50, 80–82]. En [59], basados en las propiedades hidrófobas de una BOF y un pH cercano a 12, señalan que este material proporciona buena adhesión con el asfalto y ayudan a resistir fenómenos como el *stripping*. En [54], basados en imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido (SEM) de una escoria EAF, reportan que estos materiales pueden desarrollar una adhesión más fuerte con el asfalto en comparación con mezclas convencionales, principalmente por su porosidad. Una mayor adherencia de una escoria BOF con el asfalto, en comparación con basalto y granito, es también reportada por [83] basados en la composición mineralógica, química y en ensayos de tracción indirecta (empleando una máquina universal y analizando, como variables, dos espesores de película bituminosa, tres temperaturas de ensayo y tres tratamientos de humedad).

Según [84], no todas las SS son apropiadas para ser usadas como agregados en mezclas asfálticas. En especial aquellas ricas en CaO y MgO, tienden a expandirse en ambientes húmedos por hidratación de dichos componentes químicos cuando estos no han reaccionado con las estructuras de silicato [14, 24, 45, 53, 57, 58, 70, 75, 85–87]. Esta propiedad ha sido identificada por diversos investigadores y establecida como la principal limitación de uso de SS en la construcción de carreteras [3, 10, 54, 88]. Sin embargo, algunos investigadores han reportado que este problema de expansión se puede evitar sometiendo las SS a un largo período de intemperismo o envejecimiento natural [24, 56, 89] durante al menos un año antes de que se utilice como agregado secundario. Sin embargo, esta técnica puede ser penalizada por exponer al aire libre las SS al medio ambiente [90]. Con base en información proporcionada por un fabricante de escoria llamado Multiserv, [58], a manera de ejemplo, mencionan que el contenido típico de cal libre para una escoria BOF en estado inicial y envejecido durante mínimo un año de edad es de 14,5 % y 4,5 %, respectivamente. Es decir, sí existe una disminución en el contenido de cal libre cuando se envejecen este tipo de escorias. A pesar de lo anterior, en el mismo estudio concluyen que, en algunos casos, el envejecimiento de las escorias no necesariamente asegura su estabilidad volumétrica. Otra forma de evitar la expansión es recubriendo adecuadamen-

te las partículas con una suficiente película de asfalto que no permita que el agua entre en contacto con el agregado [25]. Este recubrimiento también es de alta importancia porque en presencia de agua, los óxidos (SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO y Al_2O_3) que componen las SS pueden reaccionar y separarse del agregado pétreo generando *stripping* [70]. En [91] mencionan que mezclar SS con Fayalita ayuda a inhibir la reacción de expansión. En [58] reportan que sustituir un 10 % de una escoria BOF por ceniza volante del tipo C puede suprimir su comportamiento expansivo.

Al igual que las BFS, las SS presentan propiedades cementantes [29, 51, 92] debido a la presencia de C3S, C2S y C4AF [93]. En la tabla 3 se presentan algunas propiedades físicas de las SS.

Tabla 3. Propiedades físicas de SS.

Ensayo	Unidad	Magnitud							
		[94]	[71]	[95]	[70]	[56]	[96]	[97]	[60]
Densidad	g/cm^3	-	-	3,3	-	3,92	-	-	-
Gravedad específica gruesos	-	-	3,02	-	3,01	-	-	3,25	3,35
Gravedad específica finos	-	-	3,17	-	3,06	-	-	3,15	3,7
Absorción	%	-	-	1,29	-	-	2,9-3,1	2,5-3,7	2,84-3,29
Caras fracturadas (dos caras)	%	-	-	-	97,6	-	-	100	-
Partículas alargadas y aplanadas	%	-	6,1	-	-	-	2-3	1	-
Equivalente de arena	%	-	-	-	-	83	-	86	-
Desgaste en la máquina de los ángeles	%	20-25	20	13,2	14,2	14-15	24	18,6	20
Valor de agregado fracturado	%	-	-	-	-	-	23	-	-
Resistencia a sulfato de sodio	%	<12	-	-	-	-	2,07	-	-
Ángulo de fricción interna	-	40°- 50°	-	-	-	-	-	-	-
Dureza (escala de Moh's)	-	6-7	-	-	-	-	-	-	-
CBR	%	>300	-	-	-	-	-	-	-
Stripping	%	-	-	-	-	-	>95 %	-	-

Fuente: elaboración propia

En [59], basados en seis estudios consultados, se reportan magnitudes de gravedad específica, CBR y desgaste en la máquina de los ángeles similares a las reportadas en la tabla 3. Con base en la tabla 3 se concluye que la densidad de las SS es mayor que la de MGN. Lo anterior es debido principalmente a que las SS contienen alto contenido de hierro [52, 58, 59, 73]. Esta propiedad podría aumentar el costo de transporte de la

SS como agregado y de las mezclas fabricadas con dichos materiales. Adicionalmente, son materiales de alta dureza, densidad, absorción y resistencia a la abrasión [5, 49, 50, 53, 55, 58, 69, 81, 85, 88, 94, 98–102], presentan superficie rugosa y buena forma de partículas en cuanto a angularidad y caras fracturadas [54, 74]. La mayor resistencia a la abrasión es fundamentada por el alto contenido de Fe_2O_3 y SiO_2 [70]. Debido a sus altos niveles de dureza y angularidad, mezclas fabricadas con SS han desarrollado mayor resistencia al deslizamiento (neumático–pavimento) en pruebas realizadas en laboratorio y a escala real sobre vías pavimentadas [1, 25, 47, 48, 80, 81, 85, 103]. Con base en ensayos realizados sobre tres agregados naturales producidos por diferentes canteras ubicadas en Brasil y un tipo de SS, en [104] se reporta que la SS es más resistente al desgaste por pulimento. De acuerdo con [97], la mayor dureza de las SS puede ser beneficiosa en países donde se utilizan neumáticos para reducir los accidentes relacionados con la nieve y el hielo en época de invierno. Según [73], las SS son difíciles de triturar y moler. En [52] reportan que el índice de molienda de las escorias de acero es menor (0,7) comparado con las escorias de alto horno (0,96) y arenas estándares (1,0). Lo anterior incide en el costo de uso de las SS.

En [105] se menciona que, a pesar de que las partículas de SS en forma de nido de abeja son poco frecuentes, cuando estas están presentes en una mezcla asfáltica generan aumento en el contenido de asfalto y disminución en la resistencia a la deformación permanente, al daño por humedad y al agrietamiento.

Las SS retienen el calor mucho más que los MGN [80, 85, 87, 106, 107]. Las características de retención de calor de las SS pueden ser ventajosas para trabajos de reparación de mezclas asfálticas en caliente durante condición de clima frío [53, 108]. Adicionalmente, desarrollan mayor conductividad eléctrica. En [53] realizaron ensayos sobre una mezcla de concreto asfáltico donde se sustituyó la fracción gruesa de un material calcáreo por SS (se emplearon como ligantes cemento asfáltico tipo AC–5 y AC–10). Los autores concluyen que las mezclas fabricadas con SS permiten su uso en la construcción de pavimentos termoeléctricos (pavimentos con materiales eléctricamente conductivos usados para aumentar el calor del mismo cuando se requiera) para el deshielo de garajes, aceras, calzadas, puentes de carreteras y pistas de aterrizaje.

Al igual que las BFS, las SS presentan generalmente mayor porosidad y rugosidad superficial que MGN [76]. Debido a esto, al igual que las mezclas fabricadas con BFS, aquellas fabricadas con SS consumen mayor cantidad de asfalto, pudiendo incrementar el costo de las mismas [80, 101] y retienen más el agua durante los procesos de calentamiento y secado en las plantas de asfalto [44]. Sin embargo, algunos autores han reportado una disminución en la cantidad de asfalto como producto de la mayor gravedad específica de la escoria [109], y de que, en algunos casos y en algunos lugares,

los MGN presentan mayor angularidad y absorción que las escorias de acero. En un estudio realizado por [94, 97], por ejemplo, la absorción de la fracción gruesa de la SS y el MGN de origen basáltico era de 2,5 % y 2,0 %, mientras que la fracción fina de 3.7 y 5.2%, respectivamente.

Generalmente, el uso de SS en mezclas asfálticas debe limitarse a la sustitución parcial del agregado natural debido a que las mezclas con sustitución total son susceptibles a experimentar problemas asociados con el aumento del volumen de vacíos (V_a) y disminución de los vacíos en agregados minerales (V_{AM}). Lo anterior debido principalmente a su forma angular, porosidad y mayor textura superficial en comparación con MGN [10, 53, 101]. En [98] realizaron ensayos sobre una mezcla asfáltica en la cual sustituyeron el 100 % de un agregado calcáreo por SS. Los resultados concluyen que usar 100 % de sustitución no trae beneficios en algunas propiedades como la deformación permanente en clima de alta temperatura y resistencia a fatiga. En [100] reportan, que al sustituir completamente el MGN por una SS tipo BOF, los vacíos entre los agregados pétreos (V_{AM}) disminuyen notablemente, generando un muy delgado recubrimiento de las partículas. En [10] hallaron una mayor resistencia a la deformación de mezclas fabricadas con SS en comparación con la mezcla de control, excepto para la sustitución del agregado grueso de origen calcáreo al 100 % (ellos plantean que con el 100% de sustitución se necesita mayor cantidad de asfalto). Adicionalmente, mencionan que el porcentaje óptimo de reemplazo fue de 25 %.

Generalmente, el uso de SS como agregado en mezclas asfálticas, incrementa la estabilidad Marshall, la relación estabilidad/flujo y disminuye el flujo [1, 53, 54, 76, 101, 110]. En [8, 74], reportan que mezclas fabricadas con SS desarrollan mayor resistencia en el ensayo de tracción indirecta que mezclas fabricadas con agregados convencionales. En [53, 56, 89, 97] encontraron que la adición de SS en el concreto asfáltico mejora la resistencia a la deformación permanente de las mezclas. Una conclusión similar fue reportada por [76] para el caso de una mezcla tibia (WMA). De acuerdo con [1, 101], el módulo resiliente de mezclas asfálticas incrementa cuando se sustituyen MGN por SS. En [1] realizaron un estudio sustituyendo un agregado calcáreo por dos SS tipo EAF en 0 %, 30 %, 60 % y 90 % (con respecto a la masa total del agregado). La sustitución incluía partículas gruesas y finas del agregado. Se encontró que todas las mezclas de escoria exhibían una mejor resistencia a la deformación permanente que la mezcla de control bajo cargas axiales repetidas. En [1, 56], basados en ensayos RLAT (Repeated Load Axial Test) concluyen que las mezclas con SS tienen poca probabilidad de desarrollar deformaciones permanentes excesivas. En [88], basados en ensayos realizados sobre mezclas asfálticas recicladas en frío, concluyeron que al reemplazar entre el 10 % y el 20 % del peso de un MGN, la resistencia a fatiga evaluada en un ensayo de tensión

indirecta incrementa. Una conclusión similar fue reportada por [53] cuando se sustituyó, en una mezcla de concreto asfáltico, el 100 % de la fracción gruesa de un MGN calcáreo por SS, y por [10] cuando sustituyeron también dicha fracción de un material calcáreo en 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. En [98] concluyeron que mezclas fabricadas con un asfalto modificado con SBS (estireno–butadieno–estireno) y empleando SS como sustituto de la fracción gruesa de un material calcáreo, desarrollan una vida de fatiga elevada y una alta resistencia a la deformación permanente. En [54], basados en ensayos de fatiga realizados mediante tres metodologías distintas, confirman que las mezclas que contienen escoria tipo EAF, tienen una vida a fatiga mayor que las mezclas de control que emplean MGN calcáreo. Según los autores, dicho aumento en la resistencia a fatiga es causado por la alta angularidad de la escoria (aumentando el ángulo de fricción interno de la mezcla y mejorando el entrelazamiento entre las diferentes partículas constituyentes), el mejoramiento en la adherencia entre el asfalto y la SS, y el incremento en la resistencia al envejecimiento que se desarrolla. Lo anterior también pudo ser debido a un mejor recubrimiento de los agregados producto de un mayor contenido de asfalto y VMA reportado en el diseño de las mezclas cuando se sustituyó el agregado natural por la EAF. Otros investigadores que han reportado un incremento en la resistencia a fatiga cuando se sustituye MGN por SS son [56].

En un estudio realizado por [47], se emplearon técnicas de difracción de rayos X (DRX), SEM y porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) para evaluar el uso de SS como agregado en una mezcla tipo SMA (Stone Mastic Asphalt). Los resultados indicaron que la sustitución de basalto por SS aumentó la resistencia de la SMA a altas temperaturas de servicio (mayor resistencia a las deformaciones permanentes) y al agrietamiento a bajas temperaturas.

De acuerdo con [1, 10, 53, 70, 76, 77, 88], la resistencia al daño por humedad incrementa en mezclas asfálticas cuando se emplean SS como parte del agregado pétreo. En [50], realizaron un estudio para evaluar el efecto de una SS tipo BOF cuando sustituye agregados gruesos de origen basáltico y calcáreo sobre la susceptibilidad al daño por humedad de una mezcla tipo SMA. Los autores reportaron que la SS no tiene un efecto significativo sobre el daño por humedad.

En [94, 97] utilizaron cuatro porcentajes (0 %, 20 %, 40 % y 60 %) de SS para sustituir un agregado basáltico, y los diseños de mezcla para HMA se realizaron con base en la metodología Superpave. Los resultados indican que la adición de SS incrementa la fricción neumático–pavimento, el módulo dinámico, la resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas y la resistencia a la deformación permanente. Además, la inclusión de SS tuvo poco efecto sobre la resistencia al agrietamiento TDC (Top–Down–Cracking) y sobre la susceptibilidad al daño por humedad.

En [107] compararon los resultados de analizar el comportamiento de una vía construida con capa asfáltica con MGN y otra construida con una escoria BOF. Se realizaron ensayos Marshall, resistencia a la tracción indirecta, módulo elástico y ensayos *in situ* para medir la resistencia al deslizamiento. El comportamiento de ambas mezclas, luego de medio año de servicio, fue igual. Sin embargo, después de dos años de servicio, el comportamiento de la capa asfáltica fabricada con SS fue mucho mejor que la convencional con MGN.

Li *et al.* [111] emplearon tres tipos de SS como *filler* para evaluar la respuesta reológica que experimentaban los *mastic* fabricados a partir dichos materiales. Como conclusión general del estudio, se reportó que los *mastic* con SS presentaron propiedades reológicas sobresalientes a altas y bajas temperaturas de servicio (mayor resistencia a las deformaciones permanentes y agrietamiento, respectivamente) cuando fueron comparados con un *mastic* fabricado a partir de un *filler* de origen calcáreo. Una conclusión similar fue reportada por Topini *et al.* [112] empleando una SS tipo EAF.

3. CONCLUSIONES

Con base en la revisión bibliográfica reportada y descrita en el presente estudio se puede concluir, desde el punto de vista técnico y ambiental, que: i) las escorias BFS y SS son materiales con un amplio potencial para ser empleados como sustitutos de agregados pétreos naturales en la fabricación de mezclas asfálticas. Incluso actualmente diversos países en el mundo las emplean para tal fin. En la mayoría de los estudios, ambas escorias cumplieron los requisitos mínimos de calidad exigidos por cada especificación particular empleada, y presentaron propiedades deseables en proyectos viales como son partículas predominantemente redondeadas con caras angulares, fracturadas y escaso contenido de partículas alargadas y aplanadas (indicadores de un esqueleto granular más compacto y menos deformable bajo carga mecánica), un equivalente de arena alto (indicador de un material que no tendrá exceso de finos), las partículas finas no presentaban contenido de arcilla o materia orgánica (estos dos materiales tienden a disminuir la respuesta mecánica de materiales granulares en proyectos viales), y en el caso de las SS alta resistencia al desgaste por abrasión. ii) En términos generales no se reportan riesgos ambientales o toxicológicos por usar BFS o SS. Sin embargo, en cada proyecto vial o uso particular se debe monitorear la concentración de algunos elementos que pueden ser nocivos para los seres humanos como son el vanadio, el cromo y el aluminio. iii) A pesar del amplio conocimiento que se tiene sobre sus propiedades y de las múltiples investigaciones realizadas, son materiales altamente heterogéneos en cuanto a formas y tamaños de partículas, composición química y mineralógica, textura, gravedad específica, resistencia al desgaste y porosidad, entre otros, los cuales deben seguirse estudiando. Por tal motivo, algunas propiedades evaluadas en los estudios consultados reportaron respuestas distintas y en algunos casos contradictorias. iv) El

uso de BFS y SS podría ayudar a reducir el empleo de agregados pétreos naturales y disminuir el consumo de energía durante el proceso de extracción de dichos agregados. v) El principal componente químico que presentan ambas escorias es el CaO, el cual puede aumentar la adhesión asfalto–agregado y mejorar la resistencia al daño por humedad. En algunas ocasiones ambas escorias presentan altos contenidos de Al_2O_3 , el cual también es un óxido que contribuye a mejorar las propiedades mencionadas anteriormente y puede incrementar la resistencia de las mezclas al ahuellamiento. El contenido de SiO_2 reportado en ambas escorias y de hierro en las SS puede ayudar a aumentar la cohesión y la resistencia mecánica de la mezcla (debido a que son materiales de alta dureza). Sin embargo, si el contenido de SiO_2 es alto o se presenta una baja relación CaO/SiO_2 , la adherencia agregado–asfalto podría verse reducida. vi) La principal limitación de uso de las BFS en proyecto viales es su baja resistencia a la abrasión, mientras que en el caso de las SS es su potencial de expansión. Asimismo, otra desventaja reportada es que, debido a su mayor porosidad y rugosidad superficial en comparación con agregados naturales, las mezclas que emplean BFS o SS tienden a necesitar mayor cantidad de asfalto. Esta es una de las principales razones por las cuales, en los estudios, generalmente, no se recomienda sustituir totalmente los agregados naturales por escorias BFS o SS. Investigaciones futuras se deben encaminar a la superación de estas limitaciones. vii) Las SS tienden a desarrollar propiedades termo–eléctricas (retienen el calor mucho más que los agregados naturales y desarrollan mayor conductividad eléctrica) y cementantes.

A continuación, se reportan algunas líneas de investigación en las cuales se debe profundizar aún más en el área de mezclas asfálticas:

- Muy pocos estudios han sido ejecutados para evaluar la relación costo–beneficio desde el punto de vista técnico y ambiental y que tengan en cuenta, adicionalmente, las condiciones propias de cada país donde se utilicen estos materiales.
- Por lo general, los estudios que se han realizado han sustituido el agregado pétreo natural por escorias en diversos porcentajes. Sin embargo, se debe evaluar con mayor detalle el efecto de los tamaños de partículas que se están sustituyendo. Asimismo, evaluar con mayor claridad el efecto de la granulometría, la forma, textura, porosidad y la gravedad específica de las partículas. Esta última propiedad es importante porque controla en gran medida la composición gravimétrica y volumétrica de la mezcla.
- Por lo general, los estudios consultados evalúan por separado el empleo de BFS y SS como materiales para fabricar mezclas asfálticas. Se deben realizar mayores investigaciones donde se analice el empleo de ambos materiales en distintas fracciones del agregado pétreo.

- Gran parte del comportamiento que experimenta una mezcla asfáltica está asociado a la respuesta que desarrolla el *mastic* (*filler* y asfalto) que la compone. Sin embargo, muy pocos estudios se han ejecutado con el fin de evaluar la respuesta reológica y mecánica del *mastic* fabricado a partir de BSF o SS.
- Muy pocos estudios han evaluado la interacción asfalto–escoria. El asfalto, al entrar en contacto con la escoria, reacciona de manera diferente a como lo hace con agregados pétreos naturales y muy pocos estudios se han ejecutado en este sentido.
- Ningún estudio consultado se ejecutó para determinar las temperaturas de mezcla y compactación adecuadas en el laboratorio e *in situ*. Por ser las BFS y SS materiales con composición química y mineralógica diferentes a agregados naturales, y de alta porosidad y absorción, dichas temperaturas podrían ser diferentes a las utilizadas con MGN. Asimismo, se deben correlacionar estas temperaturas con el tipo de compactación (por ejemplo, impacto–Marshall, compactación giratoria–Superpave) y con los tiempos de secado de BFS y SS en plantas de asfalto.
- Se deben explorar más metodologías y procedimientos para el control de la expansión de las escorias SS. Adicionalmente, se deben realizar más investigaciones para evaluar el impacto ambiental derivado de exponer las SS a prolongados periodos de intemperismo con el fin de disminuir su expansividad, que es el método más utilizado actualmente para controlar dicha limitación en las escorias.
- En comparación con las SS, muy pocos estudios han evaluado el efecto de la composición química de las BFS sobre las propiedades reológicas y mecánicas de mezclas asfálticas que emplean este material como agregado.
- Se deben hacer mayores estudios para evaluar a largo plazo las propiedades de estos materiales y cómo inciden en mezclas asfálticas.

REFERENCIAS

- [1] M. Pasetto y N. Baldo, “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, N.º 1–3, pp. 938–948. 2010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.104.
- [2] D.M. Proctor, K.A. Fehling, E.C. Shay, J.L. Wittenborn, J.J. Green, C. Avent, R.D. Bigham, M. Connolly, B. Lee, T.O. y Shepker, M.A. Zak, “Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags,” *Environmental Science and Technology*, vol. 34, N.º 8, pp. 1576–1582. 2000. DOI: 10.1021/es9906002.
- [3] H. Motz y J. Geiseler, “Products of steel slags an opportunity to save natural resources,” *Waste Management*, vol. 21, pp. 285–293. 2001. DOI: 10.1016/S0956–053X(00)00102–1.

- [4] H. Shen y E. Forssberg, “An overview of recovery of metals from slags,” *Waste Management*, vol. 23, pp. 933–949. 2003. DOI: 10.1016/S0956–053X(02)00164–2.
- [5] M. Maslehuddin, A.M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim y M.S. Barry, “Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes,” *Construction and Building Materials*, vol. 17, N.º 2, pp. 105–112. 2003. DOI: 10.1016/S0950–0618(02)00095–8.
- [6] S. Nouvion, A. Jullien, M. Sommier y V. Basuyau, “Environmental modeling of blast furnace slag aggregate production,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 10, N.º 4, pp. 715–745. 2009.
- [7] J. Geiseler, “Use of steelworks slag in Europe,” *Waste Management*, vol. 16, N.º 1–3, pp. 59–63. 1996. DOI: 10.1016/S0956–053X(96)00070–0.
- [8] M. Pasetto y N. Baldo, “Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, N.º 8, pp. 3458–3468. 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.037.
- [9] L. Wintenborn y J. Green, “Steelmaking slag: a safe and valuable product,” *National Slag Association*. 1998.
- [10] I.M. Asi, H.Y. Qasrawi y F.I. Shalabi, “Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, pp. 902–911. 2007. DOI: 10.1139/L07–025.
- [11] I. Barišić, I.N. Grubeša y B.H. Kutuzović. “Multidisciplinary approach to the environmental impact of steel slag reused in road construction,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 18, pp. 1–16. 2016. DOI: 10.1080/14680629.2016.1197143.
- [12] A. Prapidis y G. Doulis, “Use of slag in skid resistant asphalt mixes based on mechanical and environmental criteria,” Presentado en Proc. 5th International Exhibition & Conference on Environmental Technology, Athens, Greece. 2005.
- [13] A.M. Fällman, “Leaching of chromium and barium from steel slag in laboratory and field tests—a solubility controlled process?,” *Waste Management*, vol. 20, N.º 2, pp. 149–154. 2000. DOI: 10.1016/S0956–053X(99)00313–X.
- [14] S. Sorlini, A. Sanzeni y L. Rondi, “Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 209–210, pp. 84–91. 2012. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.12.066.
- [15] P. Chaurand, J. Rose, V. Briois, L. Olivi, J.–L. Hazemann, O. Proux, J. Domas y J.–Y. Bottero, “Environmental impacts of steel slag reused in road construction: a crystallographic and molecular (XANES) approach,” *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 139, N.º 3, pp. 537–542. 2007. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.060.
- [16] R. Milačič, T. Zuliani, T. Oblak, A. Mladenovič, A. and J.Š. Ančar, (2011). “Environmental impacts of asphalt mixes with electric arc furnace steel slag,” *Journal of Environmental Quality*, vol. 40, N.º 4, pp. 1153–1161. DOI: 10.2134/jeq2010.0516.
- [17] J. Yan, C. Bäverman, L. Moreno y I. Neretnieks, “Evaluation of the time–dependent neutralising behaviours of MSWI bottom ash and steel slag,” *Science of the Total Environment*, vol. 216, N.º 1–2, pp. 41–54, 1998. DOI: 10.1016/S0048–9697(98)00133–8.

- [18] G. S. Roadcap, W. R. Kelly y C. M. Bethke, "Geochemistry of extremely alkaline (pH > 12) ground water in slag – fill aquifers," *Ground Water*, vol. 43, N.º 6, pp. 806–816, 2005. DOI: 10.1111/j.1745–6584.2005.00060.x.
- [19] H. Seron Pereira, A.J. Manzi Gama, M. Sartori de Camargo y G.H. Korndorfer, "Reatividade de escórias silicatadas da indústria siderúrgica," *Ciênc. Agrotec., lavras*, vol. 34, N.º 2, pp. 382–390, 2010.
- [20] D.M. Proctor, E.C. Shay, K.A. Fehling y B.L. Finley, "Assessment of human health and ecological risks posed by the uses of steel–industry slags in the environment," *Human and Ecological Risk Assessment*, vol. 8, N.º 4, pp. 681–711, 2002.
- [21] FHWA – Federal Highway Administration Research and Technology. Coordinating, Developing, and Delivering Highway Transportation Innovations, *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*, Report Publication Number: FHWA–RD–97–148, 2008.
- [22] J.L. Marriaga y P. Claisse, "The influence of the blast furnace slag replacement on chloride penetration in concrete". *Ingeniería e Investigación*, vol. 31, N.º 2, pp. 38–47, 2011.
- [23] NSA, National Slag Association, [En línea], acceso abril de 2016, Disponible: <http://nationalslag.org/blast-furnace-slag>
- [24] H.G. Van Oss, *Slag–Iron and Steel*, U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, Servicio Geológico de los Estados: USGS, 2003.
- [25] G.D. Airey, A.C. Collop y N.H. Thom, "Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates," Presentado en 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), 2004.
- [26] B. Das, S. Prakash, P.S.R. Reddy y V.N. Misra. "An overview of utilization of slag and sludge from steel industries," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50, pp. 40–57, 2007. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.05.008.
- [27] A. Jamshidi, K. Kurumisawa, T. Nawa, M. Jize y G. White, "Performance of pavements incorporating industrial byproducts: a state–of–the–art study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 367–388, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.223.
- [28] R. Dippenaar. "Industrial uses of slag (the use and re–use of iron and steelmaking slags)," *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 32, N.º 1, pp. 35–36, 2005.
- [29] L.J.M. Houben, S. Akbarnejad y A.A.A. Molenaar, "Performance of pavements with blast furnace base courses," Presentado en GeoShanghai 2010 –International Conference, Paving Materials and Pavement Analysis, Geotechnical Special Publication N.º 203 (pp. 476–483), China, 2010.
- [30] C. Shi, "Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, N.º 3, pp. 230–236, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0899–1561(2004)16:3(230).
- [31] S.I. Abu–Eishah, A.S. El–Dieb y M.S. Bedir, "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf

- region,” *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp.249–256, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.012.
- [32] X. Guo y H. Shi, “Utilization of steel slag powder as a combined admixture with ground granulated blast–furnace slag in cement based materials,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 25, N.º 12, pp. 1990–1993, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0000760.
- [33] J.J. Emery, “Slag Utilization in Pavement Construction,” Presentado en Extending aggregate resources: a symposium sponsored by ASTM Committee D–4 on Road and Paving Materials, EE. UU., 1982. DOI: 10.1520/STP32459S.
- [34] D.E. Jones, “Application of steel plant by–products to roadworks,” Presentado en Proceedings —Conference of the Australian Road Research Board, v 11, 11th ARRB Conference, 1982.
- [35] N.A. León, N.R. Rojas, B.U. Suárez y O. Bustamante, “Experimental evaluation of silicon – calcareous units from blast furnace slag and hydraulic lime for masonry”. *Dyna*, vol. 76, N.º 160, pp. 247–254, 2009.
- [36] Q. Wang, P. Yan y G. Mi, “Effect of blended steel slag–GBFS mineral admixture on hydration and strength of cement,” *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 8–14, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.085.
- [37] H.A. Rondón, J.C., Ruge, D., Patiño, H. Vacca, F.A. Reyes y M. Farias, “Use of blast furnace slag as a substitute for the fine fraction of aggregates in an asphalt mixture,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, N.º 10, 04018244, 2018. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0002409
- [38] A. Al–Hdabi y H. Al Nageim, “Improving asphalt emulsion mixtures properties containing cementitious filler by adding GGBS,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, N.º 5, 04016297–1, 2016. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0001859.
- [39] A. Misra, D. Biswas y S. Upadhyaya, “Physico–mechanical behavior of self–cementing class C fly ash–clay mixtures,” *Fuel*, vol. 84, N.º 11, pp. 1410–1422, 2005. DOI: 10.1016/j.fuel.2004.10.018.
- [40] A.I. Nassar, M.K. Mohammedb, N. Thom y T. Parry, “Mechanical, durability and microstructure properties of Cold Asphalt Emulsion Mixtures with different types of filler,” *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 352–363, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.112.
- [41] A. Modarres y M. Rahmanzadeh, “Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt,” *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 476–483. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.002.
- [42] R. Muniandy, E. Aburkaba y L. Mahdi, “Effect of mineral filler type and particle size on asphalt–filler mastic and stone mastic asphalt laboratory measured properties,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 7, N.º 11, pp. 475–787, 2013.
- [43] T. Ozbakkaloglu, L. Gu y A.F. Pour, “Normal and high–strength concretes incorporating air–cooled blast furnace slag coarse aggregates: Effect of slag size and content on the behavior,” *Construction and Building Materials*, vol. 126, pp. 138–146, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.015.

- [44] J. Xie, S. Wu, J. Lin, J. Cai, Z. Chen y W. Wei, "Recycling of basic oxygen furnace slag in asphalt mixture: Material characterization and moisture damage investigation," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 467–474, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.023.
- [45] G. Wang, Y. Wang y Z. Gao, "Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, N.º 1–3, pp. 555–560, 2010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.071.
- [46] S. Akbarnejad, L.J.M. Houben y A.A.A. Molenaar, "Application of aging methods to evaluate the long-term performance of road bases containing blast furnace slag materials," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, N.º 3, pp. 488–506, 2014. DOI: 10.1080/14680629.2014.907196.
- [47] S. Wu, Y. Xue, Q. Ye y Y. Chen, "Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures," *Building and Environment*, vol. 42, N.º 7, pp. 2580–2585, 2007. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.008.
- [48] A.M. Dunster, "The use of blastfurnace slag and steel slag as aggregates," Presentado en 4th European symposium on performance of bituminous and hydraulic materials in pavements, Nottingham, 11–12 april of 2002. pp. 257–260.
- [49] F. Kehagia, "Skid resistance performance of asphalt wearing courses with electric arc furnace slag aggregates," *Waste Management and Research*, vol. 27, N.º 3, pp. 288–294, 2009. DOI: 10.1177/0734242X08092025.
- [50] Y. Xue, S. Wu, H. Hou y J. Zha, "Experimental investigation of basic oxygen furnace slag used as aggregate in asphalt mixture," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 138, N.º 2, pp. 261–268, 2006. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.02.073.
- [51] J. Zhao, D. Wang, P. Yan, D. Zhang y H. Wang, "Self-cementitious property of steel slag powder blended with gypsum," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 835–842, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.102.
- [52] H. Yi, G. Xu, H. Cheng, J. Wang, Y. Wan y H. Chen, "An overview of utilization of steel slag," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 16, pp. 791–801, 2012. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.10.108.
- [53] P. Ahmedzade y B. Sengoz, "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 165, pp. 300–305, 2009. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.105.
- [54] A. Kavussi y M.J. Qazizadeh, "Fatigue characterization of asphalt mixes containing electric arc furnace (EAF) steel slag subjected to long term aging," *Construction and Building Materials*, vol. 72, pp. 158–166, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.052.
- [55] V. Haritonovs, M. Zaumanis, G. Brencis y J. Smirnovs, "Use of unconventional aggregates in hot mix asphalt concrete," *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 9, N.º 4, pp. 276–282, 2014. DOI: 10.3846/bjrbe.2014.34.
- [56] M. De Oliveira Polese, G. Lopes Carreiro, M. Gomes da Silva y M. Ribas Silva, "Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria," *Revista Matéria*, vol. 11, N.º 4, pp. 444–454, 2006.

- [57] I.Z. Yildirim y M. Prezzi, “Geotechnical properties of fresh and aged basic oxygen furnace steel slag,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, N.º 12, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943–5533.0001310.
- [58] M. Pasetto y N. Baldo, “Laboratory investigation on foamed bitumen bound mixtures made with steel slag, foundry sand, bottom ash and reclaimed asphalt pavement,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 13, N.º 4, pp. 691–712, 2012. DOI: 10.1080/14680629.2012.742629.
- [59] M.M.A. Aziz, M.R. Hainin, H. Yaacob, Z. Ali, F.L. Chang y A.M. Adnan, “Characterization and utilization of steel slag for the construction of roads and highways,” *Materials Research Innovations*, vol. 18, S6, pp. 255–259, 2014. DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000967.
- [60] J.M. Manso, J.J. González y J.A. Polanco, “Electric arc furnace slag in concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, N.º 6, pp. 639–645, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0899–1561(2004)16:6(639).
- [61] H. Qasrawi, “The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the Environment,” *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 298–304, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.063.
- [62] S. Pamukcu y A. Tuncan, “Laboratory characterization of cementstabilized iron–rich slag for reuse in transportation facilities,” *Transportation Research Record*, N.º 1424, pp. 25–33, 1993.
- [63] J.M. Manso, V. Ortega, J.A. Polanco y J. Setién, “The use of ladle furnace slag in soil stabilization,” *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 126–34. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.079.
- [64] S. Aiban, “Utilization of steel slag aggregate for road bases,” *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 34, N.º 1, pp. 1–11, 2006. DOI: 10.1520/JTE12683.
- [65] S. Hosseini, S.M. Soltani, P.S. Fennell, T.S.Y. Choong y M.K. Aroua, “Production and applications of electric–arc–furnace slag as solid waste in environmental technologies: a review,” *Environmental Technology Reviews*, vol. 5, N.º 1, pp. 1–11, 2016. DOI: 10.1080/21622515.2016.1147615.
- [66] R.M. Prado, W. Natale, F.M. Fernandes y M.C.M. Corrêa, “Reatividade de uma escória de siderurgia em um latossolo vermelho distrófico,” *R. Bras. Ci. Solo*, vol. 28, pp. 197–205, 2004.
- [67] M.F. Sobral, C.W.A. do Nascimento, K.P.V. da Cunha, H.A. Ferreira, A.J. Silva y F.B.V. Silva, “Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana–de–açúcar,” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, N.º 8, pp.867–872, 2011.
- [68] S. Radosavljevic, D. Milic and M. Gavrilovski, “Mineral processing of a converter slag and its use in iron ore sintering,” *Magnetic and Electrical Separation*, vol. 7, N.º 4, pp. 201–211, 1996. DOI: 10.1155/1996/31471.
- [69] M. Sumayya, M. Romeela y K. Prakash, “Characterization of electric arc furnace slags as concrete aggregate in a small island developing state: A preliminary study,” *Construction and Building Materials*, vol. 105, pp. 459–464, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.169.

- [70] S. Hesami, M. Ameri, H. Goli y A. Akbari, "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 16, N.º 8, pp. 745–759, 2015. DOI: 10.1080/10298436.2014.953502.
- [71] M. Arabani y A.R. Azarhoosh, "The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures," *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 1–7, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036.
- [72] T. Sofilić, A. Mladenović y U. Sofilić, "Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 19, N.º 2, pp. 148–157, 2011. DOI: 10.3846/16486897.2011.580910.
- [73] M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom y B. Bjorkman, "Characteristics of steel slag under different cooling conditions," *Waste Management*, vol. 27, pp. 1335–1344, 2007. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.08.002.
- [74] B.V. Kök y N. Kuloğlu, "Effects of steel slag usage as aggregate on indirect tensile and creep modulus of hot mix asphalt," *Gazi University Journal of Science*, vol. 21, N.º 3, pp. 97–103, 2008.
- [75] G. Wang, "Determination of the expansion force of coarse steel slag aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1961–1966, 2010. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.004.
- [76] M. Ameri, S. Hesami y H. Goli, "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 611–617, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034.
- [77] J. Xie, J. Chen, S. Wu, J. Lin y W. Wei, "Performance characteristics of asphalt mixture with basic oxygen furnace slag," *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 796–803, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.056.
- [78] G.H. Shafabakhsh y O.J. Ani, "Experimental investigation of effect of nano TiO₂/SiO₂ modified bitumen on the rutting and fatigue performance of asphalt mixtures containing steel slag aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 692–702, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.083.
- [79] G.H. Shafabakhsh, O.J. Ani y M. Talebsafa, "Artificial neural network modeling (ANN) for predicting rutting performance of nano-modified hot-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 85, pp. 136–143, 2015a. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.060.
- [80] L. Hunt y G. Boyle, "Steel slag in hot mix asphalt concrete," Final Report, State Research Project #511, Oregon Department of Transportation, 2000.
- [81] D.H. Shen, C.M. Wu y J.C. Du, "Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 453–461, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001.
- [82] Y. Xue, H. Hou, S. Zhu y J. Zha, "Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: pavement performance and environmental impact," *Construction and Building Materials*, vol. 23, N.º 2, pp.989–96, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.009.

- [83] J. Xie, Z. Chen, L. Pang y S. Wu, "Implementation of modified pull-off test by UTM to investigate bonding characteristics of bitumen and basic oxygen furnace slag (BOF)," *Construction and Building Materials*, vol. 57, pp. 61–68, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.083.
- [84] JEGEL. "Steel slag aggregates use in hot mix asphalt concrete," Final report prepared for the steelmaking slag Technical Committee, Toronto, John Emery Geotechnical Engineering Limited (JEGEL), 1993.
- [85] J. Emery, "Steel slag utilization in asphalt mixes," National Slag Association MF 186–1. Canadian Technical Asphalt Association Proceedings, 1986, 11 p.
- [86] W.T. Kuo y C.Y. Shu. "Application of high-temperature rapid catalytic technology to forecast the Volumetric stability behavior of containing steel slag mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 50, pp. 463–470, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.030.
- [87] Q. Li, H. Ding, A. Rahman y D. He, "Evaluation of Basic Oxygen Furnace (BOF) material into slag-based asphalt concrete to be used in railway substructure". *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 593–601, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.085.
- [88] M. Ameri y B. Behnood, "Laboratory studies to investigate the properties of CIR Mixes containing steel slag as a substitute for virgin aggregates," *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 26, N.º 1, pp. 475–480, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.047.
- [89] Z. Chen, S. Wu, J. Wen, M. Zhao, M. Yi y J. Wan, "Utilization of gneiss coarse aggregate and steel slag fine aggregate in asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 911–918, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.070.
- [90] A. Hiltunen, "The influence of chemical and physical properties on the utilization of slags," presentado en Sixth International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, Finland, 2000.
- [91] B.J. Reeves y W.K. Lu, "High temperature modification of steelmaking slags by the addition of fayalite slag to react a Volumetrically stable aggregate," Presentado en Sixth International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, Finland, 2000.
- [92] Y. Shi, H. Chen, J. Wang y Q. Feng, "Preliminary investigation on the pozzolanic activity of superfine steel slag," *Construction and Building Materials*, vol. 82, pp. 227–234, 2015.
- [93] M. Tiifekqi, A. Demirbas y H. Genc, "Evaluation of steel furnace slags as cement additives," *Cement and Concrete Research*. vol. 27, N.º 11, pp. 1713–1717, 1997. DOI: 10.1016/S0008-8846(97)00158-0.
- [94] H. Wen, E. Wu y S. Bhusal, "Evaluation of steel slag as hot mix asphalt aggregate," Final report, Edw. C. Levy Co. and Nucor Steel Seattle, Inc., Seattle, WA, 2014.
- [95] H. Ziari, y M.M. Khabiri, "Preventive maintenance of flexible pavement and mechanical properties of steel slag asphalt," *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, vol. 15, N.º 3, pp. 188b–192b., 2007. DOI: 10.1080/16486897.2007.9636928.
- [96] .A. Oluwasola, M.R. Hainin, M.M.A. Aziz, H. Yaacob y M.N.M. Warid, "Potentials of steel slag and copper mine tailings as construction materials," *Materials Research Innovations*, vol. 18, S6, pp. 250–254, 2014. DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000966.

- [97] H. Wen, S. Wu y S. Bhusal, "Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, N.º 5, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001475.
- [98] U. Bagampadde, H.I.A. Wahhab y S.A. Aiban, "Optimization of steel slag aggregates for bituminous mixes in Saudi Arabia," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, N.º 1, pp. 30-35, 1999. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(30).
- [99] L.S. Huang, D.F. Lin, H.L. Luo y P.C. Lin, "Effect of field compaction mode on asphalt mixture concrete with basic oxygen furnace slag," *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 16-27, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.008.
- [100] S.-H. Chen, J.-D. Lin, D. Huang y C.-T. Hung, "Performance of replacing traditional natural aggregates in dense grade asphalt concrete with basic oxygen furnace slag," presentado en Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure, China, pp. 107-114, 2014. DOI: 10.1061/9780784478554.014.
- [101] E.A. Oluwasola, M.R. Hainin y M.M.A. Aziz, "Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction," *Transportation Geotechnics*, vol. 2, pp. 47-55, 2015. DOI: 10.1016/j.trgeo.2014.09.004.
- [102] Z. Chen, J. Xie, Y. Xiao, J. Chen y S. Wu, "Characteristics of bonding behavior between basic oxygen furnace slag and asphalt binder," *Construction and Building Materials*, vol. 64, pp. 60-66, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.074.
- [103] I. Liapis y S. Likoydis, "Use of electric arc furnace slag in thin skid-resistant surfacing," *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 48, pp. 907-918, 2012. DOI: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1068.
- [104] I.S. Bessa, V. Castelo-Branco y J. Barbosa-Soares, "Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using the aggregate image measurement system," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 15, N.º 2, pp. 385-405, 2014. DOI: 10.1080/14680629.2014.883323.
- [105] Z. Chen, S. Wu, Y. Xiao, M. Zhao y J. Xie, "Feasibility study of BOF slag containing honeycomb particles in asphalt mixture," *Construction and Building Materials*, vol. 124, pp. 550-557, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.128.
- [106] L.S. Huang, G.L. Zou, H.L. Luo y C.C. Chao, "In-situ temperature effects in basic oxygen furnace slag asphalt concrete pavement," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 6, N.º 4, pp. 386-94, 2013.
- [107] D.F. Lin, L.H. Chou, Y.K. Wang y H.L. Luo, "Performance evaluation of asphalt concrete test road partially paved with industrial waste -Basic oxygen furnace slag," *Construction and Building Materials*, vol. 78, pp. 315-323, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.078.
- [108] Y. Xue, H. Hou y S. Zhu, "Adsorption removal of reactive dyes from aqueous solution by modified basic oxygen furnace slag: isotherm and kinetic study," *Chemical Engineering Journal*, vol. 147, N.º 2-3, pp. 272-279, 2009a. DOI: 10.1016/j.cej.2008.07.017.
- [109] Y.C. Hsu, "The evaluation of temperature on asphalt concrete with basic oxygen furnace slag mixed," Tesis de maestría, Ingeniería, I-Shou University, Taiwan, 2009.

- [110] N.A. Ali, J.S. Chan, T. Papagiannakis, E.G. Theriault y A.T. Bergan, “The use of steel slag in asphaltic concrete,” ASTM Special Technical Publication, pp. 3–18, 1992.
- [111] C. Li, Z. Chen, S. Wu, B. Li, J. Xie y Y. Xiao, “Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic,” *Construction and Building Materials*, vol. 145, N.º 1, pp. 383–391. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.034.
- [112] D. Topini, E. Toraldo, L. Andena y E. Mariani, “Use of recycled fillers in bituminous mixtures for road pavements,” *Construction and Building Materials*, vol. 159, pp. 189–197, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.105.

Aceleraciones de piso para diseño de elementos no estructurales y estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica en edificios*

Ricardo E. Barbosa**
José J. Álvarez E.***
Julián Carrillo****

Recibido: 05/10/2017 • Aceptado: 25/06/2018
<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a5>

Resumen

El propósito del artículo es evaluar el método usado en el *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente* (NSR-10) para calcular las aceleraciones de piso que son necesarias para diseñar elementos no estructurales y elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica. En el estudio se comparan las aceleraciones máximas de pisos calculadas con las normas NSR-10, ASCE 7-10, UBC-97, el Eurocódigo 8-04 y NZS 1170.5-04, con las aceleraciones máximas de piso medidas en especímenes ensayados en mesa vibratoria, y en edificaciones existentes durante sismos reales. En el artículo también se propone una modificación al método actualmente utilizado por la NSR-10. La modificación propuesta genera una estimación más acertada de las aceleraciones necesarias para diseñar estos elementos en edificios de mediana y gran altura. Las recomendaciones propuestas se fundamentan en los resultados de la evaluación del método usado actualmente en la NSR-10, el procedimiento usado en otras normas sismorresistentes, en resultados experimentales medidos en modelos de estructuras de concreto reforzado y en aceleraciones registradas en edificios instrumentados.

Palabras clave: aceleración de piso; contenido de edificios; daño por sismo; edificio instrumentado; elemento no estructural; sistema de resistencia sísmica.

* Artículo de investigación terminada. Proyecto financiado por UMNG y EngSolutions Inc., vigencia 2016-2017.

** Ph. D. Profesor de cátedra (Adjunct Professor) en Florida Atlantic University, School of Architecture. Presidente de EngSolutions, Inc. 8170 SW 29th Ct, Ft Lauderdale, FL 33328, USA. Correo electrónico: barbosar@fau.edu. Orcid: <https://ORCID.org/0000-0002-0217-3664>

*** Magíster en Ingeniería Civil. Presidente de la Comisión técnica de estructuras y construcción de edificios, Sociedad Colombiana de Ingenieros, SCI. Carrera 14b N.º 112-60, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jjalvarezenciso@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8957-8463>

**** Doctor en Ingeniería. Profesor titular de la Universidad Militar Nueva Granada, UMNG. Grupo de investigación Estructuras y Sísmica. Carrera 11, No. 101-80. Edificio F, Piso 2. Correo electrónico: wjcarrillo@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8274-5414>

Floor Accelerations for the Design of Non-Structural and Structural Elements that are not Part of the Seismic Resistance System in Buildings

Abstract

The purpose is to evaluate the method used in the Colombian Earthquake Resistant Construction Regulations (NSR-10) to calculate the floor accelerations that are necessary to design non-structural elements and structural elements that are not part of the seismic resistance system. The study compares the maximum floor accelerations calculated with NSR-10, ASCE 7-10, UBC-97, Eurocode 8-04 and NZS 1170.5-04, with the maximum floor accelerations measured in specimens tested on a vibrating table, and in existing buildings during real earthquakes. The article also proposes a modification to the method currently used by NSR-10. The proposed modification generates a more accurate estimate of the accelerations needed to design these elements in medium and high-rise buildings. The proposed recommendations are based on the results of the evaluation of the method currently used in NSR-10, the procedure used in other seismic-resistant standards, experimental results measured in reinforced concrete structure models and accelerations recorded in instrumented buildings.

Keywords: floor acceleration; building contents; earthquake damage; instrumented building; non-structural element; seismic resistance system.

Acelerações de piso para o desenho de elementos não estruturais e estruturais que não fazem parte do sistema de resistência sísmica em edifícios

Resumo

O propósito do artigo é avaliar o método usado no *Regulamento colombiano de construção sismorresistente* (NSR-10) para calcular as acelerações de piso que são necessárias para desenhar elementos não estruturais e elementos estruturais que não fazem parte do sistema de resistência sísmica. No estudo, as acelerações máximas de pisos calculadas com as normas NSR-10, ASCE 7-10, UBC-97, o Eurocódigo 8-04 e NZS 1170.5-04 são comparadas com as acelerações máximas de piso medidas em modelos ensaiados em mesa vibratória e em construções existentes durante sismos reais. No artigo também se propõe uma modificação ao método utilizado atualmente pela NSR-10. A modificação proposta gera uma estimativa mais acertada das acelerações necessárias para desenhar esses elementos em edifícios de altura média e grande. As recomendações propostas se fundamentam nos resultados da avaliação do método usado atualmente na NSR-10, no procedimento usado em outras normas sismorresistentes, em resultados experimentais medidos em modelos de estruturas de concreto reforçado e em acelerações registradas em edifícios instrumentados.

Palavras-chave: aceleração de piso; conteúdo de edifícios; dano por sismo; edifício instrumentado; elemento não estrutural; sistema de resistência sísmica.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte del daño causado a edificios por sismos, corresponde a fallas de elementos no estructurales, los cuales incluyen componentes arquitectónicos, mecánicos, eléctricos, hidráulicos y sanitarios, así como también muebles, equipos y contenido de edificios. Algunos ejemplos de componentes no estructurales que son vulnerables a daño durante sismos, cuando no están debidamente anclados, incluyen particiones, fachadas, techos falsos, pisos falsos, artefactos de iluminación, ductos, equipos de aire acondicionado, elevadores, centros de cómputo, equipo de hospital, estanterías y mercancía en general. Para diseño de componentes no estructurales y su protección sísmica, es necesario estimar las aceleraciones de piso, la cuales permiten determinar los efectos inerciales del sismo que causan deslizamiento, volteo y caída de estos elementos.

Aunque varios estudios han propuesto nuevos métodos o modificaciones a las provisiones de los reglamentos para calcular las aceleraciones máximas de piso [1-3], la mayoría de estos están basados en consideraciones teóricas, analíticas o computacionales, y no en evidencia experimental o en mediciones durante sismos reales.

El objetivo de este artículo es evaluar y discutir el método usado en el *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente* NSR-10 [4] para calcular las aceleraciones de piso para diseño de elementos no estructurales y de elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica. Inicialmente, se discuten los daños observados en elementos no estructurales y de elementos no estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica durante los sismos de México (2017), Ecuador (2016), Bucaramanga (2015), Chile (2010), Nueva Zelanda (2011), Quindío (1999) y Northridge (1994). Luego se describen las aceleraciones máximas de pisos calculadas según las normas NSR-10 [4], ASCE 7-10 [5], UBC-97 [6], el Eurocódigo 8-04 [7] y la norma Neozelandesa NZS 1170.5-04 [8]. Estas aceleraciones calculadas se comparan con las aceleraciones máximas de piso medidas experimentalmente en pruebas en mesa vibratoria, y en edificaciones existentes durante sismos reales.

En particular, se presentan y discuten los resultados de cuatro casos de estudio donde se evalúan las aceleraciones de pisos para diseño de componentes no estructurales. En el primer caso se comparan los resultados de las ecuaciones de los reglamentos analizados para predecir las aceleraciones máximas de pisos para un edificio de 32 pisos. En el segundo caso de estudio se comparan las predicciones de los reglamentos con las aceleraciones medidas en ensayos en mesa vibratoria de estructuras a escala reducida con diferentes sistemas estructurales. En el tercer caso de estudio se comparan las predicciones de los reglamentos con las aceleraciones medidas en siete edificaciones de concreto reforzado localizadas en el área de Los Ángeles, California. En el último caso se comparan las predicciones de los reglamentos con las aceleraciones medidas

en una edificación real de 20 pisos localizado en el norte de Hollywood, California. Finalmente, en el artículo se proponen modificaciones puntuales a la NSR-10.

1. DAÑOS OBSERVADOS EN ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

El costo de los componentes no estructurales de un edificio comercial (mecánicos, eléctricos, hidráulicos, sanitarios y arquitectónicos) representa una fracción importante de la inversión total de capital en la edificación. Por otra parte, el contenido perteneciente a los ocupantes del edificio, que incluye muebles, equipo médico y de oficina, representa un valor adicional significativo. La falla y caída de estas componentes no solo puede ser costosa sino también peligrosa. El principal peligro asociado a la falla o caída de elementos no estructurales es que puede causar heridos y muertos. El desprendimiento y caída de fachadas, parapetos y particiones de mampostería durante sismos han resultado en la muerte, no solo de ocupantes, sino también de transeúntes. Igualmente, la caída de fachadas en vidrio puede ser peligrosa, especialmente cuando hay áreas acristaladas directamente encima de las salidas (ver fig. 1).



Figura 1. Caída de fachadas y escaleras en el sismo de Ecuador de 2016

Fuente: elaboración propia

Los daños potencialmente peligrosos de elementos no estructurales incluyen no solo caída de ventiladores y artefactos de iluminación, equipo pesado de ventilación y chimeneas, sino también volteo de gabinetes y bibliotecas altas y pesadas. También se compromete la seguridad cuando los componentes no estructurales bloquean escaleras y salidas de edificios. Además de las significativas pérdidas directas correspondientes al daño de elementos no estructurales que no están anclados apropiadamente para resistir las fuerzas inerciales generadas durante el sismo, la caída de algunos de estos elementos puede resultar en importantes pérdidas indirectas de propiedad (ver fig. 1).

Las fugas de agua de calentadores de agua y de unidades de aire acondicionado que han sido volteadas por el sismo, pueden resultar en importantes daños por agua, los cuales podrían forzar el cierre temporal de edificaciones indispensables. Por ejemplo, el hospital Talca en el sismo de Chile de 2010 tuvo que ser cerrado por los daños causados por el agua. Similarmente, la combinación de fallas en componentes eléctricos y de fugas de gas causadas por calentadores de agua anclados inadecuadamente, que al voltearse producen la rotura de la tubería de suministro de gas, frecuentemente originan incendios que también resultan en costosos daños.

Los soportes de la red de rociadores contra incendio deben ser diseñados para que resistan los efectos inerciales del sismo. El diseño de estos elementos es importante porque la pérdida de protección pone en riesgo la vida de los ocupantes del edificio. Adicionalmente, en varios sismos se ha observado que las fallas en la red de rociadores generan liberación de grandes volúmenes de agua, lo que produce el colapso de cielos rasos y pérdidas importantes de propiedad, todo ello, finalmente, resulta en uno de los tipos de daño no estructural más costosos.

Similarmente, los daños a equipos de cómputo, equipo eléctrico y de comunicaciones por falla, caída o volcamiento o por colapso de pisos falsos (pedestales fallados o volteados), pueden forzar el cierre de instalaciones médicas, centros de atención a la comunidad, negocios y oficinas, mientras se completan reparaciones adecuadas. Por otra parte, el colapso de elementos estructurales que no hace parte del sistema de resistencia sísmica, tales como escaleras y rampas, compromete de varias maneras la seguridad de los ocupantes.

2. PROVISIONES DE REGLAMENTOS PARA DISEÑO SÍSMICO

Para diseñar apropiadamente los componentes no estructurales y su protección sísmica (anclaje y arrostramiento) es necesario estimar las aceleraciones de piso. Estas aceleraciones permiten determinar los efectos inerciales del sismo que causan deslizamiento, volteo y caída de estos elementos. Las normas de diseño sismorresistente requieren que las fuerzas sísmicas de diseño (F_p) que actúan sobre cualquier elemento no estructural, se calculen a partir de la ecuación (1).

$$F_p = \frac{a_x a_p}{R_p} W_p \quad (1)$$

Donde a_x es la aceleración en el punto de soporte del elemento expresada como una fracción de la gravedad, W_p es el peso del elemento, a_p es un factor de amplificación de la aceleración en el elemento y R_p es un factor de modificación de respuesta. Las normas especifican un valor mínimo de la fuerza sísmica. La gran diferencia entre la norma NSR-10 [4] y otras normas sísmicas internacionales está en la evaluación de las aceleraciones a_x . Para elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica se aplica una ecuación similar a la ecuación (1). A continuación, se describe el cálculo de las aceleraciones a_x en algunas normas internacionales.

2.1 Aceleraciones según la NSR-10

En la sección A.9.4.2.1 de la NSR-10 [4] se define la aceleración en el punto de soporte y se calcula por medio de la ecuación (2).

$$a_x = A_s + \frac{(S_a - A_s)h_x}{h_{eq}} \quad h_x < h_{eq}$$

$$a_x = S_a \frac{h_x}{h_{eq}} \quad h_x > h_{eq} \quad (2)$$

Donde A_s es la aceleración máxima en la base, S_a es la aceleración espectral y h_x es la altura del nivel de apoyo del elemento. La altura equivalente h_{eq} puede estimarse a partir de la altura total (h_n) como $0,75 \times h_n$. Según la ecuación 2, las aceleraciones de piso varían linealmente desde el valor en la base A_s hasta la aceleración espectral S_a a la altura equivalente. Desde la altura equivalente hasta el techo, las aceleraciones aumentan con la altura en proporción a la relación de alturas h_x/h_{eq} .

2.2 Aceleraciones según la ASCE 7-10

Según la sección 13.3.1 de la ASCE 7-10 [5], la aceleración en el punto de soporte puede calcularse por medio de la ecuación (3). Esta ecuación fue originada en las Provisiones NEHRP [10-11].

$$a_x = A_s \left(1 + 2 \frac{h_x}{h_n} \right) \quad (3)$$

Donde A_s es aceleración máxima en la base, h_n es la altura del techo y h_x es la altura del nivel de apoyo. En ASCE 7-10, el término A_s es remplazado por $0.4 \times S_{DS}$. Según la ecuación (3), las aceleraciones de piso siempre aumentan linealmente con la altura y la aceleración en el techo es tres veces mayor que la aceleración en la base.

2.3 Aceleraciones según el UBC-97

En el reglamento UBC-97 [6], el cual estuvo vigente en California hasta el año 2001 y que es la base de varios códigos internacionales, la aceleración en el punto de soporte puede calcularse por medio de la ecuación (4).

$$a_x = A_s \left(1 + 3 \frac{h_x}{h_n} \right) \quad (4)$$

Donde A_s es la aceleración máxima en la base, h_n es la altura del techo y h_x es la altura del nivel de apoyo. Según la ecuación (4), las aceleraciones de piso aumentan con la altura y la aceleración en el techo es cuatro veces mayor que la aceleración en la base.

2.4 Aceleraciones según el Eurocódigo 8-04

Según el Eurocódigo 8-04 [7], la aceleración en el punto de soporte puede expresarse por medio de la ecuación (5).

$$a_x = A_s \left[\frac{3}{2} \left(1 + \frac{h_x}{h_n} \right) - 0.5 \right] \quad (5)$$

La ecuación (5) aplica a un elemento no estructural rígido, es decir, no incluye el efecto de amplificación de la componente. En la NSR-10 [4] y ASCE 7-10 [5], esta amplificación está dada por el factor a_p , mientras que en el Eurocódigo 8-04 [7], la amplificación está representada por el factor del primer término de la ecuación (5). Este término es función de la relación entre el periodo fundamental del elemento T_a y el periodo fundamental del edificio T_l . La ecuación (5) en este artículo está indicada para $(T_a/T_l)=0$. Según esta ecuación, las aceleraciones de piso aumentan con la altura y la aceleración en el techo es 2,5 veces mayor que la aceleración en la base.

2.5 Aceleraciones según la NZS 1170.5-04

Según la norma Neozelandesa NZS 1170.5-04 [8], la aceleración en el punto de soporte puede calcularse por medio de la ecuación (6).

$$\begin{aligned} a_x &= A_s \left(1 + 2 \frac{h_x}{h_l} \right) & h_x < h_l \\ a_x &= 3A_s & h_x > h_l \end{aligned} \quad (6)$$

Donde la altura límite (h_l) se calcula como el mayor valor entre 12 m y $0.2 h_n$, donde h_n es la altura total. Según la ecuación (6), las aceleraciones de piso aumentan

linealmente con la altura y la aceleración en la altura h_i es hasta tres veces el valor de la aceleración en la base. A partir de la altura h_i hasta el techo, las aceleraciones máximas son iguales a tres veces la aceleración en la base.

Varios estudios han propuesto nuevos métodos o modificaciones a las provisiones de los reglamentos para calcular las aceleraciones máximas de piso [1-3]. Sin embargo, la mayoría de estos estudios están basados en consideraciones teóricas, analíticas o computacionales y no en evidencia experimental o en mediciones durante sismos reales.

3. METODOLOGÍA

La metodología del estudio consiste en comparar las aceleraciones máximas de pisos calculadas según las normas NSR-10 [4], ASCE 7-10 [5], UBC-97 [6], el Eurocódigo 8-04 [7] y la norma Neozelandesa NZS 1170.5-04 [8], con las aceleraciones máximas de piso medidas experimentalmente en pruebas en mesa vibratoria y en edificaciones existentes durante sismos reales. En particular, se presentan y discuten los resultados de cuatro casos de estudio donde se evalúan las aceleraciones de pisos para diseño de componentes no estructurales. En el primer caso se comparan los resultados de las ecuaciones de los reglamentos analizados para predecir las aceleraciones máximas de pisos para un edificio de 32 pisos. En el segundo caso de estudio se comparan las predicciones de los reglamentos con las aceleraciones medidas en ensayos en mesa vibratoria de estructuras a escala reducida con diferentes sistemas estructurales. En el tercer caso de estudio se comparan las predicciones de los reglamentos con las aceleraciones medidas en siete edificaciones de concreto reforzado localizadas en el área de Los Ángeles, California. En el último caso se comparan las predicciones de los reglamentos con las aceleraciones medidas en una edificación real de 20 pisos localizado en el norte de Hollywood, California.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para facilitar el análisis de la información, en esta sección se presenta la descripción detallada de los casos de estudio, junto con los resultados y discusión de los resultados obtenidos.

4.1 Caso de estudio 1: comparación entre predicciones de reglamentos para un edificio de 32 pisos

Para comparar las aceleraciones de piso que se utilizan en la norma NSR-10 [4] con las aceleraciones propuestas en otras normas [5-8] para diseño de elementos no estructurales, en el primer caso de estudio se analizan los resultados de una estructura

real de 32 pisos, correspondientes a 28 pisos de apartamentos más cuatro pisos de parqueaderos (aéreos). La estructura está localizada en una zona de amenaza sísmica intermedia. El sistema estructural que resiste las cargas gravitacionales y las fuerzas sísmicas consiste en pórticos de concreto reforzado con capacidad moderada de disipación de energía (DMO). El tamaño de las columnas varía e incluye secciones de 0,60×1,60 m, 0,60×2,00 m, 0,60×2,20 m, 0,70×1,80 m y 0,80×1,40 m. El tamaño de las vigas varía e incluye secciones de 0,50×0,70 m, 0,60×0,60 m y 0,60×0,70 m. La estructura esta desplantada en un perfil de suelo tipo D. La cimentación consiste en pilas preexcavadas de 25 m de longitud, las cuales están dispuestas en grupos de 2 y 3 pilas por columna. El modelo matemático del sistema de resistencia sísmica se presenta en la figura 2, junto con un resumen de los parámetros sísmicos y de los resultados del análisis sísmico obtenido con la herramienta computacional RCB V8.5 [12]. Aunque el diseño original de la estructura se basó en un análisis dinámico modal espectral, para un seguimiento más sencillo, en este artículo se presentan resultados de un análisis usando el método de la fuerza horizontal equivalente. Sin embargo, para el caso de la comparación de las aceleraciones, las conclusiones son las mismas con los dos métodos de análisis.

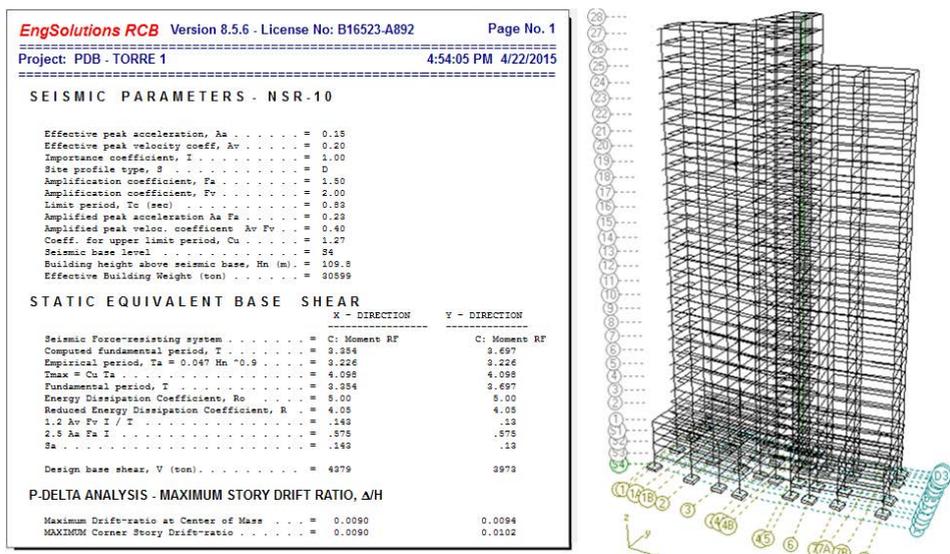


Figura 2. Parámetros sísmicos, análisis fuerza horizontal equivalente y modelo matemático de estructura ejemplo

Fuente: elaboración propia

En la figura 3 se presentan, para cada piso de la estructura, los valores de aceleraciones calculadas según la NSR-10 [4], ASCE 7-10 [5], UBC-97 [6], el Eurocódigo

8-04 [7] y NZS1170.5-04 [8]. Cuando se comparan estos valores, en la figura se observa que la diferencia con respecto a la NSR-10 es significativa. Las aceleraciones de piso calculadas según las demás normas sísmicas llegan a ser más de cuatro veces mayores a las correspondientes a las de la norma NSR-10. Por otra parte, la variación de las aceleraciones con la altura en la NSR-10 es completamente diferente a la correspondiente a las demás normas. Para el ejemplo considerado, las aceleraciones de piso según NSR-10 disminuyen con la altura hasta $h_x/h_{eq} \leq 1,0$, mientras que en las demás normas las aceleraciones de piso siempre aumentan con la altura.

EngSolutions RCB Version 8.6.3 Page No. 2

Project: PDB - Torre 1 12:46:18 PM 9/11/2016

ACCELERATIONS ON NON_STRUCTURAL ELEMENTS: NSR-10

FLOOR Level	ACCELERATIONS hx	hx/heq	ax NSR-10	ax ASCE7-10	ax UEC-97	ax EUROCODE8	ax NZS1170.5
28	109.8	1.33	0.191	0.690	0.920	0.805	0.690
27	106.3	1.28	0.185	0.676	0.898	0.787	0.690
26	102.8	1.25	0.179	0.661	0.876	0.768	0.690
25	99.22	1.20	0.172	0.646	0.853	0.749	0.690
24	95.62	1.15	0.166	0.631	0.831	0.731	0.690
23	92.05	1.12	0.160	0.616	0.808	0.712	0.690
22	88.48	1.07	0.154	0.601	0.786	0.693	0.690
21	84.90	1.02	0.148	0.586	0.763	0.674	0.690
20	81.31	0.99	0.144	0.571	0.741	0.656	0.690
19	77.73	0.94	0.148	0.556	0.718	0.637	0.690
18	74.16	0.90	0.152	0.541	0.696	0.618	0.690
17	70.58	0.86	0.156	0.526	0.673	0.600	0.690
16	67.00	0.81	0.159	0.510	0.651	0.581	0.690
15	63.41	0.77	0.163	0.496	0.628	0.562	0.690
14	59.84	0.73	0.167	0.481	0.606	0.543	0.690
13	56.25	0.68	0.171	0.466	0.583	0.525	0.690
12	52.68	0.64	0.174	0.451	0.561	0.505	0.690
11	49.09	0.60	0.178	0.436	0.538	0.487	0.690
10	45.52	0.55	0.182	0.421	0.516	0.468	0.690
9	41.93	0.51	0.186	0.406	0.493	0.450	0.690
8	38.36	0.47	0.190	0.391	0.471	0.431	0.690
7	34.77	0.42	0.193	0.376	0.449	0.412	0.690
6	31.20	0.38	0.197	0.361	0.426	0.393	0.690
5	27.62	0.34	0.201	0.346	0.404	0.375	0.690
4	24.04	0.29	0.205	0.331	0.381	0.356	0.690
3	20.45	0.25	0.208	0.316	0.359	0.337	0.690
2	16.87	0.20	0.212	0.301	0.336	0.318	0.690
1	12.29	0.15	0.217	0.282	0.308	0.295	0.490
S1	9.20	0.11	0.220	0.269	0.288	0.279	0.425
S2	6.19	0.08	0.223	0.256	0.269	0.262	0.360
S3	3.09	0.04	0.227	0.243	0.249	0.246	0.295

Seismic base level = 34
 Height above seismic base, hn = 109.83 m
 Equivalent height, heq = 0.75 hn = 82.37 m
 Ground acceleration, As = Aa Fa I = 0.230
 Spectral acceleration, Sa = 0.143

NSR-10: ax = Sa hx/heq for hi > heq
 ax = As + (Sa - As) hi/heq for hi < heq
 ASCE7-10: ax = As (1 + 2 hx/hn)
 UEC-97: ax = As (1 + 3 hx/hn)
 Eurocode 8: ax = As [3/2(1+ hx/hn) - 0.5] for (Ta/T1=0)
 NZS 1170.5 ax = As (1 + 2 hx/hl) for hx < hl
 ax = 3 As for hx > hl (hl = 0.2 hn)

Note: RCB recommends using ASCE7-10 accelerations for this project

Force on structural non-seismic element : Fp = ai Wp / Ro
 Force on nonstructural element : Fp = ai ap Wp / Rp
 > 0.5 Aa I Wp
 ap : component amplification factor

Figura 3. Aceleraciones de piso para el diseño de elementos no estructurales según NSR-10 y otras normas sísmicas

Fuente: elaboración propia

4.2 Caso de estudio 2: comparación entre predicciones de reglamentos y aceleraciones medidas en ensayos en mesa vibratoria

Entre los años 1970 y 1990 se llevaron a cabo una serie de experimentos en el simulador sísmico de la Universidad de Illinois (ver tabla 1). Este simulador se diseñó para someter modelos de estructuras a escala reducida a aceleraciones horizontales en la base [13]. En los ensayos con este simulador se han obtenido resultados de la respuesta de diferentes modelos de estructuras de concreto reforzado de varios pisos, correspondientes a diferentes configuraciones y diversos sistemas de resistencia lateral. Los resultados obtenidos en estas pruebas han sido usados para proponer valores máximos de aceleraciones de piso, necesarias para diseño de elementos no estructurales [14]. En cada una de las pruebas indicadas en la tabla 1, se ensayaron dos o más pórticos planos conectados a la plataforma de la mesa vibratoria para representar una condición de base fija. El refuerzo longitudinal y transversal de vigas y columnas consistió en alambre de acero con cuantías dentro del intervalo usual en edificaciones reales. El refuerzo longitudinal se hizo continuo en los nudos y se extendió más allá de los nudos exteriores en ‘talones’ para proveer anclaje. En todos los elementos se colocó suficiente refuerzo transversal para evitar fallas por cortante antes de falla por flexión. Cada estructura fue sometida a múltiples simulaciones (corridas) que consistieron en aumentar la intensidad en corridas sucesivas. Los movimientos aplicados en la base fueron seleccionados de registros de sismos reales. Los resultados de las historias de aceleración y desplazamiento medidas en cada piso para cada ensayo se presentan en forma detallada en las referencias de la tabla 1 [25]. Adicionalmente, los resultados se presentan en forma resumida por Lepage *et al.* [14].

Tabla 1. Descripción de estructuras ensayadas

<i>Tipo de sistema</i>	<i>Estructuras</i>	<i>Fuente</i>
Muros acoplados	D1, D2, D3, M1	Aristizábal y Sozen [16]
	D1, D2, D3, D4, D5	Lybas y Sozen [17]
Combinado: pórticos-muros	FW1, FW2, FW3, FW4	Abrams y Sozen [18]
	FSW, FHW, FFW	Moehle y Sozen [19]
Pórticos con vigas fluyendo	MF1	Healey y Sozen [20]
	MF2	Moehle y Sozen [21]
	H1, H2	Cecen [22]
	FNW	Moehle y Sozen [18]
Pórticos con columnas fluyendo	SS1, SS2	Schultz [22]
	Tower, Stepped	Wood [23]
	ES1, ES2	Eberhard y Sozen [24]

Fuente: elaboración propia

En la figura 4 se presentan los valores de aceleración pico en cada piso para cada una de las simulaciones. Las aceleraciones (eje horizontal) fueron normalizadas con respecto a la aceleración pico del terreno. La elevación del piso (eje vertical) se normalizó con respecto a la altura total de la estructura (altura del techo). El eje horizontal en la figura 4 representa la amplificación de la aceleración de cada piso con respecto a la aceleración en la base. En la figura se observa que, en todos los casos, las máximas amplificaciones de la aceleración ocurren en los pisos superiores.

En la figura 5 se comparan los resultados de aceleraciones máximas de piso medidas en todas las pruebas, con la predicción de las diferentes normas analizadas en este estudio. Esta figura muestra, por una parte, que las ecuaciones para determinar las aceleraciones de piso para el diseño de elementos no estructurales de las normas ASCE 7-10 [5], UBC-97 [6], el Eurocódigo 8-04 [7] y NZS 1170.5-04 [8] son representativas de la envolvente de las aceleraciones de piso. Por otra parte, en la misma figura se observa que las aceleraciones de piso calculadas según la norma NSR-10 [4], para el ejemplo considerado, son significativamente menores que la gran mayoría de los valores experimentales.

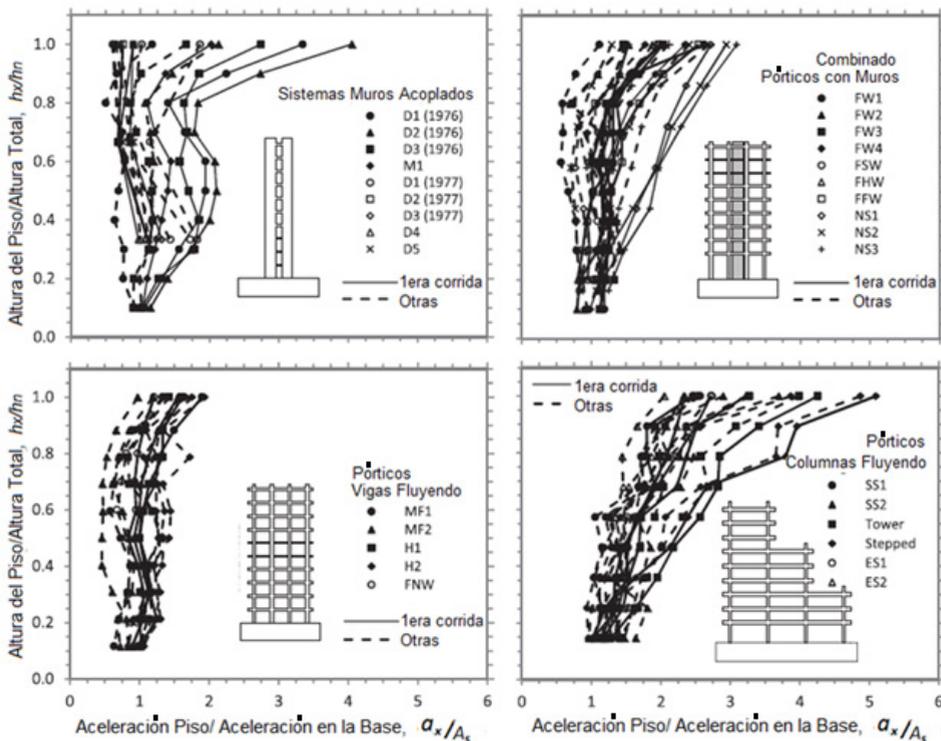


Figura 4. Aceleraciones máximas en los pisos medidas en las pruebas para cada tipo de estructura

Fuente: elaboración propia

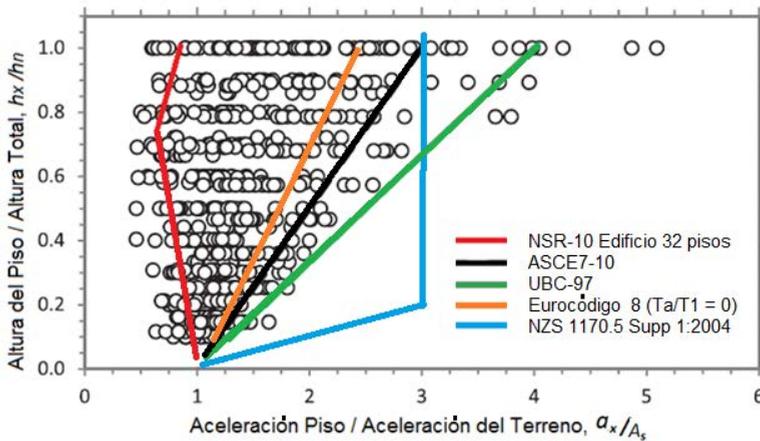


Figura 5. Valores experimentales de aceleración máxima del piso comparada con fórmulas en normas

Fuente: elaboración propia

4.3 Caso de estudio 3: comparación entre predicciones de reglamentos y aceleraciones medidas en edificaciones reales de 5 a 20 pisos

Lepage *et al.* [14] han reportado las aceleraciones de piso medidas en siete edificaciones de concreto reforzado localizadas en el área de Los Ángeles, California, durante sismos reales. Las características de las edificaciones se presentan en la tabla 2. Estas mediciones se encuentran disponibles en la página web del CESMD [26]. En este estudio se han comparado estas aceleraciones con los valores predichos por las fórmulas en las normas analizadas. Los datos corresponden a aceleraciones medidas durante cuatro sismos: San Fernando de 1971, Whittier de 1987, Sierra Madrid de 1991 y Northridge de 1994. En esta comparación solo se consideraron los resultados de los registros en los que la aceleración del terreno excedió 0,1 g.

Para robustecer la base de datos, en este estudio también se usaron los valores medidos de las amplificaciones de aceleración compiladas por Drake y Backman [27, 28], las cuales se utilizaron para la elaboración de las provisiones NEHRP. Estas provisiones se basan en 405 juegos de registros de aceleraciones de piso obtenidas en diferentes edificaciones instrumentadas durante 16 sismos fuertes en California. Con un formato similar a la figura 5, en la figura 6 se presentan todas las aceleraciones de piso máximas medidas. Las aceleraciones de piso en la figura están normalizadas con respecto a la aceleración máxima en la base (eje X) y la altura del piso está normalizada con respecto a la altura del techo. De modo similar a los resultados medidos en los ensayos en mesa vibratoria de las estructuras (figura 5), en la figura 6 se observa que las máximas amplificaciones ocurren siempre en el techo, excepto en NSR-10.

Tabla 2. Descripción de edificios existentes donde se midieron las aceleraciones

Edificio	Identificación CESMD	Sistema de resistencia sísmica	Altura en m	Pisos
Bodega Los Ángeles	24463	PRM	36	5
Parqueadero Los Ángeles	24655	ME	19	6
Hotel Van Nuys	24386	PRM	20	7
Residencial Burbank	24385	ME	27	10
Sherman Oaks	24322	PRM	50	13
Almacén Hollywood	24236	PRM	42	14
Hotel North Hollywood	24464	PRM	59	20

PRM = pórticos resistentes a momento, ME = muros estructurales

Fuente: elaboración propia

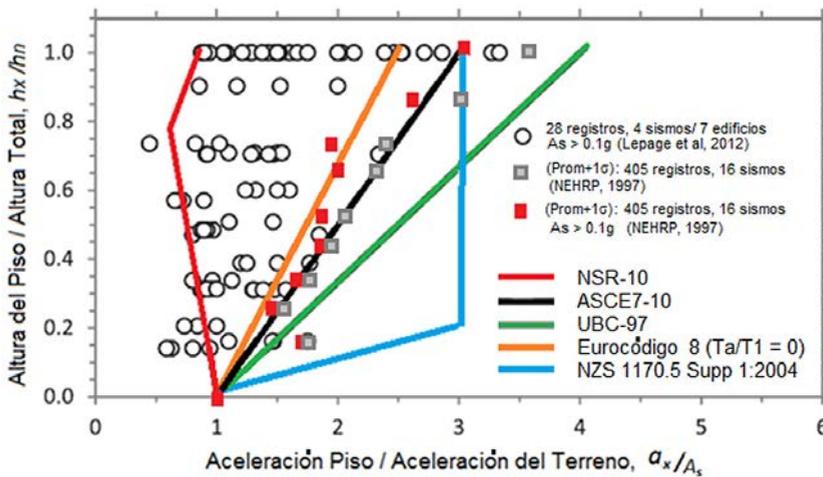


Figura 6. Aceleraciones de piso medidas en edificaciones existentes comparadas con fórmulas en normas

Fuente: elaboración propia

Para esta base de datos sísmicos se obtuvo la distribución con la altura del valor promedio más desviación estándar (Prom+1σ) de la relación entre la aceleración máxima de cada piso y la aceleración máxima en la base (a_x/A_s). En la figura 6 se muestra la distribución original de los valores del Prom+1σ que sirvió de base para las provisiones en el UBC-97, la cual incluye la totalidad de los registros. En la figura se incluye la distribución modificada de los valores del Prom+1σ que sirvió de base para ASCE 7-10, en la cual solo se consideraron registros correspondientes a aceleraciones máximas en la base superiores a 0,1 g. En la figura 6 también se muestran los resultados

obtenidos con las ecuaciones de las normas ASCE 7-10, el Eurocódigo 8-04, UBC-97 y NZS 1170.5-04. Se observa que los resultados de las aceleraciones máximas de piso obtenidas con estas ecuaciones son representativas de la envolvente de aceleraciones medidas. Adicionalmente, en la figura se observa que las predicciones de las ecuaciones de UBC-97 y NZS 1170.5-04 son las más conservadoras. Por otra parte, en la figura se aprecia que, para el ejemplo considerado, las aceleraciones calculadas según la norma NSR-10 nuevamente son significativamente menores que los valores medidos. De hecho, las aceleraciones en el techo calculadas según la NSR-10 son menores que la totalidad de las aceleraciones medidas en edificaciones reales.

4.4 Caso de estudio 4: comparación entre predicciones de reglamentos y aceleraciones medidas en una edificación real de 20 pisos

En el cuarto caso considerado en este estudio se comparan las aceleraciones de piso calculadas con las diferentes normas analizadas, con las aceleraciones reales medidas en un edificio de mediana altura. En este estudio se seleccionó el caso de un hotel de 20 pisos localizado en el norte de Hollywood. Como se observa en la figura 7, el sistema de resistencia sísmica del edificio corresponde a pórticos dúctiles de concreto reforzado. La estructura es representativa de un gran número de edificaciones existentes en Colombia. Se trata de una estructura relativamente flexible que, aunque cumple con los límites de deriva del ASCE 7-10, no cumple con los límites de deriva de la NSR-10. De acuerdo con Goel y Chopra [29], los periodos de vibración reales medidos durante el sismo de Northridge de 1994, son $T_x = 2.60\text{ s}$ (longitudinal, N-S) y $T_y = 2.62\text{ seg}$ (transversal, E-W).

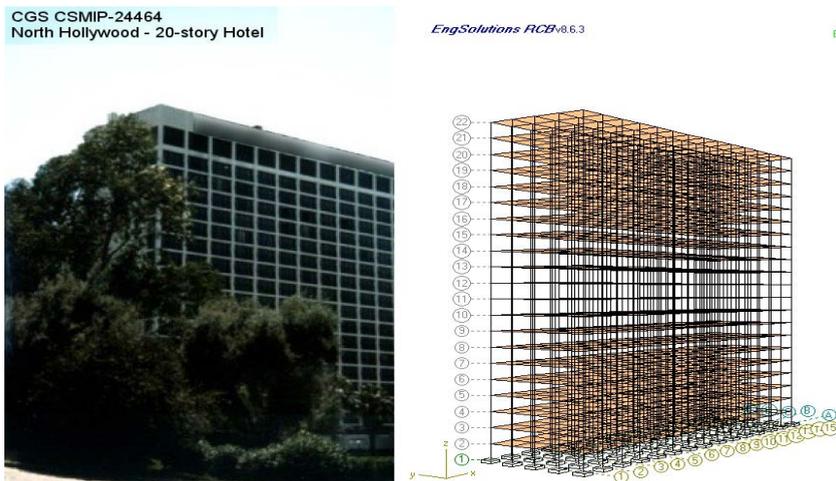


Figura 7. Hotel en North Hollywood: (a) fotografía [26], (b) modelo estructural en RCB V8.5

Fuente: elaboración propia

Los registros de aceleraciones de piso obtenidos en este edificio durante cuatrosismos fuertes en California están disponibles en la página web del CESMD [26]. El número de identificación en el CESMD del edificio aquí analizado es CSMIP-24464. En este estudio, la comparación se hace para las aceleraciones medidas durante el sismo de Northridge 1994, en el cual se registró daño extensivo en las componentes no estructurales de este edificio. En la figura 8 se presentan los registros de aceleración de piso medidos durante el sismo de Northridge de 1994. En la figura se observa claramente que, en las dos direcciones, la aceleración en el techo excede ampliamente la aceleración en el piso.

Las aceleraciones máximas del terreno (A_x) para el sitio fueron 0,32 g en la dirección norte-sur (N-S) y 0,11 g en la dirección este-oeste (E-W). En este caso, el hotel está localizado en un perfil de suelo tipo C. Según la NSR-10, para Bogotá y Medellín, las aceleraciones máximas del terreno ($A_x \times F_a$) para los perfiles de suelo serían: perfil A = 0,12 g (0,15×0,8), perfil B = 0,15 g (0,15×1,0), perfil C = 0,18 g (0,15×1,2), perfil D = 0,22 g (0,15×1,5) y perfil E = 0,32 g (0,15×2,1). Por tanto, el intervalo de aceleraciones máximas del terreno registradas en el edificio de estudio (0,11 g y 0,32 g), es representativo de las aceleraciones A_x que se esperan para el sismo de diseño en las dos ciudades más densamente pobladas de Colombia: Bogotá y Medellín.

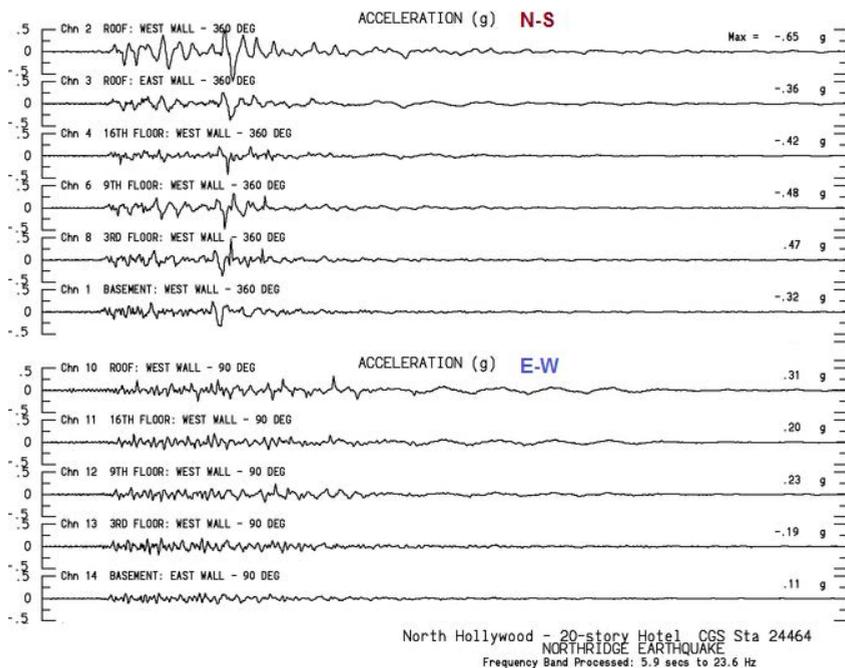


Figura 8. Registros de aceleraciones de piso para sismo de Northridge de 1994

Fuente: elaboración propia

En la figura 9 se presentan, para las dos componentes (E-W, y N-S), las máximas aceleraciones de piso registradas en varios pisos, normalizadas con respecto a la aceleración del terreno (A_x/A_s). En esta figura también se presenta la relación de aceleraciones calculadas según la norma NSR-10 para los parámetros sísmicos representativos del movimiento sísmico que experimentó la estructura; es decir, $A_a = 0.29$ g y Perfil C, lo cual resulta en una aceleración del terreno $A_s = 0.32$ g ($A_a \times F_a$). En la figura 9 también se presenta la relación de aceleraciones calculada según la NSR-10 para zonas de amenaza sísmica intermedia ($A_a = 0.15$ g) en perfiles A (roca) y E (suelo blando), representativas del intervalo de aceleraciones de diseño de Bogotá y Medellín. Por otra parte, en esta figura se presenta la distribución de aceleraciones según ASCE 7-10, UBC-97, Eurocódigo 8-04 y la norma neozelandesa NZS 1170.5-04.

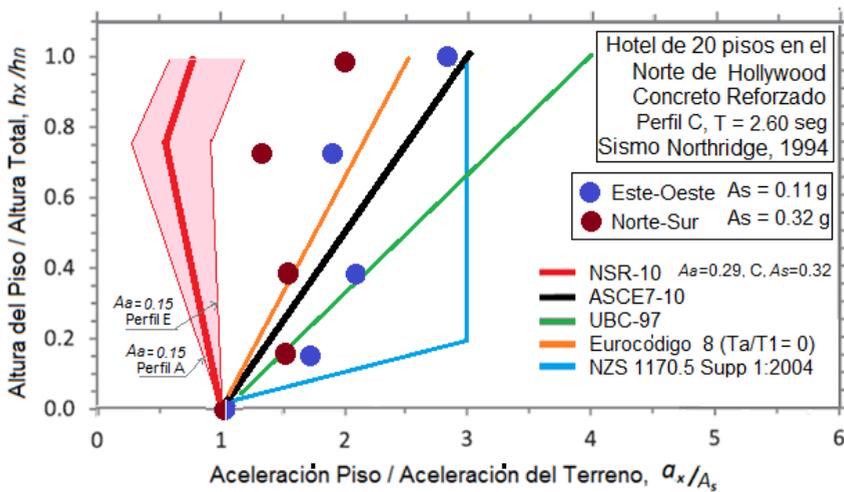


Figura 9. Comparación entre aceleraciones de piso medidas en hotel de 20 pisos en el norte de Hollywood y las fórmulas de reglamentos

Fuente: elaboración propia

En la figura 9 se observa que las aceleraciones registradas en el edificio estudiado son significativamente mayores que las aceleraciones predichas por la NSR-10. En la figura se observa que todos los valores de aceleración registrados están totalmente fuera y lejos del intervalo de aceleraciones calculado con la NSR-10 para perfiles de suelo A hasta E. Por el contrario, las ecuaciones de las normas ASCE 7-10, UBC-97, el Eurocódigo 8-04 y NZS 1170.5-04 son, en general, representativas de la envolvente de las aceleraciones medidas. En la figura se observa que, para bajas relaciones de altura h_x/h_n , las aceleraciones medidas superan los valores obtenidos según estas normas, sin embargo, el valor mínimo de la fuerza inercial F_p especificado en las normas cubre esta deficiencia.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio demuestran que las ecuaciones indicadas en la NSR-10 para calcular las aceleraciones de piso que son necesarias para diseñar elementos no estructurales en edificios altos y de mediana altura son significativamente menores que las aceleraciones requeridas en otras normas, incluyendo la norma americana vigente ASCE 7-10, el UBC-97, el Eurocódigo 8-04 y la norma neozelandesa NZS 1170.5-04.

Por otra parte, las aceleraciones de piso calculadas según la norma NSR-10 son significativamente menores que las aceleraciones máximas de piso medidas experimentalmente en pruebas en mesa vibratoria, y que las aceleraciones máximas de piso medidas en edificaciones existentes durante sismos reales. Para edificaciones de mediana altura, la aceleración de piso calculada según la norma NSR-10 es menor que todas las aceleraciones medidas en edificaciones reales consideradas en este estudio. Por el contrario, las aceleraciones de piso calculadas según las normas ASCE 7-10, UBC-97, el Eurocódigo 8-04 y NZS 1170.5-04 son representativas de la envolvente de las aceleraciones medidas experimentalmente y registradas en edificaciones reales.

Los resultados de este estudio también demuestran que la variación de las aceleraciones de piso con la altura que fue obtenida con las fórmulas de la NSR-10, se aleja significativamente de las distribuciones consideradas en otras normas, de las distribuciones reales medidas experimentalmente en pruebas en mesa vibratoria y de las observadas en estructuras existentes. En las normas estudiadas se observó consistencia entre los resultados experimentales y mediciones en edificaciones existentes ya que, independientemente del número de pisos, la aceleración máxima de piso siempre se amplifica con la altura. Sin embargo, en la norma NSR-10, la distribución está determinada por la magnitud de la aceleración espectral S_a y, por tanto, esta distribución depende del periodo fundamental y de la altura del edificio. Para edificios de mediana altura y edificios altos en los que la ordenada espectral está en la rama descendiente del espectro de diseño, como en el caso del ejemplo considerado, las fórmulas de la NSR-10 resultan en una reducción de la aceleración con la altura del piso. Se debe anotar que los desplazamientos laterales máximos y las fuerzas internas máximas del sistema estructural están controlados por los primeros modos de vibración del sistema de resistencia sísmica integrado. Sin embargo, los efectos inerciales de las componentes no estructurales están controlados por las aceleraciones máximas de los pisos individuales, las cuales están controladas por los modos de vibración superiores, cuyos periodos corresponden a la meseta del espectro.

Es importante también anotar que, para edificios medianamente altos como los analizados en las figuras 5, 6 y 9, el margen de error en la magnitud de las aceleraciones

de piso calculadas con NSR-10 puede ser significativo. En casos de edificios más altos y en suelos blandos, el error es aún mayor que el mostrado en este estudio. Esto impide un diseño seguro de los elementos no estructurales, pues se subestima drásticamente el efecto inercial del sismo, que es la principal causa de la falla y caída de estos elementos. Si se considera el alto riesgo asociado a la falla de estos elementos ante un sismo fuerte, incluyendo riesgo a la vida, el riesgo de pérdidas económicas importantes por daño a los edificios y su contenido, y el riesgo de pérdida temporal de funcionalidad, se hace prioritario incluir rápidamente modificaciones a la norma NSR-10. De esta manera, en este artículo se recomienda incluir en la NSR-10 las siguientes modificaciones:

- Modificar la ecuación A.9.4-2 para calcular las aceleraciones para diseño de elementos no estructurales, de tal manera de adoptar la distribución usada actualmente en ASCE 7-10; es decir:

$$a_x = A_s \left(1 + 2 \frac{h_x}{h_n} \right)$$

$$A_s = A_a F_a I$$

- Modificar la sección A.9.4.8, de tal manera que los elementos no estructurales localizados por debajo de la base sísmica se diseñen para una aceleración a_x igual a $A_s = A_a F_a I$.
- Modificar la ecuación A.9.4-1 para que el valor mínimo de la fuerza horizontal sea $F_p = A_s g M_p$.
- Modificar las ecuaciones A.8.2-1 y A.3.6-3 para adoptar la misma ecuación indicada en (a).
- Especificar que se debe incluir en los planos estructurarles las aceleraciones a_x que se deben usar para diseñar los soportes de los componentes mecánicos, eléctricos, hidráulicos y arquitectónicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los ingenieros Luis E. Huertas, Carlos E. Blodek y Adriana C. Hoyos por sus observaciones, comentarios, sugerencias y aportes en la preparación del artículo. El tercer autor agradece a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada por el apoyo en las actividades de investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. Rodríguez, J. Restrepo y J. Carr, "Earthquake-induced floor horizontal accelerations in buildings," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 31, pp. 693-718, 2002.
- [2] J. Jaramillo, "Evaluación aproximada de la aceleración absoluta en sistema de múltiples grados de libertad considerando la participación de n formas modales," *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 4, N° 2, pp. 87-98, 2005.
- [3] J. Carrillo y G. González, "Evaluación de la demanda sísmica fuera del plano en edificios," *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 15, pp. 44-61, 2005.
- [4] NSR-10, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente –NSR-10*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, Tomo 1, Bogotá, 2010.
- [5] ASCE 7-10, *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE/SEI 7-10, Reston, VA, 2010.
- [6] UBC-97, "Uniform building code – Vol. 2: Structural engineering design provisions," presentado en International Conference of Building Officials, Whittier, California, EE. UU., 1997.
- [7] Eurocódigo 8-04, *Design of structures for earthquake resistance*, European Committee for Standardization, 2004.
- [8] NZS 1170.5-04, *New Zealand Standard: Structural design actions – Part 5: Earthquake actions. Standards*, Nueva Zelanda, 2004.
- [9] FEMA, *Reducing de risks of nonstructural earthquake damage –A practical guide, FEME E-74*, Washington, 2012.
- [10] FEMA, *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1: Provisions, FEMA 302*, Washington, 1997.
- [11] FEMA, *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 2: Commentary, FEMA 303*, Washington, 1997.
- [12] EngSolutions RCB, Structural software for analysis and design of reinforced concrete buildings for earthquake and wind forces, V8.5, *EngSolutions, Inc.*, Florida, 2015.
- [13] M. Sozen, S. Otani, P. Gulkan y N. Nielsen, "The University of Illinois earthquake simulator," presentado en *Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, vol. III, 1969.
- [14] A. Lepage, J. Shoemaker y A. Memari, "Accelerations of nonstructural components during nonlinear seismic response of multistory structures," *Journal of Architectural Engineering*, ASCE, vol. 18, N° 4, pp. 285-297, 2012.
- [15] J. Aristizabal y M. Sozen, "Behavior of ten-story reinforced concrete walls subjected to earthquake motions", *Structural Research Series*, N° 431, *Univ. of Illinois, Urbana*, Illinois, 1976.

- [16] J. Lybas y M. Sozen, "Effect of beam strength and stiffness on dynamic behavior of reinforced concrete coupled walls," *Structural Research Series*, N°. 444, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1977.
- [17] D. Abrams y M. Sozen, "Experimental study of frame-wall interaction in reinforced concrete structures subjected to strong earthquake motions," *Structural Research Series*, n°. 460, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1979.
- [18] J. Moehle y M. Sozen, "Experiments to study earthquake response of R/C structures with stiffness interruptions," *Structural Research Series*, n°. 482, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1980.
- [19] T. Healey y M. Sozen, "Experimental study of the dynamic response of a ten-story reinforced concrete frame with a tall first story," *Structural Research Series*, n°. 450, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1978.
- [20] J. Moehle y M. Sozen, "Earthquake simulations tests of a ten-story reinforced concrete frame with discontinued first-level beam," *Structural Research Series*, n°. 451, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1978.
- [21] H. Ceceen, "Response of ten-story reinforced concrete model frames to simulated earthquakes," *Ph.D. thesis*, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1979.
- [22] A. Schultz, "An experimental and analytical study of the earthquake response of R/C frames with yielding columns," *Ph.D. thesis*, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1985.
- [23] S. Wood, "Experiments to study the earthquake response of concrete frames with setbacks," *Ph.D. thesis*, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1986.
- [24] M. Eberhard y M. Sozen, "Experiments and analyses to study the seismic response of reinforced concrete frame-wall structures with yielding columns," *Structural Research Series No. 548*, Univ. of Illinois, Urbana, Illinois, 1989.
- [25] NEEShub, "The George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation," [En línea], Disponible: <https://nees.org/warehouse>, 2017.
- [26] CESMD, "Center for engineering strong motion data," USGS, CGS, ANSS. [En línea], Disponible: <https://www.strongmotioncenter.org>, 2017.
- [27] R. Drake y R. Bachman, "1994 NEHRP Provisions for Architectural, Mechanical, and Electrical Components," presentado en *Proceedings of the 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 1994.
- [28] R. Drake y R. Bachman, "Interpretations of instrumented building seismic data and implications for building codes," presentado en *Proceedings of the 1995 SEAOC Annual Convention*, 1995.
- [29] R. Goel y A. Chopra, "Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings," *Journal Structural Engineering*, ASCE, vol. 123, N°. 11, pp. 1454-1461, 1997.

Complemento de VS.NET para la definición óptima de pruebas de *software* de caja negra mediante arreglos de cobertura*

Jaime Herney Meneses Ruiz**

Eduar Alexis Peña Velasco***

Carlos Alberto Cobos Lozada****

Jimena Adriana Timaná Peña*****

José Torres-Jiménez*****

Recibido: 31/03/2016 • Aceptado: 16/03/2018

<https://doi.org/10.22395/riium.v17n33a6>

Resumen

Las pruebas de *software* pueden llegar a superar el 50 % del costo total de un proyecto de *software*, motivo por el cual las empresas necesitan una alternativa que permita reducir su costo y el tiempo de su realización. Esta investigación propone el uso de unas estructuras combinatorias conocidas como arreglos de cubrimiento (CA) y arreglos de cubrimiento mixtos (MCA), que garantizan la detección hasta del 100 % de los errores con una mínima cantidad de pruebas. Con este enfoque, se desarrolló un complemento de *Visual Studio.NET* para la optimización de las pruebas y se evaluó su uso con estudiantes de último semestre de Ingeniería de Sistemas y de una empresa de *software*. Los resultados obtenidos son prometedores y motivan al grupo de investigación a divulgar su trabajo en el nivel nacional. El proyecto de investigación fue financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca.

Palabras clave: casos de prueba; pruebas combinatorias; arreglos de cubrimiento; arreglos de cubrimiento mixtos; recocido simulado; complemento de .Net.

* Artículo derivado del proyecto investigación VRI-4192 financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca y ejecutado entre 2015 y 2016.

** Ingeniero de Sistemas. Universidad del Cauca. Grupo de I+D en Tecnologías de la Información (GTI). Sector Tulcán, edificio FIET, Oficina 422, Popayán, Cauca, Colombia. Teléfono: (+57) 3138689529. Correo electrónico: jmeneses7@unicauca.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3010-3962>

*** Ingeniero de Sistemas. Universidad del Cauca. Grupo de I+D en Tecnologías de la Información (GTI). Sector Tulcán, edificio FIET, Oficina 422, Popayán, Cauca, Colombia. Teléfono: (+57) 3113709132. Correo electrónico: alexisp@unicauca.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0138-3376>

**** Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad del Cauca. Grupo de I+D en Tecnologías de la Información (GTI). Sector Tulcán, edificio FIET, Oficina 422, Popayán, Cauca, Colombia. Teléfono: (+57) 3007379062. Correo electrónico: ccobos@unicauca.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6263-1911>

***** Maestría en Computación. Universidad del Cauca. Grupo de I+D en Tecnologías de la Información (GTI). Sector Tulcán, edificio FIET, Oficina 444, Popayán, Cauca, Colombia. Teléfono: (+57) 3006553149. Correo electrónico: jtimana@unicauca.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1587-534X>

***** Doctor en Ciencias Computacionales. Cinvestav Tamaulipas. Parque Científico y Tecnológico Tecnotam km. 5.5 carretera Cd. Victoria-Soto La Marina C.P. 87130 Cd. Victoria, Tamps, México. Correo electrónico: jtj@cinvestav.mx. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5029-5340>

VS.Net Add-on for Optimal Definition of Black Box Software Testing Using Covering Arrays

Abstract

Software testing can exceed 50% of the total cost of a software project, which is why companies need an alternative to reduce their cost and time of implementation. This research proposes the use of combinatorial structures known as *Covering Arrays (CA)* and *Mixed Covering Arrays (MCA)*, which guarantee the detection up to 100% of errors with a minimum amount of testing. With this approach, a Visual Studio.NET add-on was developed for the optimization of the tests and its use was evaluated with students of last academic term of Computer Science Engineering and of a software company. The results obtained are promising and motivate the research group to disseminate its work at the national level. The research project was funded by the Vice-Principal Office of Research of the Universidad del Cauca.

Keywords: test cases; combinatorial tests; covering arrays; mixed covering arrays; simulated annealing; .Net complement.

Complemento de VS.Net para a definição ideal de testes de software de caixa-preta por meio de *covering arrays*

Resumo

Os testes de software podem superar 50% do custo total de um projeto de software, motivo pelo qual as empresas precisam de uma alternativa que permita reduzir seu custo e o tempo de sua realização. Esta pesquisa propõe o uso de algumas estruturas combinatórias conhecidas como *covering arrays (CA)* e *mixed covering arrays (MCA)*, que garantem a detecção de até 100% dos erros com uma quantidade mínima de testes. Com esse enfoque, desenvolveu-se um complemento de *Visual Studio.NET* para a otimização dos testes e avaliou-se seu uso com estudantes do último semestre de Engenharia de Sistemas e de uma empresa de software. Os resultados obtidos são prometedores e motivam o grupo de pesquisa a divulgar seu trabalho nacionalmente. O projeto de pesquisa foi financiado pela Vice-reitoria de Pesquisas da Universidad del Cauca.

Palavras-chave: casos de teste; provas combinatórias; covering arrays; mixed covering arrays; recozimento simulado; complemento de .Net.

INTRODUCCIÓN

Para asegurar un producto con calidad, las empresas de desarrollo de software deben realizar una serie de pruebas que garanticen su óptimo funcionamiento antes de entregar el software al usuario final. Existen dos estrategias básicas que pueden ser usadas para diseñar pruebas: pruebas de caja negra y pruebas de caja blanca [1]. Las primeras son las de interés de la presente investigación. Estas pruebas son seleccionadas a partir de las especificaciones funcionales del software [2], en las que se proporcionan las entradas al componente software que se va a probar, se realiza la ejecución del componente y se determinan si las salidas producidas son equivalentes a las esperadas [3, 4].

Las pruebas de software son una de las tareas fundamentales y más costosas para el control de la calidad del software. Por lo general estas pruebas se realizan bajo limitaciones de tiempo y presupuesto. Como se evidencia en [5, 6] el costo de realizar pruebas puede llegar a superar el 50 % del costo total del desarrollo del producto, motivo por el cual la comunidad científica ha enfocado sus esfuerzos en la investigación de técnicas que permitan optimizar este proceso [7]. Aunque los resultados de investigación se han empezado a adoptar de forma gradual en la industria del software, todavía existe una gran brecha entre los sistemas de prueba de software y la necesidad de las empresas por disminuir los costos y el tiempo de aplicación de los casos de prueba.

En términos generales, los casos de prueba se generan a partir de la información presente en algún artefacto como los modelos, documentos de especificación de requisitos, código fuente, estructura del programa o información obtenida en tiempo de ejecución [5]. En [8] se muestran diferentes algoritmos de búsqueda para la construcción de casos de prueba. Normalmente, los casos de prueba son generados empíricamente por un experto y sin usar un método formal, lo cual termina en pérdidas de tiempo y dinero [5].

Las pruebas de software exhaustivas permiten probar un componente en su totalidad. Sin embargo, es una tarea poco práctica, costosa y que consume demasiado tiempo ya que genera un número elevado de casos de prueba debido a las múltiples combinaciones a las que da lugar [9].

Como estrategia alternativa a las pruebas exhaustivas se encuentran las pruebas combinatorias, las cuales definen un conjunto de pruebas más pequeño, que es comparativamente más fácil de administrar y ejecutar y que, una vez identificadas correctamente, permiten tener una máxima cobertura en la prueba [10].

Uno de los objetos combinatorios que satisfacen este tipo de pruebas son los arreglos de cobertura (CA) y los arreglos de cobertura mixtos (MCA) [11]. Un CA es un objeto matemático útil para el desarrollo de pruebas funcionales que busca asegurar la inexistencia de errores en el software a través de la generación del menor número de casos de prueba que cubran todos los conjuntos de interacciones de los parámetros de entrada de un procedimiento, función o unidad lógica de software [12]. El uso de CA y MCA reduce costos y esfuerzos y aumenta significativamente la efectividad de las pruebas de software [13].

Por otro lado, la realidad de las empresas de desarrollo de software en Iberoamérica, muestra que la gran mayoría de ellas: i) en general están conformadas por equipos pequeños [14], ii) no cuentan con el personal suficiente como para hacer las pruebas de forma exhaustiva y iii) carecen de una herramienta automática para hacer la traducción de los datos de prueba reales a CA o MCA y viceversa y además, esta funcionalidad no está incluida en el entorno integrado de desarrollo (Integrated Development Environment, IDE) que usan en la construcción de sus aplicaciones. De allí surge la necesidad de disponer de un complemento software que se vincule a un IDE y que permita el uso de CA y MCA para el diseño de pruebas de caja negra, optimizando el proceso de pruebas de calidad en las empresas colombianas.

Por lo anterior, en esta investigación se presenta una alternativa de solución ante la necesidad de optimizar la tarea de generación de casos de prueba, realizándolas en menos tiempo, con menos esfuerzo y con la más alta probabilidad de detectar fallos que el software pueda presentar. Aunque actualmente existen programas como JUnit o NUnit, para facilitar la pruebas de software, ninguno utiliza los CA como base para crear los casos de prueba, ahí radica la diferencia de este trabajo con lo existente, puesto que al usar esta estructura se garantiza que cada dupla, tripleta, cuarteto, quinteto o sexteto (fuerza de interacción 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente) de parámetros se prueba por lo menos una vez, lo que garantiza la detección hasta del 100 % de los fallos según la evidencia empírica mostrada en [6, 15, 16].

A continuación, en la sección 1 se presenta un resumen del proceso desarrollado en la investigación. Luego, en la sección 2 se describe el complemento desarrollado y sus componentes, que incluyen el posoptimizador, la adaptación del algoritmo de recocido simulado y las principales interfaces. Después en la sección 3, se muestran los resultados obtenidos de la evaluación del complemento con pruebas alfa y beta, realizadas con estudiantes universitarios y *tester* de una empresa de software de Popayán (Colombia) respectivamente. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones de la investigación y el trabajo futuro que el grupo de investigación espera desarrollar en el área.

1. PROCESO INVESTIGATIVO

Para el desarrollo de esta investigación se llevaron a cabo cuatro fases basadas en instancias del patrón de investigación iterativo (Iterative Research Pattern). En dicho patrón se tienen en cuenta cuatro etapas básicas que son: observación del problema, identificación del problema, construcción de la solución y evaluación de la solución.

En la primera fase, se trabajó en la definición de un algoritmo de posoptimización de CA o MCA y la comparación de sus resultados obtenidos con los reportados en el estado del arte. La importancia del algoritmo de posoptimización radica en que cuando se busca en un repositorio de arreglos de cobertura un CA o MCA específico es posible que este no se encuentre. En este caso se puede proceder de dos formas: la primera, consiste en ejecutar un algoritmo (normalmente metaheurístico, voraz, aproximado o exacto) que lo cree desde cero, lo cual puede involucrar un alto costo computacional y de tiempo; y la segunda, se puede tomar un CA o MCA del repositorio que lo contenga, es decir que cuente con más columnas (parámetros o factores) del que se está buscando, se le eliminan las columnas que no se requieren y finalmente, se le eliminan tantas filas como sea posible manteniendo las características del CA o MCA requerido. Esta segunda forma de proceder es menos costosa computacionalmente y en tiempo, aunque no siempre garantiza la construcción de un CA o MCA óptimo (menor número de filas posible), y resume las tareas principales de un algoritmo de posoptimización de CA o MCA.

En la segunda fase se trabajó en la adaptación de un algoritmo de recocido simulado del estado del arte para la creación fuera de línea de un CA o MCA específico desde cero. Buscando que se enriquezca el repositorio de CA o MCA, cada solicitud de posoptimización (no se encontró el CA o MCA específico y se tuvo que posoptimizar uno más grande del repositorio, lo que conllevó a entregar una respuesta rápida que posiblemente no es la óptima) se encola para luego, fuera de línea, poder encontrar con este algoritmo, los CA O MCA óptimos y usarlos en futuras solicitudes de los *testers*.

En la tercera fase se diseñó e implementó el complemento como tal usando desarrollo rápido de aplicaciones (DRA) como proceso de desarrollo. Esto incluyó la organización del repositorio, el servicio web, las interfaces de usuario y un codificador-decodificador que se encarga de traducir las necesidades del *tester* en un CA o MCA y viceversa.

Finalmente, en la cuarta fase se realizó la evaluación del complemento con una prueba alfa con estudiantes de Ingeniería de Sistemas de últimos semestres y dos pruebas beta con *testers* de una empresa de software de Popayán, y el correspondiente desarrollo de las mejoras al complemento con base en los comentarios recibidos en cada una de las pruebas. Al finalizar cada fase se realizó la documentación del proceso a la fecha y se planeó el desarrollo de la siguiente fase.

2. COMPLEMENTO DESARROLLADO

El complemento de Visual Studio.Net (VS.Net) se desarrolló por componentes: un algoritmo de posoptimización, la interfaz gráfica de usuario (GUI) que se usa dentro del VS.Net, un codificador-decodificador, un repositorio (base de datos SQL-Server) y un servicio web que permite la comunicación entre el complemento en el lado del cliente (VS.Net) y el repositorio en el lado del servidor. En la figura 1 se explica la dinámica de los componentes cuando un *tester* lo usa.

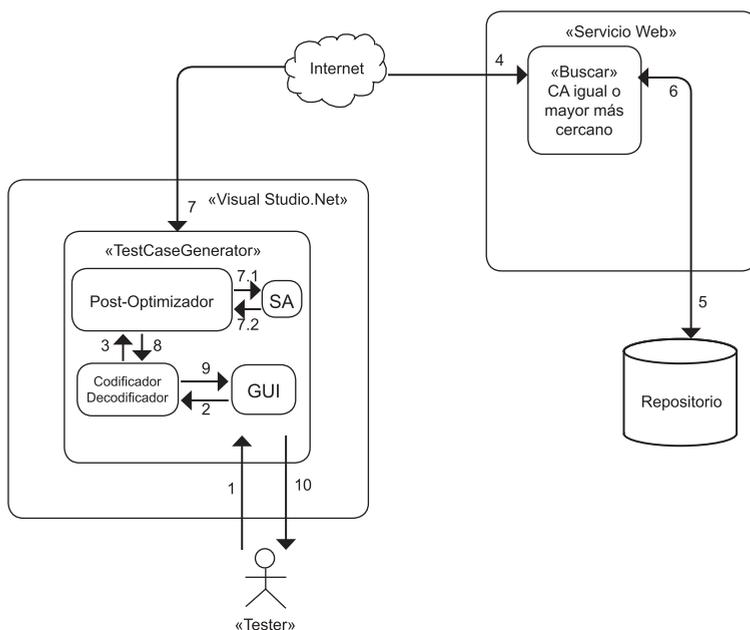


Figura 1. Esquema del prototipo para la generación de casos de prueba

Fuente: elaboración propia

El *tester* utiliza la interfaz gráfica de usuario (GUI) para cargar un archivo .EXE o .DLL (que contiene las clases con los métodos que se van a probar) y selecciona el método que desea probar, luego selecciona la fuerza de interacción (valor de t para la CA o MCA a usar, el cual determina el nivel de exhaustividad de los casos de prueba que se generarán) y configura los valores de entrada para cada variable (paso 1 de la figura 1). El complemento transforma las entradas usando el codificador-decodificador y a través de los otros componentes busca en el repositorio un CA o MCA acorde a esa necesidad, si lo encuentra lo recupera y lo utiliza, de lo contrario busca el más cercano (uno que lo subsuma) y lo adapta (paso 2 de la figura 1).

El codificador-decodificador solicita al posoptimizador, el CA o MCA apropiado a las necesidades del *tester* (paso 3), el posoptimizador solicita al servicio web dicho

CA o MCA (paso 4), el servicio web busca en el repositorio y entrega el más apropiado (paso 5). Cuando el posoptimizador recibe el CA o MCA (pasos 6 y 7) el optimizador pone a correr el algoritmo de recocido simulado (Simulated Annealing, SA) en el trasfondo (*background*) para encontrar un mejor CA o MCA para futuras pruebas (este paso es opcional y se ejecuta solo si es requerido, pasos 7.1 y 7.2), luego, se realiza el proceso de posoptimización si el CA o MCA recibido es más grande (subsume) que el verdaderamente requerido y entrega el resultado al codificador-decodificador (paso 8).

Cuando el posoptimizador reporta el CA o MCA requerido se transforma en casos de prueba mediante el uso del codificador-decodificador que reemplaza cada fila en un caso de prueba con los valores configurados y los muestra al *tester* (paso 9). El *tester* los visualiza, configura cada uno de los valores esperados que retorne el método y los guarda. Por último, el complemento genera el código fuente para copiar y pegar directamente sobre un proyecto de pruebas NUnit u otro (paso 10).

2.1 El Posoptimizador

El proceso de posoptimización tiene como objetivo reducir un CA de fuerza t y de alfabeto $V1$ hasta uno de fuerza t y alfabeto $V2$, donde $V2 < V1$. La reducción se realiza con los pasos presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Descripción del método de posoptimización

1. Leer el CA de alfabeto $V1$ tomado del repositorio y ubicarlo en una matriz C de $N \times K$, donde N y K son respectivamente, el número de filas y columnas del CA.
2. Pasar la matriz C al alfabeto requerido ($V2$), dejando en cada columna solo el valor máximo permitido (valores válidos en esa columna) y convirtiendo los números que no pertenecen al alfabeto (mayores a $V2$), en comodines (simbolizados con un guion).
3. Borrar las filas que tienen más de $K - t$ comodines, es decir que no cumplen con la fuerza t .
4. Borrar las filas repetidas y ordenar la matriz según la cantidad de comodines, dejando de últimas las filas con mayor número de comodines.
5. Arrancando desde la última fila de la matriz C , repetir el siguiente proceso fila por fila mientras no se haya llegado hasta la primera fila de la matriz C y además se siga disminuyendo la cantidad de filas en la matriz C .
 - 5.1. Crear o actualizar la lista de combinaciones repetidas.
 - 5.2. Buscar comodines de acuerdo con la lista de combinaciones repetidas.
 - 5.3. Borrar filas repetidas y ordenar por cantidad de comodines.
 - 5.4. Tomar parejas de filas y representarlas en una sola de ser posible.

Fuente: elaboración propia.

2.2 El algoritmo de recocido simulado (SA)

El recocido simulado o *Simulated Annealing* (SA) es una técnica de optimización estocástica de propósito general que surge de una analogía con el proceso de calentamiento y enfriamiento de metales usado en la industria para obtener materiales más resistentes y con mejores cualidades [17].

En el año 2003, Cohen *et al.* [18] aplicaron el algoritmo de SA para la construcción de arreglos de cobertura. Los resultados de esta investigación evidenciaron que SA permite construir CA más pequeños que otros métodos empleados para el mismo fin. Hoy en día los CA y MCA generados a partir de SA y sus posteriores refinamientos y variaciones han proporcionado los resultados más precisos y competitivos a la fecha [19].

La implementación computacional de esta técnica requiere de tres parámetros: temperatura inicial T_0 , temperatura final T_f y el grado de enfriamiento α ($0 < \alpha < 1$). Para iniciar con el proceso del recocido simulado, la temperatura T_f se establece como T_0 , posteriormente en cada ciclo de repetición se asigna αT_i a cada iteración T_{i+1} hasta lograr el valor de T_f . Basado en la analogía de los cambios de estado del metal en el algoritmo se presentan como S_i con energía E_i y cada cambio de estado se produce por medio de perturbaciones, representados como S_j con energía E_j . Si S_j con energía E_j es menor que S_i con energía E_i , se establece ese nuevo estado, de lo contrario S_j es sometido a una probabilidad para poder ser aceptado (probabilidad = $e^{-\frac{(E_j - E_i)}{Kb \cdot T_i}}$, donde Kb es la constante de Boltzmann). Por último, se define L como un cuarto parámetro, que define el número de perturbaciones realizadas sobre la temperatura T_i .

Para lograr que el algoritmo no quede en un ciclo infinito, este termina su ejecución si se encontró una solución deseada, si la temperatura final fue alcanzada o si la mejor solución (solución global) en el conjunto de soluciones no cambia [17].

En esta investigación se realizó una adecuación del método de recocido simulado propuesto en [20] junto con dos funciones de vecindad que permiten el hallazgo de nuevas y mejores soluciones para los CA. Las funciones utilizadas se denominan *NF1* y *NF2*, donde *NF1* recoge una t -tupla faltante del CA al azar e intenta establecerla en la primera fila elegida de manera aleatoria en la matriz, permitiendo mejorar la solución actual y *NF2* selecciona al azar $2t$ celdas de la matriz y evalúa todos los posibles cambios de símbolo de las celdas seleccionadas, estableciendo solo el primer cambio de símbolo que permite mejorar la solución actual y, dado el caso de la no existencia de tal cambio de símbolo, se aplica el cambio que genera el mejor vecino. La función de vecindad *NF2* también busca comodines en las celdas seleccionadas y establece un símbolo al azar en sus correspondientes celdas.

En el proceso de búsqueda, *NF1* se utilizó con una probabilidad p y *NF2* con una probabilidad $(1 - p)$. Donde p varía entre 0,55 y 0,85. De acuerdo con lo expresado en [20], se determina que para un óptimo funcionamiento del recocido simulado, las variables se definen con un valor inicial de: a) $T_0 = 1$; b) $\alpha = 0,99$; c) $L = Nkv^2$, d) $T_f = 0,0000000001$; e) $FF = 33$; y f) $kmax = t + 1$. En la tabla 2 se presenta en pseudo-código la adaptación del algoritmo de recocido simulado y las funciones de vecindad mencionadas.

Tabla 2. Adecuación del algoritmo de recocido simulado y funciones de vecindad

```

Función RecocidoSimulado: retorna booleano
Entradas: Matriz cRecibido, arreglo v, entero n, entero k, entero t, real probabilidad
Matriz Ca, C, C', C''
p ← probabilidad
T ← 0, T0 ← 1, Tf ← 0.0000000001, α ← 0.99
L ← nkv2, k' ← 0
FC ← 0, FF ← 33, Kmax ← t+1
Ca ← copiarC (cRecibido, n, k)
C ← copiarC (cRecibido, n, k)
evalC ← getTamañoFaltantes (), evaluarActual ← evalC+1
para i ← 1 hasta 2 Con paso 1 haga
    mientras (T > Tf y f (Ca, n, k, v, t) > 0 y FC < FF y evaluarActual != 0) haga
        para j ← 0 hasta L y evaluarActual != 0 Con paso 1 haga
            rand ← random ()
            si (rand < p) entonces C'' ← NF1 (C', n, k, v, t, k', evaluarActual)
            sino C'' ← NF2 (C', v, evaluarActual, n, k, t, k')
            min ← minimo (evaluarActual, evaluarC, temp) // aprendizaje de Boltzmann
            si (rand < min o evaluarActual < evaluarC) entonces
                C ← copiarC (C'', n, k)
                evalC ← evaluarActual
                k' ← 0
            sino
                k' ← k'+1
            fin
            si (f (C, n, k, v, t) < f (Ca, n, k, v, t)) entonces
                Ca ← copiarC (C, n, k)
                FC ← 0
            fin si
            si (k' < kmax) entonces k' ← 0
        fin para
        T ← T * α
        FC ← FC + 1
    fin mientras
fin para
cRecibido = Ca
si (TestCA (Ca, v, n, k, t)) entonces retorne verdadero
sino retorne falso

```

Fuente: elaboración propia

2.3 Interfaz gráfica de usuario (GUI)

El complemento desarrollado está disponible para Visual Studio.Net en sus versiones 2010, 2012 y 2013. La figura 2 muestra la interfaz donde el *tester* selecciona la clase y el método a probar, define además los parámetros y los valores que se tomarán como prueba y los botones de generación de pruebas. Además, permite gestionar las pruebas que se han desarrollado previamente.

La figura 3 muestra la interfaz que usa el *tester* para personalizar la prueba con el CA o MCA recibido. Allí define los valores esperados para cada caso de prueba y en la parte derecha puede seleccionar y copiar el código generado por el complemento.

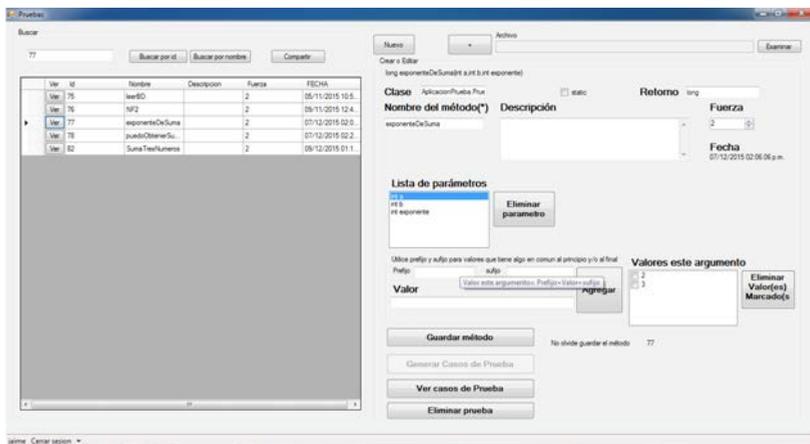


Figura 2. Interfaz principal para la configuración y gestión de pruebas

Fuente: elaboración propia

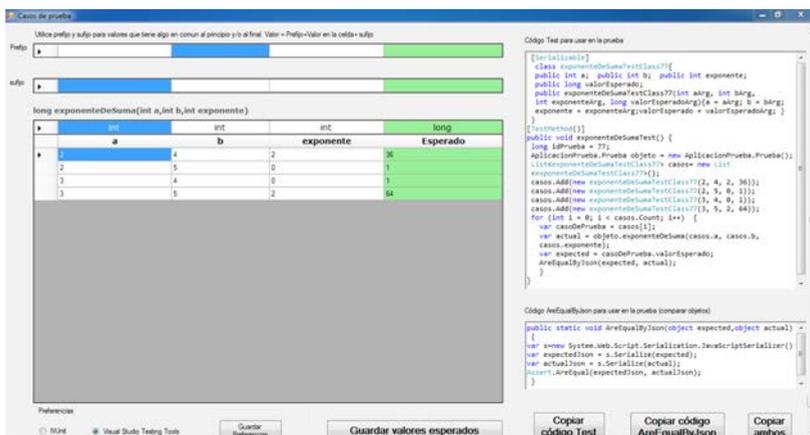


Figura 3. Interfaz para configurar parámetros de salida, valores esperados y copiar código fuente

Fuente: elaboración propia

3. RESULTADOS Y EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la adaptación de los CA y MCA utilizados por el complemento, comparándolos con los existentes en el repositorio de CA (actualmente privado) del Cinvestav (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México) en Tamaulipas. Luego, se muestran los resultados de la experimentación que se realizó con un conjunto de estudiantes de los últimos semestres del programa de Ingeniería de Sistemas en la Universidad del Cauca y el grupo Ideti, empresa perteneciente a la incubadora Cluster CreaTIC de Popayán.

3.1 Evaluación del posoptimizador

Teniendo en cuenta que el complemento es una aplicación que debe operar en tiempo real y requiere resultados rápidos, el repositorio se pobló inicialmente con CA y MCA con los alfabetos más comúnmente utilizados, a saber, entre 3 y 10 parámetros (k) y fuerza de interacción (t) entre 2 y 6.

En la tabla 3 se realiza una comparación de los MCA reportados por el Cinvestav y los adaptados por el método de recocido simulado y posoptimización propuestos en esta investigación. Se evidencia que, en promedio, los MCA reportados por el Cinvestav

Tabla 3. Comparación de resultados entre los MCA reportados en el Cinvestav y los adaptados con el algoritmo de posoptimización propuesto

<i>Id</i>	<i>MCA</i>	<i>t</i>	<i>Reportados Cinvestav</i>	<i>Adaptados</i>	<i>Diferencia</i>	<i>%</i>
1	3 ³ 2 ³	2	9	9	0	0,00
2	6 ¹ 5 ⁵	2	30	34	4	13,33
3	6 ⁴ 5 ²	2	37	45	8	21,62
4	6 ⁵ 5 ¹	2	39	46	7	17,95
5	5 ¹ 3 ⁴	3	45	45	0	0,00
6	4 ¹ 3 ⁴	2	12	12	0	0,00
7	4 ¹ 2 ⁸	2	8	8	0	0,00
8	4 ³ 3 ⁵	2	16	16	0	0,00
9	4 ⁵ 3 ⁴	2	19	19	0	0,00
10	4 ⁶ 3 ³	2	20	20	0	0,00
11	4 ⁶ 3 ⁴	2	20	22	2	10,00
12	5 ¹ 4 ⁵	2	20	20	0	0,00
	Total		275	296	21	7,63

Fuente: elaboración propia

son mejores en un 7,63 %. El hecho de tener unos resultados menos favorables se debe a que el objetivo de esta investigación (contrario al del Cinvestav) no consiste en conseguir el mejor CA o MCA, sino obtener un buen resultado en poco tiempo y con una máquina accesible para cualquier empresa. Además, la máquina involucrada para la creación de los CA y MCA del Cinvestav consta de un *cluster* con las siguientes características: 11032GB de RAM, 4244 cores CPU, disco duro de 54TB y sistema operativo Linux, mientras que la utilizada para la adaptación de los CA y MCA en la presente investigación fue un PC de escritorio con las siguientes especificaciones: 4GB de RAM, un disco duro de 1TB, un procesador Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU y un sistema operativo Windows 7 de 64bits.

3.2 Pruebas realizadas con estudiantes y el grupo Ideti

Con el propósito de poner a prueba el prototipo funcional del complemento, se realizó un experimento en dos salas de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca con 22 estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas, en el marco de las pruebas alfa y dos pruebas en las instalaciones del Cluster CreaTIC (Popayán) con ocho ingenieros del grupo Ideti, en el marco de las pruebas beta.

El experimento de la prueba alfa se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se presentó una breve introducción de lo que se iba a realizar en la prueba y se entregaron todos los insumos.
- Los participantes realizaron una primera prueba utilizando un video como guía de aprendizaje para interiorizar todos los pasos.
- Se importó una clase desde un archivo DLL y se realizaron los casos de prueba para cada uno de los métodos.
- Se realizó una encuesta final a cada *tester*, con preguntas abiertas y cerradas.

La prueba evalúa los siguientes parámetros: facilidad de uso, tiempo para ingresar los parámetros de entrada (configurar prueba), tiempo de respuesta, cantidad de errores detectados sobre el ejecutable probado. Para proceder con la evaluación se realizó una encuesta para conocer la satisfacción de los participantes en los experimentos. En la tabla 4 se muestra cada una de las características evaluadas. En la prueba alfa con los estudiantes se evaluaron las primeras once características, luego con la inclusión de las mejoras se agregaron tres características más para completar las catorce de la tabla. Las características se evaluaron usando entre dos y cinco opciones posibles usando la semántica apropiada para cada característica, por ejemplo, para la característica 1 relacionada con el “Grado de satisfacción en la realización de la prueba”, las

Tabla 4. Características evaluadas y nomenclatura de colores

N°	Pregunta				
1	Grado de satisfacción				
2	Comparación con otra herramienta				
3	Aseguran volver a utilizar la herramienta				
4	Recomendaría la herramienta				
5	La herramienta cubre las necesidades				
6	Fácil de usar				
7	Complejidad				
8	Rapidez en tiempo de respuesta				
9	Tiempo usado en comparación con otra herramienta				
10	Cantidad de errores detectados sobre el ejecutable				
11	Tiempo usado para configurar la prueba				
12	La nueva versión es				
13	Es visible el funcionamiento del campo prefijo y sufijo				
14	Son visibles los datos del método que se está probando				
<i>Nomenclatura de colores</i>					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; text-align: center;">Favorable</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Intermedio</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">No sabe</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Desfavorable</td> </tr> </table>		Favorable	Intermedio	No sabe	Desfavorable
Favorable	Intermedio	No sabe	Desfavorable		

Fuente: elaboración propia

opciones fueron: completamente satisfecho, satisfecho, insatisfecho y completamente insatisfecho; mientras que la característica 3 que evalúa si el *tester* “Recomendaría la herramienta” cuenta solo con las opciones de sí y no.

En la figura 4 se observa que los resultados obtenidos en el experimento son favorables en los once aspectos en los que se enfocó la encuesta. Sin embargo, las barras color naranja evidencian que la herramienta no presenta algún cambio importante con respecto a otras herramientas y por último las barras rojas evidencian inconformidad por parte de los encuestados, esto se tomó como oportunidades de mejora. La información necesaria para conseguirlo se obtuvo mediante preguntas abiertas en las que el encuestado expresó libremente, lo que le gustó, lo que no le gustó y lo que cambiaría para mejorar. Lo cual se resumió en dos aspectos: i) cargar el ejecutable una vez y usarlo tantas veces como sea necesario, ii) permitir un prefijo para definir los valores de las variables y facilitar así la inclusión de los parámetros.

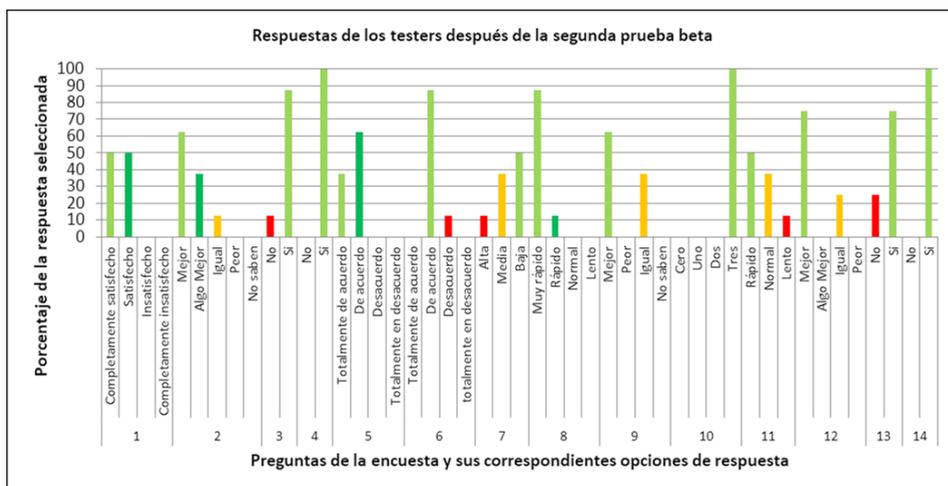


Figura 4. Gráfica que representa la información de la encuesta de los 22 estudiantes

Fuente: elaboración propia.

La primera prueba beta con el grupo Ideti implicó los mismos pasos del experimento de la prueba alfa con estudiantes y, adicionalmente, la interacción libre de los *testers* con el complemento. Como resultado, los *testers* solicitaron nuevas mejoras, a saber: i) ayudas y etiquetas a ciertos campos de la interfaz, ii) mejorar la forma como se configuran los valores esperados y parámetros de salida y iii) mostrar el tipo de error que se presenta, no solo que hay error.

En la figura 5 se muestran los resultados finales de la encuesta a los usuarios de Ideti luego de hacer las mejoras al complemento (ejecutadas ya las dos pruebas beta). Se puede observar que el complemento desarrollado obtuvo mejoría en su prototipo final, debido a que se corrigieron las falencias detectadas en el primer prototipo. Por otra parte, el grupo Ideti mostró conformidad con las pruebas realizadas a través del complemento desarrollado y aseguraron utilizarla en un futuro cercano en el desarrollo de sus proyectos software.

El único cambio que no se pudo desarrollar fue el relacionado con que el complemento muestre el tipo de error que se presenta, no solo que se presenta un error. Lo anterior debido a que dicho requisito desbordaba el alcance de la investigación y requiere otro tipo de técnicas, los CA y MCA en pruebas de caja negra no están diseñados para resolver este requisito.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El algoritmo de posoptimización propuesto para adaptar los CA o MCA del repositorio a los requerimientos de las pruebas cumplió con el objetivo y lo hizo de forma rápida, usando una máquina accesible para cualquier empresa.

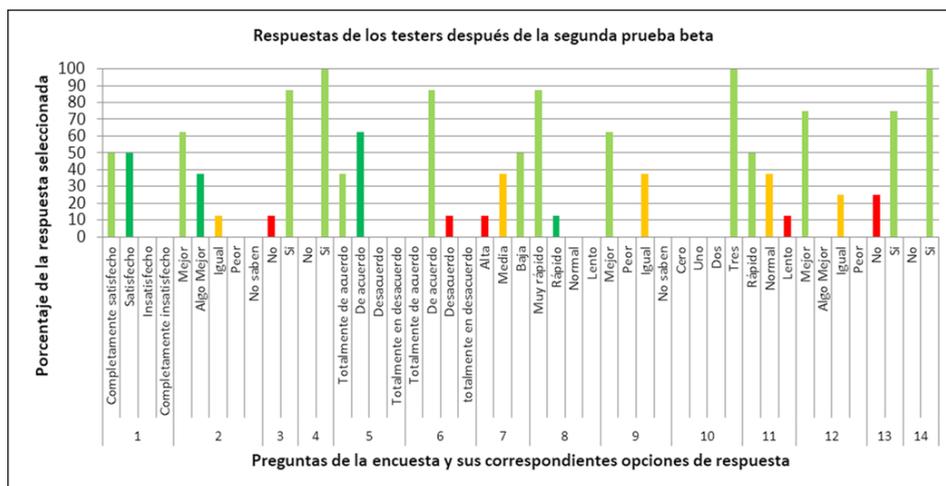


Figura 5. Gráfica que representa la información de la encuesta realizada al grupo Ideti al finalizar los ajustes sobre el complemento

Fuente: elaboración propia.

El grado de optimización del algoritmo propuesto en esta investigación es muy bueno, puesto que los CA y MCA obtenidos son muy similares a los mejores reportados por el Cinvestav, teniendo en promedio un 7,63 % de filas adicionales.

Se desarrolló un complemento (*plug-in*) para Visual Studio .Net capaz de soportar la generación de casos de prueba basados en arreglos de cobertura mediante el algoritmo de posoptimización propuesto y una adaptación del recocido simulado para mejorar los resultados.

Los resultados de la encuesta realizada a los *testers* del grupo Ideti sobre la versión final del complemento muestran un nivel de satisfacción alto con el complemento desarrollado.

Los estudiantes que contaban con experiencia en el desarrollo de pruebas unitarias antes de realizar la prueba alfa, aseguraron volver a utilizar el complemento en comparación con otras herramientas disponibles para soportar la misma tarea y destacaron la velocidad en el tiempo de respuesta y su facilidad de uso una vez hecho todo el proceso con el segundo método probado, dado que entendieron mejor la mecánica de su funcionamiento.

La estrategia de usar el algoritmo de posoptimización, el generar inmediatamente la respuesta y poner en *background* el algoritmo de recocido simulado dio buenos resultados, puesto que permite responder rápidamente, pero además permite encontrar un mejor CA o MCA para futuras pruebas que tengan necesidades similares.

El algoritmo de posoptimización propuesto utiliza solamente ‘operaciones válidas’, tales que cualquier modificación que se realiza no daña las propiedades de ser CA o MCA, de modo que mientras haya en el repositorio un arreglo capaz de cubrir la necesidad, siempre devolverá un resultado válido y con menos filas. Además, contar con un repositorio con CA y MCA prefabricados, permitió dar tiempo de respuesta aceptables para los *testers*.

Como trabajo futuro se espera entre otras cosas: i) incluir en el complemento la opción de configurar las pruebas con base en datos almacenados en un archivo de Excel, ii) mejorar la arquitectura del complemento y hacerlo disponible al público en general, iii) Hacer nuevas versiones (mejoradas) de los algoritmos de recocido simulado y posoptimización.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo en este artículo fue soportado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Cauca con el proyecto de investigación VRI-4192.

REFERENCIAS

- [1] I. Burnstein, *Practical software testing: a process-oriented approach*, Luxemburgo: Springer Science & Business Media, 2006.
- [2] J. Tuya, *et al.*, *Técnicas cuantitativas para la gestión en la ingeniería del software*, As Somozas: Netbiblo, 2007.
- [3] A. Mili y F. Tchier, *Software Testing: Concepts and Operations*, Nueva Jersey: Wiley Publishing, 2015.
- [4] S. Nidhra y J. Dondeti, “Black Box and White Box Testing Techniques –A Literature Review,” *International Journal of Embedded Systems and Applications (IJESA)*, vol. 2, pp. 29-50, 2012.
- [5] S. Anand, *et al.*, “An orchestrated survey of methodologies for automated software test case generation,” *Journal of Systems and Software*, vol. 86, pp. 1978-2001, 2013.
- [6] C. P. Jayaswal y T. U. o. T. a. Arlington, *Automated Software Testing Using Covering Arrays*, Texas: University of Texas at Arlington, 2006.
- [7] B. S. Ahmed, *et al.*, “The development of a particle swarm based optimization strategy for pairwise testing,” *Journal of Artificial Intelligence*, vol. 4, pp. 156-165, 2011.
- [8] A. Arcuri y X. Yao, “Search based software testing of object-oriented containers,” *Information Sciences*, vol. 178, pp. 3075-3095, 2008.
- [9] G. J. B. T. S. C. Myers, *The art of software testing, third edition*. Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

- [10] N. Changhai y H. Leung, "A Survey of Combinatorial Testing," *ACM Computing Surveys*, vol. 43, pp. 11-29, 2011.
- [11] S. A. Bestoun y K. Z. Zamli, "A review of covering arrays and their application to software testing," *Journal of Computer Science*, vol. 7, pp. 1375-1385, 2011.
- [12] H. Avila-George, *et al.*, *Verificación de Covering Arrays: aplicando la supercomputación y la computación grid*. Nueva York: Lambert Academic Publishing, 2010.
- [13] H. Avila-George y J. Torres-Jiménez, *Construction of Test-Suites*: Omniscriptum GmbH & Company Kg., 2015.
- [14] F. J. Pino, *et al.*, "Using Scrum to guide the execution of software process improvement in small organizations," *Journal of Systems and Software*, vol. 83, pp. 1662-1677, 2010.
- [15] D. R. Kuhn, *et al.*, "Software fault interactions and implications for software testing," *Software Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 418-421, 2004.
- [16] M. Brčić y D. Kalpić, "Combinatorial testing in software projects," presentado en *Proceedings of the 35th International Convention MIPRO*, 2012, pp. 1508-1513.
- [17] I. I. Márquez, *Construcción de Torres de Covering Arrays*. [En línea], Disponible: http://www.tamps.cinvestav.mx/defensa_2013_7, 2013.
- [18] M. B. Cohen, *et al.*, "Constructing test suites for interaction testing," presentado en the Proceedings of the 25th International Conference on Software Engineering, Portland, Oregon, 2003.
- [19] M. B. Cohen, *et al.*, "Constructing strength three covering arrays with augmented annealing," *Discrete Mathematics*, vol. 308, pp. 2709-2722, 2008.
- [20] A. Rodríguez-Cristerna and J. Torres-Jiménez, "A Simulated Annealing with Variable Neighborhood Search Approach to Construct Mixed Covering Arrays," *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 39, pp. 249-256, 2012.

Metodología de aprendizaje del sistema numérico binario basado en teoría de aprendizaje por descubrimiento*

Ómar Iván Trejos Buriticá**

Recibido: 27/06/2016 • Aceptado: 13/09/2017
<https://doi.org/10.22395/riium.v17n33a7>

Resumen

En el presente artículo se examinan los posibles cambios en el aprendizaje autónomo de estudiantes de primer semestre de Ingeniería de Sistemas y Computación a partir de la aplicación de la teoría de aprendizaje por descubrimiento, específicamente en la asimilación, apropiación, aplicación y retroalimentación del sistema numérico binario. La metodología utilizada corresponde al marco de la investigación educativa con carácter cualitativo, articulada con un estudio de casos simple, individual y múltiple. La investigación inicia con el anuncio de la teoría de aprendizaje que se va a utilizar y finaliza con la evaluación y retroalimentación entre docente y estudiantes a partir de los resultados cualitativo-cuantitativos obtenidos. Se utilizó como herramienta de apoyo la hoja electrónica Excel y se hizo un trabajo de segmentación del grupo de forma que se pudieran establecer criterios comparativos entre la metodología tradicional de enseñanza del sistema binario y la metodología basada en aprendizaje por descubrimiento. Los resultados evidencian un aprendizaje más significativo y con sentido por parte del grupo a quien se le aplicó la teoría del aprendizaje por descubrimiento. De la misma forma, se notó mayor independencia académica por parte de ese subgrupo de estudiantes y una confianza mayor en relación con el abordaje de temas desconocidos pero enmarcados dentro del conocimiento disciplinar propio de la Ingeniería de Sistemas.

Palabras clave: aprendizaje; aprendizaje por descubrimiento; metodología de aprendizaje; sistema binario; sistema numérico.

* Artículo derivado del proyecto de investigación *Desarrollo de un modelo metodológico para el aprendizaje de la programación imperativa en Ingeniería de Sistemas basado en aprendizaje significativo, aprendizaje por descubrimiento y en el modelo 4q de preferencias de pensamiento*, identificado con el código interno 6-16-13 de la Universidad Tecnológica de Pereira en Colombia y ejecutado entre enero de 2015 y diciembre de 2016.

** Ph. D., Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingenierías. Carrera 27 N.º 10-02, teléfono (+57) 63137300. Correo electrónico: omartrejos@utp.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3751-6014>

Learning Methodology of Binary Number System Based on Discovery Learning Theory

Abstract

This article examines the possible changes in the autonomous learning of first academic term students of Computer Science Engineering from the application of the theory of learning by discovery, specifically in the assimilation, appropriation, application and feedback of the binary numerical system. The methodology used corresponds to the framework of qualitative educational research, articulated with a simple, individual and multiple case study. The research begins with the announcement of the learning theory to be used and ends with the evaluation and feedback between teacher and students based on the quality-quantitative results obtained. The Excel spreadsheet was used as a support tool and the group was segmented so that comparative criteria could be established between the traditional teaching methodology of the binary system and the methodology based on learning by discovery. The results show a more significant and meaningful learning on the part of the group to which the theory of learning by discovery was applied. In the same way, it was noted greater academic independence on the part of this subgroup of students and a greater confidence in relation to the approach of unknown topics but framed within the disciplinary knowledge proper to Computer Science Engineering.

Keywords: learning; learning by discovery; learning methodology; binary system; numerical system.

Metodologia de aprendizagem do sistema numérico binário baseada na teoria de aprendizagem por descoberta

Resumo

No presente artigo, as possíveis mudanças na aprendizagem autônoma de estudantes do primeiro semestre de Engenharia de Sistemas e Computação são examinadas a partir da aplicação da teoria de aprendizagem por descoberta, especificamente na assimilação, apropriação, aplicação e retroalimentação do sistema numérico binário. A metodologia utilizada corresponde ao âmbito da pesquisa educativa com caráter qualitativo, articulada com um estudo de casos simples, individual e múltiplo. A pesquisa inicia com o anúncio da teoria de aprendizagem que será utilizada e finaliza com a avaliação e retroalimentação entre docente e estudantes a partir dos resultados qualitativos e quantitativos obtidos. A folha eletrônica Excel foi utilizada como ferramenta de apoio e realizou-se um trabalho de segmentação do grupo de forma que fosse possível estabelecer critérios comparativos entre a metodologia tradicional de ensino do sistema binário e a metodologia baseada em aprendizagem por descoberta. Os resultados evidenciam uma aprendizagem mais significativa e com sentido por parte do grupo no qual se aplicou a teoria da aprendizagem por descoberta. Da mesma forma, notou-se maior independência acadêmica por parte desse subgrupo de estudantes e uma maior confiança com respeito à abordagem de temas desconhecidos, mas pertencentes ao conhecimento disciplinar próprio da Engenharia de Sistemas.

Palavras-chave: aprendizagem; aprendizagem por descoberta; metodologia de aprendizagem; sistema binário; sistema numérico.

INTRODUCCIÓN

Alrededor de la enseñanza y el aprendizaje existen diversas teorías y modelos que pueden plantearse desde las ópticas más tradicionales hasta las más innovadoras [1]. Los docentes universitarios, desde diferentes enfoques, estilos y experiencias, han validado el hecho de que la práctica docente no puede establecer un modelo único que interprete y aplique de manera fidedigna toda su fundamentación teórica dado que mucho del quehacer docente depende de lo que sucede en el aula, el contexto escolar y extraescolar de cada uno de los estudiantes, la interacción y el nivel de aproximación y comunicación que se dé entre docente y estudiante, y otros factores que solo surgen cuando un curso ha comenzado y se va desarrollando a lo largo del tiempo [2].

Ha sido, pues, la enseñanza de la programación de computadores un espacio en donde múltiples enfoques, tendencias y visiones han coexistido en la búsqueda de propender por servir al estudiante el conocimiento tecnológico de manera que pueda ser asimilado por un camino cada vez más expedito. Tanto los enfoques didácticos como la orientación han establecido en la actualidad un marco suficientemente diverso que permite que el docente de programación de computadores pueda enriquecerse y nutrirse de una forma como nunca antes había sido posible en favor del logro de los objetivos de aprendizaje [3].

Por su parte, las matemáticas por su naturaleza problemática, siempre han ofrecido pasivamente un espacio de aplicación de la lógica y, de su mano, la búsqueda de soluciones a los problemas que las mismas matemáticas proveen. La tendencia a resolver problemas matemáticos a través de las posibilidades que brinda la programación de computadores se ha ido convirtiendo poco a poco en una necesidad pues, de esta forma se establecen nexos temáticos entre dos áreas de conocimiento fundamentales, en tiempos modernos, para el estudiante de ingeniería de sistemas y computación: matemáticas y programación, puesto que aquella provee los problemas y la forma de presentarlos formalmente, y esta provee posibles soluciones (para algunos de ellos) que pueden ser implementados a la luz de la tecnología computacional moderna [4]. Es conveniente aclarar que no todos los problemas que proveen las matemáticas son solucionables (o fácilmente solucionables) a través de la programación de computadores.

Tres modelos didácticos han imperado en la enseñanza de la programación [5]: el modelo llamado de la escalera semiótica que a partir del uso de lenguajes de programación e incorporación de instrucciones identifica una secuencia lógica bajo un marco sintáctico, con unos elementos semánticos y dentro de un contexto pragmático del lenguaje como su gran herramienta; el segundo modelo puede describirse a partir de objetivos de taxonomía cognitiva que categoriza las soluciones desde una clasificación

similar a la que fuera planteada y formulada como objetivos de Bloom; finalmente, el tercer modelo es el de la resolución de problemas que se aproxima mucho más a un modelo que fortalece el proceso de aprendizaje que a la estrategia misma de enseñanza [6].

Sin que sean la panacea, pero sabiendo que son fundamentos que propenden por facilitar el trabajo del docente universitario, es claro que estos modelos brindan una base sobre la cual la enseñanza de la programación puede acudir a una amalgama de ellos para lograr lo mejor en pro del proceso de aprendizaje por parte del estudiante. En estos modelos, de todas formas, subyacen dificultades en el aprendizaje de la programación, dificultades mismas en la enseñanza que cuestionan la necesidad de acudir a ellos o, mejor, de plantear las soluciones desde lo puramente formal tal como lo proveen las matemáticas, la necesidad de refinar y sintonizar los entornos de aprendizaje así como la competencia lectora que permita resolver problemas a partir de su correcta interpretación [7].

Este artículo es, precisamente, un ejemplo de la forma como se puede proponer una estrategia de enseñanza que acuda a lo mejor de estas situaciones tanto en lo didáctico como en lo práctico, lo académico y lo aplicativo, lo formal y lo tecnológico.

De otra parte, debe tenerse en cuenta que si la programación puede proveer soluciones a problemas que la matemática propone, entonces no es suficiente con que se llegue a un nivel excelso de conocimiento en la sintaxis y en los recursos del lenguaje de programación ni tampoco con que se conozca, con profundidad, la notación matemática y la expresión formal de planteamiento de los problemas [8]. Se requiere de ambos componentes para que la solución pueda visualizarse por parte del estudiante, mediados por una lógica de desarrollo de algoritmos y construcción de programas que permitan que ambas áreas de conocimiento puedan entenderse tal como se presenta en la figura 1.

Los resultados de la investigación ponen de presente que, en los procesos de aprendizaje de la programación, y específicamente en la resolución de problemas derivados de las matemáticas, no es suficiente el nivel sintáctico tecnológico, sino que debe acompañarse de un conocimiento conceptual junto con el uso de habilidades orientadas a la resolución de problemas computables, procesos de prueba, depuración de errores lógicos y puesta a punto del programa. Igualmente, se indica la importancia de poder mejorar en los alumnos la necesidad de la representación de modelos mentales, la descomposición de una solución algorítmica en unidades más simples y la autoevaluación de la apropiación de la lógica computacional en cada estudiante [9].

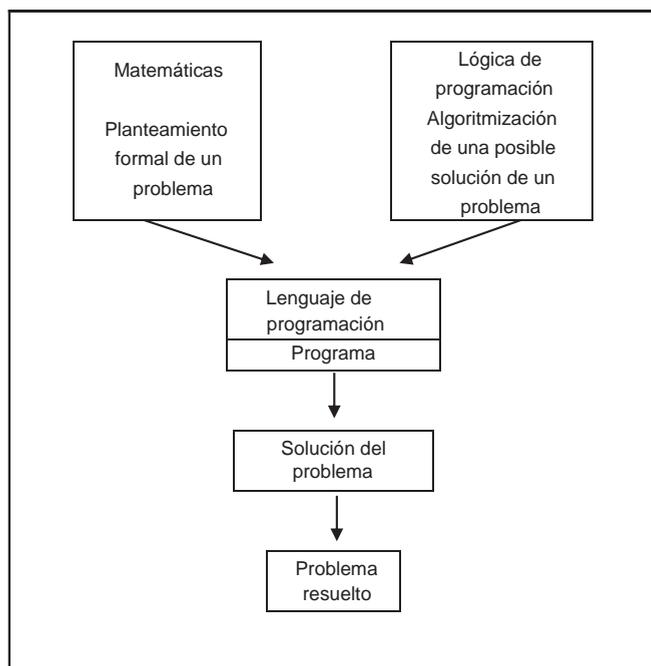


Figura 1. Relación matemáticas–lenguajes de programación

Fuente: elaboración propia

La problemática abordada en el presente artículo hace referencia a la necesidad de apoyarse en teorías de aprendizaje por parte de docentes de las áreas de ingeniería para hacer más efectiva su labor [10] y más alcanzables los logros de aprendizaje por parte de sus estudiantes. El aprendizaje del sistema numérico binario apoyado en la teoría del aprendizaje por descubrimiento, tal como lo evidencian los resultados, favorece el aprendizaje autónomo con responsabilidad, incrementa el nivel de comprensión y de análisis, posibilita la colaboración entre estudiantes y permite que ellos mismos construyan significado y sentido a partir de sus propias experiencias y elaboraciones mentales.

¿Es posible desarrollar una metodología que permita entender, apropiar, asimilar, aplicar y retroalimentar el sistema numérico binario a partir de la teoría de aprendizaje por descubrimiento? La respuesta a esta pregunta de investigación está contenida en el presente artículo que confirma no solo lo propuesto sino que, a partir de la opinión de los mismos estudiantes, plantea una estrategia que, llevada apropiadamente, puede llegar a optimizar el tiempo de aprendizaje en los estudiantes en estas temáticas. Fundamentalmente, el marco de referencia de esta investigación lo provee la teoría de aprendizaje por descubrimiento en un contexto tecnológico [11] y [12] y la teoría de

aprendizaje significativo [13] y su aplicación en el campo de la ingeniería de sistemas en el área de programación de computadores en la resolución de problemas matemáticos. La posición epistemológica de estos enfoques acude tanto a la necesidad consciente de crear en los estudiantes las capacidades de investigar de manera autónoma [14], de descubrir a partir de una buena fundamentación, de inferir y apropiarse nuevos conocimientos y de aprender tomando parte activa en su proceso de aprendizaje lo cual incluye autoevaluarse y automejorarse.

Este artículo es uno de los productos asociados al proyecto de investigación *Desarrollo de un modelo metodológico para el aprendizaje de la programación imperativa en Ingeniería de Sistemas basado en aprendizaje significativo, aprendizaje por descubrimiento y el modelo 4Q de preferencias de pensamiento* aprobado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira bajo el código 6-16-13.

1. TEORÍA

En términos matemáticos, un sistema numérico se puede definir como un conjunto de símbolos y reglas que pueden ser usados para representar, tanto datos numéricos como cantidades. Los sistemas numéricos se caracterizan por su base que es el valor que indica el número de símbolos distintos con los cuales se pueden representar las cantidades numéricas. Esa misma base es también el coeficiente que sirve para determinar el valor que corresponde a cada símbolo dependiendo de la ubicación que ocupe dentro de un número.

En las áreas de la aritmética, el álgebra, así como en el análisis matemático, un sistema numérico corresponde a un conjunto definido que está provisto de dos operaciones que, al tiempo, son las que verifican las condiciones relacionadas con tres leyes: la ley conmutativa, la ley asociativa y la ley distributiva. Esto nos da a entender que los sistemas numéricos poseen una estructura algebraica (la cual puede estar definida entre los conceptos de álgebra sobre un cuerpo monoide, anillo o estructuras modernas) [15]. Estos sistemas también satisfacen lo que en matemáticas se conocen como propiedades de orden, es decir, si son de buen orden o son de orden total y también tienen propiedades topológicas adicionales.

Desde una perspectiva más general, como lo posibilita la matemática, un conjunto que posea adición y multiplicación puede considerarse como un sistema numérico y es por ello que se incluyen entre estos a los números naturales, los números enteros, los números racionales, los números reales y los números complejos, sin desconocer que existen conjuntos que generalizan algunos de los sistemas numéricos enunciados anteriormente. Formalmente, tal como lo provee la notación matemática, no se ha

formulado una definición formal de lo que es un sistema numérico, pero se ha encontrado que todos los sistemas numéricos con operaciones binarias tienen propiedades comunes entre sí. Las dos operaciones que se definen son la adición y la multiplicación sin desconocer que la multiplicación es la expresión distributiva de la adición o que la multiplicación es una operación que consiste en la expresión de un conjunto de sumas abreviadas en su notación formal [16].

El sistema binario (que también se conoce como sistema diádico) se utiliza mucho en las ciencias de la computación y es un sistema de numeración en el cual los números se representan usando solamente dos dígitos: el uno (1) y el cero (0) [17]. A nivel de representación electrónica, es el sistema que se utiliza en los computadores dado que permite una asociación con los niveles de voltaje que, internamente, posibilita la representación de los datos.

Debe advertirse que, a nivel conceptual, en materia de computadoras, no es el único sistema que se utiliza en ciencias de la computación para referenciar determinados valores pues también están el sistema octal y el sistema hexadecimal. Un valor 1 representa la presencia de un voltaje específico y un valor 0 representa la ausencia de dicho voltaje (o para ser más precisos, representa un voltaje significativamente menor). Debido a esto, el valor 1 se asocia con un estado *encendido* o un voltaje *alto* y el valor 0 se asocia con un estado *apagado* o un voltaje *bajo* [18]. Existe una analogía directa entre el sistema decimal y el sistema binario.

Si bien la definición formal de sistema numérico establece que es suficiente con que se tengan definidas las operaciones de adición y multiplicación, es cierto también que las operaciones que aquí se describen constituyen el corpus complejo de las relaciones básicas que se pueden establecer entre estos sistemas de representación numérica. A nivel electrónico, el sistema binario solamente posibilita la adición. La multiplicación es un conjunto de adiciones sucesivas, la resta se implementa basándose en la suma y la división es un conjunto de restas sucesivas.

La teoría de aprendizaje por descubrimiento fue formulada y desarrollada por el pedagogo y psicólogo norteamericano Jerome Seymour Bruner dentro de un marco de índole constructivista que también se conoce como aprendizaje heurístico. Lo principal que se destaca de esta teoría es que se busca promover en el alumno (también conocido como aprendiente) la capacidad de adquirir los conocimientos por sí mismo [19] a partir de los nuevos conocimientos del saber disciplinar específico.

La teoría propone que, a partir de lo que el docente expone al estudiante, este debe descubrir progresivamente lo que falta o lo que sigue [19] y, de esta forma, ejerciendo su labor de descubrimiento, el conocimiento quedará ubicado en la memoria a largo plazo

pues tiene un significado y un sentido superior producto del esfuerzo del estudiante por acceder a él. El concepto de significado le confiere una utilidad adicional al nuevo conocimiento y por ello, aprendizaje por descubrimiento y aprendizaje significativo, son dos teorías que se requieren para lograr efectividad en la labor docente en propuestas como la que se expone en este artículo.

A juicio de Bruner, los estudiantes podían aprender mucho más si el proceso de aprendizaje es producto de un descubrimiento guiado que provenga de la exploración promovida por la curiosidad y la fascinación, dos elementos que el autor consideraba de vital importancia para generar motivación (tercer componente del aprendizaje significativo) y de esta forma poder aproximarse al aprendizaje autónomo [13]. Bruner también establece que el docente no tiene como papel, en el aula, la explicación de unos contenidos desde el inicio hasta su último tema, sino que debe buscar y aplicar estrategias que permitan estimular a sus estudiantes a través de mecanismos de observación, comparación, desarrollo de la capacidad de análisis, hallazgo de similitudes y divergencias y otros elementos que son los que, a la postre, permitirán descubrir.

Entre las ventajas que se han endilgado a la aplicación de la teoría de aprendizaje por descubrimiento, está el hecho de permitir la superación de las limitantes que implican las estrategias de aprendizaje tradicional (memorístico o mecanicista), facilitar la estimulación en los estudiantes para pensar por sí solos planteando hipótesis y tratando de verificarlas a través de métodos sistemáticos y aumentar la autoestima y la sensación de seguridad en los alumnos a partir de la búsqueda de soluciones creativas frente a problemas planteados.

Entre los críticos más enconados de la teoría del aprendizaje significativo se encuentra el también norteamericano David Paul Ausubel, quien aseguraba que existía una falsa visión sobre los beneficios de esta teoría dado que, según este autor, no necesariamente el aprendizaje por descubrimiento es absolutamente significativo ni la estrategia de aprender por recepción (memorístico) es necesariamente mecánica [13]. Todo dependerá de la información que captan los sentidos y procesa el cerebro sean almacenados dentro de la estructura individual cognitiva de cada estudiante.

2. METODOLOGÍA

Se ha acudido a estas teorías planteadas debido a que se encuentra gran relación entre sus planteamientos teóricos con el corpus académico que sustenta la teoría de la programación. La teoría del aprendizaje significativo ha sido útil para relacionar los conceptos de sistema numérico y, específicamente, de sistema binario con situaciones prácticas de la vida cotidiana que forman parte del contexto extrainstitucional de los estudiantes.

Por su parte, la teoría de aprendizaje por descubrimiento ha permitido que, tomando como base la fundamentación propia tanto del sistema decimal como del sistema “ternario”, el estudiante pueda inferir los conceptos propios del sistema binario tal que pareciera haberlo descubierto en los términos en los que las matemáticas los plantean. El sistema binario por lo tanto se convierte en un constructo propio del estudiante lo cual lo ubica, como objeto de conocimiento, en un espacio de memoria a largo plazo que le permite acudir a él con mayor facilidad que si se expone a los estudiantes en los términos tradicionales de la clase magistral [20].

La presente investigación se realizó con los grupos de Programación I del programa Ingeniería de Sistemas de la Universidad Tecnológica de Pereira durante los semestres académicos de los años 2014, 2015 y 2016 tal como se muestran en la tabla 1, con un total de 92 estudiantes.

Tabla 1. Estudiantes que participaron en la Investigación

<i>Año</i>	<i>Semestre</i>	<i>Cantidad de estudiantes</i>
2014	I	19
	II	22
2015	I	21
	II	20
2016	I	21
	II	19
	Total	122

Fuente: elaboración propia

La metodología que se desarrolló para la presente investigación consistió en siete fases que se describen en la tabla 2. Es de anotar que, para los efectos de obtener unos resultados más objetivos, se socializó con los estudiantes la metodología que se iba a adoptar, previo al inicio del proceso.

En relación con la forma como se realizó la aplicación de la teoría de aprendizaje por descubrimiento en el tema del sistema binario, la tabla 3 muestra la estrategia adoptada. Cada grupo se dividió en dos subgrupos de manera que con uno se realizó la exposición magistral tradicional indicando las características del sistema binario tal como se acostumbra a hacer en estos cursos. Con el otro subgrupo se realizó una exposición magistral sobre la base de un sistema llamado quinquenario, cuya base es 5.

Tabla 2. Descripción de fases de la metodología

<i>Fase</i>	<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>
1	Preámbulo	Se explicó a los estudiantes la investigación que se iba a realizar, las características, la teoría de aprendizaje que se iba a utilizar y los objetivos de la misma.
2	Caracterización	Se evaluó, a través de comunicación directa y evaluaciones impromptu, la posible caracterización de los estudiantes en tres niveles: estudiantes talentosos, estudiantes medianamente talentosos y estudiantes de bajo talento.
3	Segmentación	Se dividió el grupo de estudiantes en dos subgrupos ambos de 11 estudiantes. En ambos grupos se procuró que quedaran igual número de estudiantes tanto en cantidad como en caracterización de acuerdo a los resultados de la fase 2.
4	Paralelización	Se establecieron horarios paralelos en ambos grupos de forma que se pudieran explicar en dos sesiones el tema sistema binario. Como se cuenta con sesiones de dos horas se realizó así: a un grupo se le expuso el tema con el método tradicional de explicación magistral y en esa sesión se entregó todo el tema. Al otro grupo (en la segunda hora), se le explicó bajo la metodología de aprendizaje por descubrimiento.
5	Evaluación	Finalizadas las dos sesiones, se realizó la misma evaluación acerca del tema en ambos grupos.
6	Retroalimentación	Se consultó la opinión de cada uno de los estudiantes en relación con la metodología utilizada.
7	Socialización	Se entregaron los resultados de las evaluaciones y se socializó la experiencia con los estudiantes.

Fuente: elaboración propia

Durante el curso, y específicamente en relación con la temática abordada, se adoptaron instrumentos de exposición, explicación y evaluación que permitieron evaluar, retroalimentar y detectar dudas en los estudiantes durante las sesiones en que el tema fue abordado. Vale la pena anotar que el detalle de los instrumentos se ha omitido en este artículo solamente por razones de extensión del mismo, para estar en sintonía con las políticas editoriales de la revista.

La interacción con cada uno de los grupos se realizó en horarios diferentes dividiendo la sesión de dos horas en dos sesiones de una hora cada una, de manera que cada subgrupo estuviera con el profesor sin la intervención ni participación del otro grupo y en las mismas condiciones ambientales, de modo, tiempo y lugar para recibir la exposición. La tabla 3 explica de una forma más detallada la metodología de exposición adoptada.

Tabla 3. Metodología de exposición adoptada

<i>Grupo</i>	<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Evaluación</i>
1	Grupo en el cual se aplicó la metodología tradicional explicando el sistema binario tal como se conoce.	Se explicó el sistema binario tal como se conoce: tema completo, exposición magistral tradicional, conversión de binario a decimal y viceversa. También se hicieron ejercicios de suma binaria.	Se realizó una evaluación de diez ejercicios con preguntas sobre el sistema binario, ejercicios de conversión de binario a decimal y viceversa. Además se plantearon ejercicios de sumas binarias.
2	Grupo en el cual se aplicó la teoría de aprendizaje por descubrimiento en relación con un sistema numérico hipotético.	Se explicó un sistema hipotético llamado sistema quinquenario cuya base es 5, sus dígitos son 0, 1, 2, 3 y 4, su operación es la suma y se hicieron ejercicios de conversión con el sistema decimal. Cuando el sistema quinquenario fue asimilado, se les planteó a los estudiantes la idea de describir un sistema cuya base fuera 2, sus dígitos 0 y 1 y su operación fuera la suma. Se les indicó que descubrieran cómo sería la conversión de este sistema al decimal y viceversa.	Se realizó una evaluación con diez ejercicios con preguntas sobre el sistema binario, ejercicios de conversión de binario a decimal y viceversa. Además se plantearon ejercicios de sumas binarias.

Fuente: elaboración propia

3. RESULTADOS

Se realizaron pruebas escritas y una serie de evaluaciones tendientes a verificar la comprensión, interiorización y asimilación del concepto de lo que es un sistema numérico y, específicamente, el sistema binario. Se tomó como base de análisis los resultados cuantitativos de dichas evaluaciones tal como se explica a continuación.

Los resultados de la evaluación se presentan en la tabla 4 en donde se muestran las diferencias cuantitativas de los dos subgrupos dentro de cada uno de los grupos con los cuales se hizo la investigación. Debe anotarse que la evaluación en cada subgrupo se hizo manteniendo las mismas características de nivel y complejidad de preguntas y ejercicios. Se acudió a evaluar con cinco preguntas sobre el sistema numérico estudiado, tres ejercicios de conversión del sistema binario al sistema decimal, dos ejercicios de conversión del sistema decimal al sistema binario.

Vale la pena tener en cuenta que, para los estudiantes con los cuales se adoptó la metodología tradicional, la evaluación sobre el sistema binario se convirtió en una forma de repaso de lo visto. En el caso del subgrupo de estudiantes en donde se adoptó como ejemplo el sistema quinquenario, el sistema binario se convirtió en un reto para descubrir a partir de las bases matemáticas vistas. Debe acotarse que se presentan en la tabla 4 los resultados de la evaluación realizada como prueba en relación con el tema del sistema binario.

Tabla 4. Evaluación del sistema binario

<i>Año</i>	<i>Semestre</i>	<i>Subgrupo</i>	<i>Promedio del grupo</i>
2014	I	Método tradicional	3,8
		Método aprendizaje por descubrimiento	4,4
	II	Método tradicional	3,5
		Método aprendizaje por descubrimiento	3,9
2015	I	Método tradicional	4,0
		Método aprendizaje por descubrimiento	4,2
	II	Método tradicional	4,1
		Método aprendizaje por descubrimiento	4,1
2016	I	Método tradicional	4,0
		Método aprendizaje por descubrimiento	4,3
	II	Método tradicional	3,8
		Método aprendizaje por descubrimiento	4,1

Fuente: elaboración propia

Vale la pena tener en cuenta que, en todos los grupos, el promedio del subgrupo con quienes se compartió el conocimiento del sistema binario a partir de la metodología tradicional siempre obtuvo un promedio menor al subgrupo con el cual se adoptó la metodología de aprendizaje por descubrimiento. En el caso del II semestre del año 2015, el promedio del grupo con metodología tradicional fue de 4,13 y el promedio del grupo con metodología de aprendizaje por descubrimiento fue de 4,19. Para la presentación de datos se adoptó solamente un dígito decimal.

La retroalimentación del proceso se realizó por escrito a partir de tres preguntas abiertas: 1) ¿Cómo le pareció la metodología utilizada?, 2) ¿Qué ventajas encontró en la metodología?, 3) ¿Hubiera querido estar en el otro grupo? La tabla 5 presenta algunas de las respuestas.

Tabla 5. Descripción de algunas respuestas

<i>Grupo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Pregunta 1</i>	<i>Pregunta 2</i>	<i>Pregunta 3</i>
1	Método tradicional	<ul style="list-style-type: none"> • Me pareció buena la explicación del profe, pero lo vi todo normal • El tema es sencillo, pero es más fácil cuando se lo explican a uno así • La clase fue muy normal 	<ul style="list-style-type: none"> • El profesor explica muy bien • Es la metodología que conocemos • El profe es muy organizado en el tablero • Con una buena explicación es suficiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Me habría gustado estar en el otro grupo • Si hubiera querido • Me han comentado maravillas del otro sistema • Absolutamente sí
2	Método Aprendizaje por descubrimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Me pareció muy interesante que uno se imagine un sistema hipotético • Se me hizo muy fácil pasar del sistema quinquenario al sistema binario • Al fin ¡uff! (sic) pude entender el sistema binario 	<ul style="list-style-type: none"> • Le permite a uno avanzar por cuenta propia • El profe es un verraco muy bueno (sic) • Descubrir es lo mejor que me ha pasado • Entendí todo • Inmejorable la metodología 	<ul style="list-style-type: none"> • Para nada, descubrir es muy interesante • No me hubiera gustado • Ojalá esta metodología la usaran en todas las materias • No hubiera querido estar en el otro grupo

Fuente: elaboración propia

4. DISCUSIÓN

En referencia con la estrategia adoptada, puede decirse que la explicación pretende alterar la teoría original para que, a partir de ella, el estudiante se oriente en la búsqueda de la teoría real, es decir, la que corresponde al sistema binario como tal. El aprendizaje de un sistema hipotético le plantea al estudiante la posibilidad de comprender lo que es un sistema numérico de base 5 pero, al tiempo, le provee algunas herramientas matemáticas y conceptuales para que se arriesgue a inferir las características de un sistema numérico de base n que, para el caso del sistema binario, corresponde a un sistema base 2.

Una de las bondades que se pueden capitalizar de la teoría del aprendizaje por descubrimiento, radica en el hecho de poner a disposición de los estudiantes, conceptos que van más allá del conocimiento real que se quiere alcanzar, esto es (como sucede en este caso), ir de un sistema hipotético base 5 a un sistema verdadero base 2, heredando conceptualmente fundamentos teóricos y extrapolándolos a través de un proceso de

simplificación de forma que se puedan asimilar por el camino del descubrimiento, base para que el conocimiento pueda perdurar en un plazo más extenso con significado.

En cuanto a la evaluación realizada sobre el sistema binario, se nota que el promedio en el subgrupo al cual se le aplicó la metodología de aprendizaje por descubrimiento es cuantitativamente más alto que el promedio del subgrupo en el cual se aplicó una metodología tradicional. Esto hace suponer que la mejora en el resultado cuantitativo, si se entiende que era la misma evaluación (en cuanto a cantidad de preguntas, condiciones, calidad y complejidad de las mismas), podría ser producto de la metodología aplicada pues pareciera confirmarse que los estudiantes le confieren sentido y significado a lo que ellos mismos descubren.

Las reflexiones a este respecto se develan en las respuestas cualitativas personales de cada estudiante que permiten inferir lo que los resultados cuantitativos parecieran decir. Si bien en términos generales las opiniones son, de alguna manera, favorables, en la metodología tradicional se puede advertir que las respuestas destacan mucho más las cualidades propias del docente mientras que en la metodología con aprendizaje por descubrimiento las respuestas destacan, y hacen hincapié, en la metodología como tal. En el caso de la tabla 5 se muestran tan solo algunas de las respuestas, escogidas completamente al azar, pero el conjunto completo de las respuestas confirma, aún más, lo que esta selección pareciera indicar.

Se ha planeado realizar pruebas similares en cursos equivalentes y posteriores a la presentación de este artículo, es decir, en los cursos equivalentes de los semestres I y II del año 2016 con el ánimo de permitir que los datos digan lo suyo y, de esta forma, tener más elementos de juicio para realizar otras inferencias. Por las condiciones metodológicas de la presente investigación, los resultados pueden considerarse confiables, aunque hacer esta experiencia en los semestres posteriores permitiría solidificar dichas conclusiones y profundizar en otras.

Los resultados cuantitativos de la tabla 4 evidencian un camino muy interesante en relación con el proceso de aprendizaje, pues se tuvo especial cuidado en que las evaluaciones fueran equivalentes en nivel de exigencia y en complejidad y, sin embargo, los resultados obtenidos favorecen significativamente a los estudiantes con quienes se adoptó la metodología basada en aprendizaje por descubrimiento. Sabiendo que el promedio es una medida de tendencia central que se afecta por los valores extremos, a pesar de ellos y manteniéndolos, se observan unos resultados cuantitativos más favorables que en los subgrupos donde se adoptó el método tradicional.

Por su parte, en lo que corresponde a las opiniones, los resultados parecieran indicar que para el estudiante resulta ser un reto muy interesante poder utilizar el nuevo

conocimiento adquirido para aplicarlo en evaluaciones cuyo corpus sea alcanzable por él mismo. Tal como lo indica la teoría del aprendizaje por descubrimiento, el aprendizaje se logra siempre que exista un marco coherente de premios y castigos y, en el caso de la evaluación adoptada, el éxito está en que las preguntas, ejercicios y conversiones entre sistemas numéricos estén al alcance de los alumnos a partir del conocimiento impartido sobre el hipotético sistema quinquenario, de forma que puedan concebir otro sistema numérico con el simple hecho de cambiar la base del mismo.

5. CONCLUSIONES

Es posible encontrar metodologías que propicien el acceso al conocimiento y una ubicación del mismo en la memoria a largo plazo a partir de la teoría de aprendizaje por descubrimiento, que hagan factible, además, la apropiación, asimilación, aplicación y retroalimentación de conceptos matemáticos, técnicos o científicos en el desarrollo de un proceso de formación profesional. Los resultados obtenidos sugieren la necesidad de conocer teorías, aplicaciones y estrategias de aprendizaje en programas de ingeniería y específicamente en el área de programación de computadores.

En procesos de investigación científica y tecnológica dentro del marco educativo, es muy importante, cuando se quieren realizar experiencias paralelas, que se mantengan las mismas condiciones de todo tipo en los grupos que se quieran analizar [21] dado que cualquier cambio, por ejemplo, en el clima o en la hora de la clase puede ser determinante para que los resultados de investigaciones de este tipo estén sesgados por factores aparentemente insignificantes pero investigativamente determinantes. En este sentido, tal como los resultados lo indican, se procuró que se cumpliera plenamente en el desarrollo de la presente investigación.

Siempre pareciera necesario realizar evaluaciones objetivas que confirmen lo aprendido por los estudiantes. Se hace necesario que los resultados de este tipo de investigaciones se socialicen con los estudiantes que participan en ellas para que sean ellos mismos los que retroalimenten y enriquezcan con sus comentarios, críticas, observaciones y posibles correcciones el proceso como tal.

Finalmente, no se pueden desconocer las bondades de la teoría de aprendizaje por descubrimiento como base para aproximar a los estudiantes de ingeniería al conocimiento tecnológico y científico, bien sea que efectivamente descubran nuevo conocimiento o bien que crean que lo han descubierto. Lo más importante de este proceso investigativo es que los estudiantes aprendieron a programar y esto se puede concluir por concepto cualitativo y observación directa del docente en un porcentaje significativamente alto (más del 80 %). Los detalles se han omitido por extensión del artículo.

El desarrollo de proyectos de investigación educativo implica un fundamento teórico y científico que posibilite confiar en las inferencias desde una perspectiva confiable y por ello conviene documentarse apropiadamente [22], bien sea en el desarrollo de proyectos investigativos dentro del área puramente educativa y formativa o dentro de procesos de aprendizaje de otras áreas en donde, posiblemente, sea donde más se necesiten [23].

La metodología aplicada y el sustento a partir de la teoría de aprendizaje por descubrimiento, permiten concluir que el proceso ha sido exitoso y que los estudiantes han aprendido a interiorizar y a asimilar el concepto de un sistema numérico y, específicamente, las características del sistema binario, base fundamental para la comprensión de las tecnologías computacionales modernas dentro del contexto del proceso de formación de ingenieros de sistemas.

REFERENCIAS

- [1] B. Joyce, M. Weil, y E. Calhoun, (2014). *Models of Teaching* 9 ed., Nueva York: Pearson.
- [2] I. Milne, y G. Rowe, "Difficulties in learning and teaching programming- Views of students and tutors," *Educational and Information technologies*, vol. 7, N.º 1, 55-66, 2002
- [3] A. Vega Escobar y A. Espinel Ortega, "Aspectos fundamentales para la enseñanza de la programación básica en ingeniería," *Revista Avances en Sistemas e Informática*, vol. 7, N.º 1, 7-13, 2010
- [4] D. Jackson, D. y R. Miller, [En línea], acceso 2 de febrero, 2009: Disponible: <http://people.csail.mit.edu/dnj/articles/teaching-6005.pdf>
- [5] J. Kaasboll, *Exploring didactic models for programming*. Oslo: Universidad de Oslo. 1999.
- [6] H. Paz Penagos, "Aprendizaje autónomo y estilo cognitivo: diseño didáctico, metodología y evaluación," *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 9, N.º 17, pp. 53-65, 2014
- [7] F. Sally, "What are we doing when we teach programming?" presentado en FIE'99: Frontiers in Education. 29th Annual Frontiers in Education Conference. Designing the Future of Science and Engineering Education, Sesión 12ª sesión. San Juan de Puerto Rico, Puerto Rico, 1999.
- [8] T. Koulouri, S. Lauria y R. Macredie, "Teaching introductory programming: a quantitative evaluation of different approaches," *ACM Transactions on Computing Education*, 14, N.º 4, 2015
- [9] C. Romero Chaves y M. Rosero Sosa, "Modelo de enseñanza y su relación con los procesos metacognitivos en programación de sistemas," *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 3, 2014
- [10] O. Trejos Buriticá, *Significado y competencias*, Pereira: Papiro, 2013.
- [11] J. Bruner, *Actos de significado: mas allá de la revolución cognitiva*, Boston: Alianza Editorial, 2009.

- [12] M. Guerrero Sánchez, *Metodologías activas y aprendizaje por descubrimiento: las TIC y la educación*, Boston: Amazon Digital Services, 2014.
- [13] D. Ausubel, *Psychology of meaningful verbal learning: an introduction to school learning*, Nueva York: Grune & Straton, 1963.
- [14] Unesco, “Estándares de competencia en TIC para docentes,” [En línea], acceso junio, 2016: Disponible: <http://www.eduteka.org/EstandaresDocentesUnesco.php>
- [15] E. Piza, *Los números reales y sus principales subconjuntos: construcciones y axiomatización de los sistemas numéricos*. Madrid: Editorial Académica Española, 2012.
- [16] J. Coronado Padilla, *Sistemas numéricos residuales: fundamentos lógicomatemáticos*. Bogotá: Universidad de la Salle, 2012.
- [17] R. Ziveri, R. y P. Galassi, *Sistema binario* (Edición italiana), Roma: Abel Books, 2013.
- [18] J. Jiménez Murillo, *Matemáticas para la computación*. Ciudad de México: Alfaomega, 2014.
- [19] J. S. Bruner, *El proceso de la educación*, Ciudad de México: Editorial Hispanoamericana, 1963.
- [20] S. Campillay y S. Meléndez, “Análisis de impacto de metodología activa y aprendizaje en asignaturas de Ingeniería,” *Actividades Investigativas en Educación*, vol. 15, N.º 2, 2015
- [21] R. Bisquerra Alcina, *Metodología de la investigación educativa*. Madrid: Editorial La Muralla S. A., 2004.
- [22] A. Díaz-Barriga, *et al.*, *Metodología de la investigación educativa*. Ciudad de México: Editorial Díaz de Santos, 2014.
- [23] D. Begoña García, *et al.*, *Fundamentos Básicos de Metodología de la Investigación Educativa*. Bogotá: Editorial CCS, 2012.

Control predictivo/adaptativo de sistemas complejos utilizando técnicas de ingeniería neuronal*

José Gallardo**
Claudio Ayala***
Rubén Castro****

Recibido: 24/10/2017 • Aceptado: 15/03/2018
<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a8>

Resumen

Se presenta el diseño e implementación de un sistema de control predictivo/adaptativo, utilizando técnicas de ingeniería neuronal para controlar un sistema MIMO no lineal con el objeto de controlar, en una etapa posterior, la temperatura y el nivel en una planta no lineal de tipo cónica. Preliminarmente, se ensayaron estructuras de control convencional lo que hizo surgir la necesidad de probar estructuras de control inteligente que permitan cumplir más eficazmente con los objetivos de control. El proceso se inicia con la experimentación de diferentes estructuras de control neuronal, para luego escalar hacia un sistema de control neuronal predictivo/adaptativo. Los resultados logrados a nivel simulación, ensayando el diseño propuesto sobre modelos matemáticos de sistemas MIMO no lineales, fueron satisfactorios y cumplieron los objetivos de control establecidos, por tanto, en la siguiente etapa del proyecto, se estima la experimentación en la planta real en estudio.

Palabras clave: ingeniería neuronal; identificación; control predictivo; control adaptativo; sistemas MIMO no lineales.

* El artículo se origina en una investigación conducente al título de maestría titulada *Diseño e implementación de sistema de control para estanque cónico mediante redes neuronales*, que se ejecutó de marzo de 2016 a diciembre de 2017.

** Ph. D. Académico de la Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación. Av. Angamos 0610, Antofagasta, Chile. Teléfono: +56 55 2355157, jgallardo@ucn.cl. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6477-5302>

*** Ph. D. Académico de la Universidad de Antofagasta, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Av. Angamos 0601, Antofagasta, Chile. Teléfono: +56 55 2637474, claudio.ayala@uantof.cl.

**** Académico de la Universidad Arturo Prat, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Av. Arturo Prat 2120, Iquique, Chile. Teléfono (+56) 57 2526456, rucastro@unap.cl. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7613-1301>

Predictive/Adaptive Control of Complex Systems Using Neural Engineering Techniques

Abstract

The design and implementation of a predictive/adaptive control system is presented, using neural engineering techniques to control a non-linear MIMO system in order to control, at a later stage, the temperature and level in a non-linear conical plant. Preliminarily, conventional control structures were tested, which gave rise to the need to test intelligent control structures that allow the control objectives to be met more effectively. The process begins with the experimentation of different neuronal control structures, and then escalates to a predictive/adaptive neuronal control system. The results achieved at the simulation level, testing the proposed design on mathematical models of non-linear MIMO systems, were satisfactory and met the control objectives established, therefore, in the next stage of the project, the experimentation is estimated in the real plant under study.

Keywords: neuronal engineering; identification; predictive control; adaptive control; non-linear MIMO systems.

Controle preditivo/adaptativo de sistemas complexos utilizando técnicas de engenharia neural

Resumo

Apresenta-se a criação e a implementação de um sistema de controle preditivo/adaptativo utilizando técnicas de engenharia neural para controlar um sistema MIMO não linear com o objetivo de controlar, em uma etapa posterior, a temperatura e o nível em uma planta não linear de tipo cônica. Preliminarmente, estruturas de controle convencional foram ensaiadas, o que fez com que surgisse a necessidade de testar estruturas e controle inteligente que permitissem cumprir os objetivos de controle de forma mais eficaz. O processo começa com a experimentação de diferentes estruturas de controle neural, para depois escalar em direção a um sistema de controle neural preditivo/adaptativo. Os resultados alcançados na simulação, ensaiando o desenho proposto sobre modelos matemáticos de sistemas MIMO não lineares, foram satisfatórios e cumpriram os objetivos de controle estabelecidos, portanto, na seguinte etapa do projeto, estima-se realizar a experimentação na planta real em estudo.

Palavras-chave: engenharia neural; identificação; controle preditivo; controle adaptativa; sistemas MIMO não lineares.

INTRODUCCIÓN

En el escenario de globalización actual, la competencia en muchos sectores industriales, así como el marcado interés social por los problemas medioambientales relacionados con los procesos de producción, impulsa la necesidad de disponer de técnicas fiables y flexibles que permitan la operación de un proceso con gran eficiencia. Por lo tanto, el objetivo de todo sistema de control deberá ser actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacerse múltiples y cambiantes criterios de funcionamiento (beneficio económico, seguridad del proceso y del personal, problemas medioambientales, etc.), propios de los sistemas complejos y en presencia de cambios en las características del proceso.

Sin embargo, el controlar procesos complejos no es una tarea simple debido a que estos son frecuentemente no lineales e inciertos y el derivar un modelo matemático del proceso sobre el cual el diseño del controlador será basado, es una tarea más compleja, por lo tanto, es de gran relevancia el utilizar sofisticados y fiables sistemas de control [12, 18].

El trabajo que aquí se presenta, reporta una investigación en la cual se requería controlar la temperatura y el nivel de líquido en un estanque cónico (no lineal). En un principio se desarrollaron algunos esquemas de control convencional (basados en controladores PID) para enfrentar el problema planteado, sin embargo, no se lograron los resultados esperados, razón por la cual se recurrió a esquemas de control avanzado, que permiten resolver el problema cumpliendo más eficientemente los objetivos de control. Al respecto, es posible encontrar en la literatura múltiples estrategias de control avanzado que han sido propuestas [9] tales como el control de ganancia programada, el control predictivo basado en modelos matemáticos, el control experto, el control neuronal, el control Fuzzy, etc. De todas estas estrategias desarrolladas, las técnicas de control neuronal y las de control predictivo parecen ser las más eficientes y, consecuentemente, las que más amplia aceptación han logrado en la industria por cuanto, en su forma más general, aceptan cualquier tipo de modelos y funciones objetivo o restricciones. Algunas aplicaciones exitosas reportadas en la literatura son: en [16] se estudia el control de flujo en estanques industriales, en [14] se implementan métodos de control inteligente usando procedimientos de agrupación y clasificación mediante redes neuronales y en [1] se aplica neurocontrol para el control de una planta de destilación.

A continuación, en la segunda sección de este texto, se presentan las diversas estructuras de neurocontrol ensayadas al inicio de la investigación, la tercera sección presenta el diseño y desarrollo de un sistema de control predictivo/adaptativo para aplicarse a futuro en la planta en estudio, la cuarta sección presenta modelos matemáticos de algunas plantas, para validar en modo de simulación la efectividad del sistema de control que se propone, finalmente, en las secciones quinta y sexta, se presentan los resultados logrados, conclusiones finales y trabajo futuro respectivamente.

1. ESTRUCTURAS DE NEUROCONTROL EVALUADAS

Para poder sintetizar una arquitectura adecuada, se realizó, en principio, el estudio de diversos modelos de control neuronal que han sido propuestos en distintos artículos [8, 11, 15, 17], los que fueron ensayados con el propósito de proyectar una futura estrategia de control.

Las configuraciones de control ensayadas se muestran en las figuras 1, 2, 3 y 4.

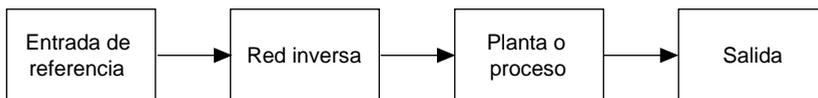


Figura 1. Control basado en el modelo inverso.

Fuente: elaboración propia.

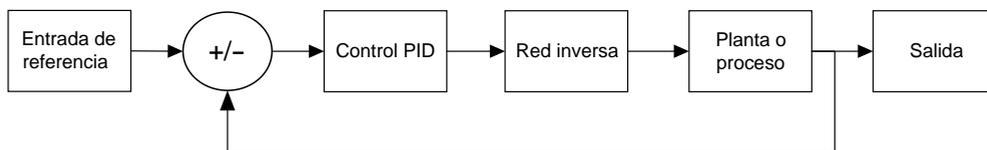


Figura 2. Control con modelo inverso en el lazo.

Fuente: elaboración propia.

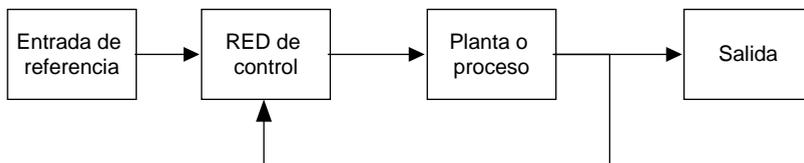


Figura 3. Control directo sin uso de modelo

Fuente: elaboración propia.

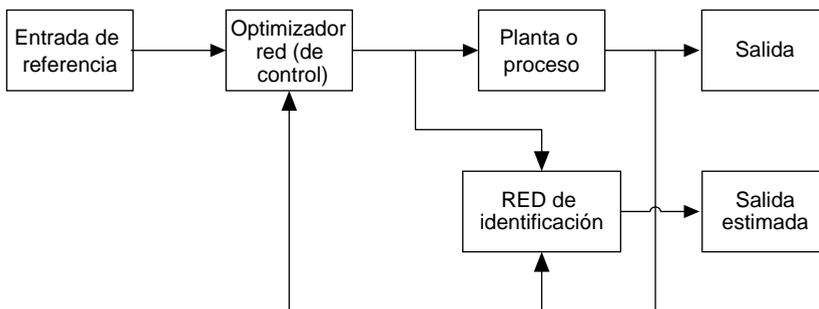


Figura 4. Control directo con uso de modelo

Fuente: elaboración propia

- Primer esquema de control: modelo inverso.
- Segundo esquema de control: modelo inverso en el lazo.
- Tercer esquema de control: esquema directo sin uso de modelo.
- Cuarto esquema de control: esquema directo con uso de modelo.

El estudio y ensayo de los modelos de control citados, permitió evaluar y constatar que los esquemas de redes neuronales para la obtención de modelos directo e inverso de procesos no lineales, son bastante eficaces, como así mismo estructuras en las cuales la red actúa como un controlador propiamente tal. Los esquemas de control fueron ensayados a nivel de simulación en el ambiente simulink de Matlab.

2. DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE UN CONTROL PREDICTIVO/ADAPTATIVO

En consideración de la experiencia lograda y los promisorios resultados obtenidos en la sección anterior, se decidió diseñar un sistema que permitiera controlar eficientemente un sistema MIMO no lineal, el cual se basa en el esquema general presentado en la figura 5. En este esquema se pueden identificar esencialmente tres elementos: un predictor, el cual es un modelo del proceso que se desea controlar y que permite predecir las futuras salidas del proceso en un determinado horizonte de predicción, el controlador, cuya función es generar las señales de control óptimas mediante la minimización de la función de coste definida y la planta a ser controlada. La mayoría de los sistemas de control predictivo desarrollados, se basan fundamentalmente en este diagrama general, aunque presentan diferencias en el algoritmo utilizado por el optimizador para minimizar la función de coste definida y el método utilizado para generar el predictor, el cual es un modelo del proceso que se desea controlar.

Considerando, que el problema de diseño del sistema de control a desarrollar se basa fundamentalmente en la obtención de un modelo de predicción y en el diseño del controlador, a continuación, se muestra por separado el diseño de ambos módulos.

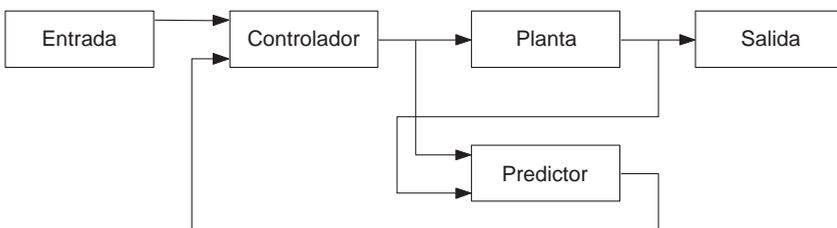


Figura 5. Esquema general del sistema

Fuente: elaboración propia

2.1. Modelo de predicción

Si se considera que obtener un modelo que represente la dinámica de un sistema es muy importante para diseñar un sistema de control que cumpla eficazmente los objetivos de control y que este proceso no es trivial, se ha optado por aprovechar las bondades que presentan las redes neuronales para dicho propósito. Pionero en la investigación sobre identificación y control de sistemas por medio de redes neuronales ha sido K. S. Narendra, quien describe en [8], cómo la dinámica de sistemas no lineales puede ser modelada mediante redes neuronales. Tanto redes neuronales de tipo *feedforward* como redes recurrentes [13], se recomiendan para la identificación de sistemas dinámicos. Para el presente trabajo, se utilizarán las redes *feedforward* multicapa donde la dinámica del sistema será representada por ventanas temporales pasadas, tanto de entradas como de salidas del sistema. Las redes neuronales recurrentes no requieren del uso de señales retardadas pues tienen dinámica propia.

La identificación de sistemas mediante redes neuronales puede realizarse con entrenamiento *off-line* (fuera de línea) o con entrenamiento *on-line* (en línea). Mucha investigación se ha efectuado sobre la identificación de sistemas *off-line* donde se usa un archivo generado con la historia de las entradas y salidas del sistema para entrenar la red [11], sin embargo, para propósitos de control adaptivo, los algoritmos de entrenamiento *on-line* son requeridos para proveer una notable mejoría en la exactitud del sistema modelado y ajustar los parámetros de la red de acuerdo a los cambios que ocurran en el proceso.

Un modelo llamado de entrada-salida, describe la dinámica del sistema, basado en datos de entrada y salida. Este modelo puede ser un modelo del tipo Narmax [3] y asume que la nueva salida del sistema, puede ser estimada desde sus entradas y salidas pasadas. Narendra, en [8], plantea otras tres clases de modelos para caracterizar una planta, sin embargo, el modelo llamado de entrada-salida descrito, es el modelo más general. El modelo de entrada-salida (figura 6), puede ser representado por la siguiente ecuación.

$$y_p(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n); u(k), u(k-1), \dots, u(k-m)) \quad (1)$$

Donde $[u(k), y(k)]$, representan el par de entrada salida en el tiempo k . Enteros positivos de n y m son respectivamente el número de salidas pasadas (llamado también el orden del sistema) y el número de entradas pasadas [3]. En la práctica m es usualmente menor o igual a n , f , puede ser una función no lineal que mapea las entradas y salidas pasadas para una nueva salida.

2.2. Controlador

El controlador está constituido por un optimizador como controlador primario y una red neuronal controladora como controlador secundario. Esta red controladora se conecta en paralelo con el optimizador y una vez entrenada, puede constituirse en el controlador primario. Esta configuración otorga una mayor robustez al sistema desarrollado y aliviana la carga de cómputo del optimizador con idéntico desempeño.

Optimizador

El optimizador cuya misión es minimizar la función objetivo definida, puede ser implementado utilizando alguno de los siguientes métodos: el método de gradiente descendente, el método de Newton, los métodos *cuasi-Newton* o una red neuronal. Para este desarrollo, se ha optado por utilizar una variante [2] del método del gradiente descendente el cual está definido por la siguiente ecuación.

$$u(t+1) = u(t) - \eta \frac{\partial J}{\partial u(t)} + \alpha(u(t) - u(t-1)) \quad (5)$$

Donde $u(t)$, es la señal de control, η es la llamada ganancia, α el momento y J es la función objetivo a minimizar. Si se requiere que la salida sea lo más próxima posible a la referencia y no se consideran restricciones en las variables, se puede definir la función objetivo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$J = \frac{1}{2} e^2(t+1) \quad (6)$$

Aquí, $e(t+1) = r(t+1) - y_p(t+1)$, es la señal de error futuro, entre la señal de referencia y la salida del modelo de predicción.

El gradiente de la función objetivo puede ser calculado explícitamente desde el modelo neuronal del proceso. Así:

$$\frac{\partial J}{\partial u(t)} = -e(t+1) \frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)} \quad (7)$$

Considerando que:

$$\frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)} = w_2 \left[\text{sech}^2(w_1 p + b_1) \right] w_1 \frac{dp}{du(t)} \quad (8)$$

Donde: $\frac{dp}{du(t)} = [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$

Para un horizonte de predicción igual a T se debe tener en cuenta el cálculo de las futuras señales de control [2]. Por esta razón, es necesario no solo considerar los errores presentes entre la referencia y la salida del modelo de predicción, sino también la predicción de los errores futuros. Para estos efectos, se deben calcular las salidas futuras del proceso desde el modelo neuronal de predicción y las futuras señales de referencia. Así, el vector de errores quedará definido por:

$$E_{t,T} = [e(t+1), e(t+2), \dots, e(t+T)] \quad (9)$$

Donde:

$$e(t+i) = r(t+i) - y_p(t+i)$$

Y el vector de señales futuras de control por:

$$U_{t,T} = [u(t+1), u(t+2), \dots, u(t+T)] \quad (10)$$

Vector que debe minimizar la función objetivo J' definida por:

$$J' = \frac{1}{2} [E_{t,T}^T E_{t,T}] \quad (11)$$

Luego

$$U_{t,T}^{K+1} = U_{t,T}^K - \eta \frac{\partial J'}{\partial U_{t,T}^k} + \alpha (U_{t,T}^K - U_{t,T}^{K-1}) \quad (12)$$

Donde el gradiente de la función objetivo [2], es representado por la ecuación (13):

$$\frac{\partial J'}{\partial U_{t,T}^k} = E_{t,T} \frac{\partial Y_{p:t,T}}{\partial U_{t,T}^k} \quad (13)$$

Y la matriz jacobiana expresada por:

$$\frac{\partial Y_{p:t,T}}{\partial U_{t,T}^k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_p(t+1)}{\partial u(t)} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial y_p(t+2)}{\partial u(t)} & \frac{\partial y_p(t+2)}{\partial u(t+1)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_p(t+T)}{\partial u(t)} & \frac{\partial y_p(t+T)}{\partial u(t+1)} & \dots & \frac{\partial y_p(t+T)}{\partial u(t+T-1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Red neuronal controladora

Como ya fue mencionado, se ha incorporado una red neuronal como controlador secundario o de respaldo para dar una mayor robustez al sistema desarrollado. La red neuronal controladora, consiste en una red *backpropagation* con dinámica externa. Consta de una capa oculta de 15 neuronas (aplicando el teorema de Kolmogorov [5]), función de activación tangente hiperbólica en las neuronas de la capa oculta y lineal en las neuronas de la capa de salida. Esta red neuronal tiene como objetivo mapear las entradas y salidas del optimizador. Una vez entrenada esta red (entrenamiento en línea), puede asumir el rol de controlador primario con igual desempeño al del optimizador, reduciendo ostensiblemente la cantidad de cómputo de este último. El sistema desarrollado se ilustra en la figura 7.

Por último, para reducir el *offset* en la salida debido a modelos de predicción no suficientemente exactos, se decidió adicionar a la señal de control un integrador que comúnmente es usado como un controlador realimentado. El esquema final del sistema de control diseñado y experimentado se muestra en la figura 8.

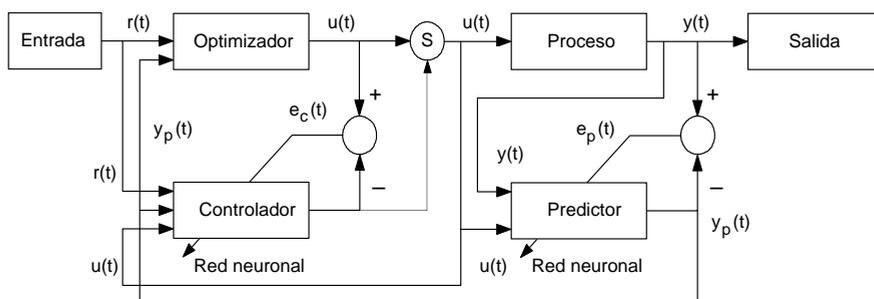


Figura 7. Diagrama en bloques sistema de control predictivo

Fuente: elaboración propia

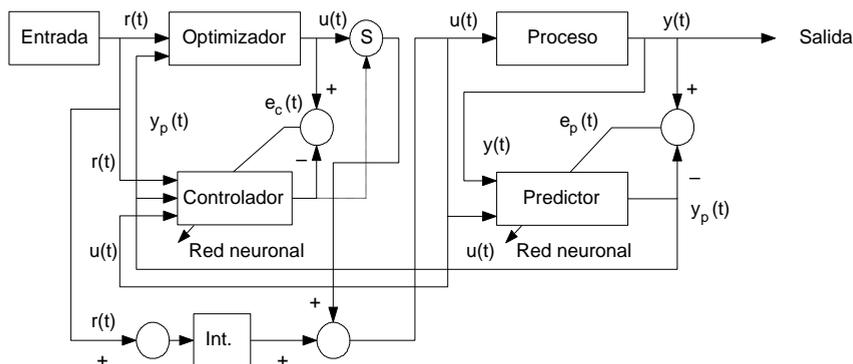


Figura 8. Esquema final del sistema de control desarrollado

Fuente: elaboración propia

3. DEFINICIÓN DE LA PLANTA

Para la experimentación del sistema de control predictivo diseñado, y considerando que aún no se cuentan con datos de entrada/salida de la planta real a controlar, se ha optado por seleccionar un conjunto de sistemas (no lineales SISO y no lineal MIMO) que hayan servido anteriormente para ensayar otros sistemas de control predictivo o adaptativo [8, 17].

- Procesos no lineales (SISO)

$$y_p(k+1) = \frac{y_p(k)}{1 + y_p^2(k)} + u^2(k) \quad \text{1}^{\text{er}} \text{ Orden} \quad (15)$$

$$y_p(k+1) = \frac{y_p(k)y_p(k-1) \left[\frac{y_p(k) + 2.5}{1 + y_p^2(k) + y_p^2(k-1)} \right] + u(k)}{1 + y_p^2(k) + y_p^2(k-1)} \quad \text{2}^{\text{do}} \text{ Orden} \quad (16)$$

- Proceso no lineal (MIMO)

$$\begin{bmatrix} y_{p1}(k+1) \\ y_{p2}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{p1}(k)}{1 + y_{p2}^2(k)} \\ \frac{y_{p1}(k)y_{p2}(k)}{1 + y_{p2}^2(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

4. RESULTADOS

Por razones de espacio se muestra solo una parte de la gran cantidad de resultados obtenidos en las pruebas de simulación realizadas al sistema de control predictivo desarrollado. Se hicieron pruebas con diferentes señales de referencia, cambios en la ganancia y el momento del controlador y cambios en los parámetros de la red de predicción.

- Sistema SISO no lineal de primer orden:

$$y_p(k+1) = \frac{y_p(k)}{1 + y_p^2(k)} + u^2(k)$$

En esta prueba, la entrada de referencia es una señal sinusoidal (figura 9) para simular cambios continuos en la referencia. La salida presenta ciertas diferencias respecto de la entrada en los cruces por cero. Posteriormente se realizaron algunos cambios en la ganancia y momento del controlador para corregir estas anomalías.

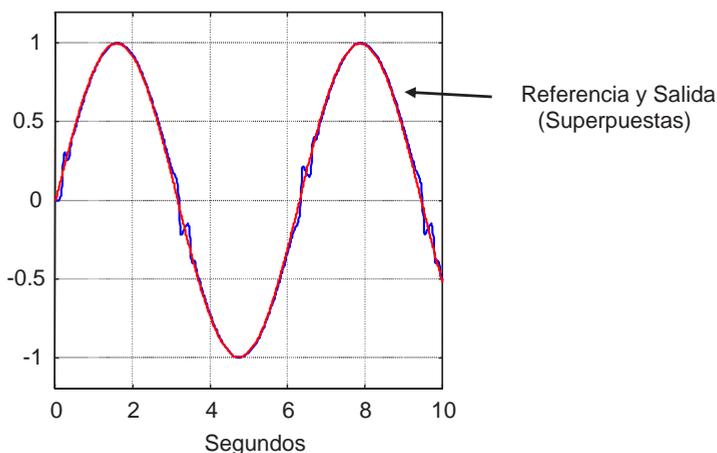


Figura 9. Referencia y salida sistema SISO no lineal de primer orden

Fuente: elaboración propia

- Sistema SISO no lineal de segundo orden:

$$y_p(k+1) = \frac{y_p(k)y_p(k-1)[y_p(k) + 2.5]}{1 + y_p^2(k) + y_p^2(k-1)} + u(k)$$

Como se puede observar en las figuras 10 y 11, para el caso de control del sistema no lineal de segundo orden, efectuados los debidos ajustes, prácticamente las señales de entrada de referencia y salida quedan superpuestas observándose errores del orden de 10^{-6} . En la figura 12 se presenta la salida a cambios bruscos en la entrada de referencia. La salida presenta una respuesta casi de ganancia infinita sin sobreimpulsos. Control sistema MIMO (multivariable) no lineal:

$$\begin{bmatrix} y_{p1}(k+1) \\ y_{p2}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{p1}(k)}{1 + y_{p2}^2(k)} \\ \frac{y_{p1}(k)y_{p2}(k)}{1 + y_{p2}^2(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \end{bmatrix}$$

Por último, la figura 13 presenta los resultados logrados al controlar un sistema no lineal MIMO de dos entradas y dos salidas. Las señales de consigna, corresponden a una señal cuadrada y una señal sinusoidal. En la figura prácticamente no se logra apreciar nítidamente la diferencia entre las entradas y salidas, evidenciándose la calidad del control del sistema diseñado.

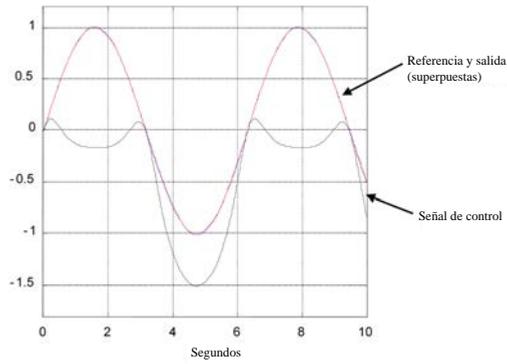


Figura 10. Referencia, salida y señal de control, sistema SISO no lineal de segundo orden

Fuente: elaboración propia

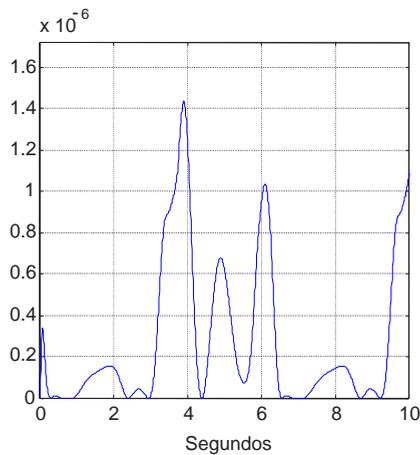


Figura 11. Error cuadrático medio, control sistema SISO no lineal de segundo orden.

Fuente: elaboración propia

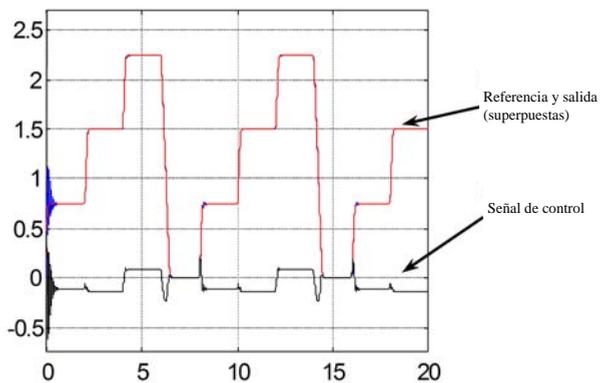


Figura 12. Referencia, salida y señal de control, sistema no lineal de segundo orden

Fuente: elaboración propia

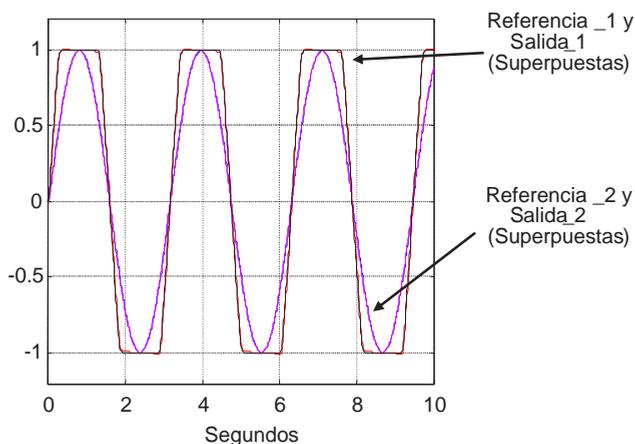


Figura 13. Referencias y salidas, control sistema MIMO no lineal

Fuente: elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha presentado el diseño y desarrollo de un sistema de control predictivo/adaptativo robusto, óptimo y eficiente, por cuanto el sistema trabaja con dos tipos de controladores, un optimizador como controlador primario y una red neuronal controladora como controlador secundario o de respaldo. La complejidad de los cálculos que realiza el optimizador dependen de la función de coste y de la topología de la red de predicción, sin embargo, luego de entrenada la red controladora con las señales provenientes del optimizador, esta desempeña idéntica función con igual desempeño y un menor coste de computación.

Es importante destacar además que, dado que la red de predicción que modela el proceso queda entrenando en línea, el sistema de control implementado también tiene el carácter de adaptativo lo cual significa que permanentemente se actualizará el modelo ante cambios de los parámetros de la planta si es que ello se produce.

El objetivo del sistema desarrollado es suplir algunas falencias en los sistemas convencionales utilizados previamente en el control de temperatura y nivel del estanque cónico en estudio.

Los resultados obtenidos en las pruebas de simulación han sido contrastados con resultados obtenidos en otros trabajos de investigación en los cuales se controlaron los mismos sistemas. Se constata que el esquema propuesto permite controlar de mejor manera estos sistemas, minimizando el periodo transitorio en la respuesta del sistema y el error de estado estacionario. El error cuadrático medio de seguimiento que se obtuvo en la mayoría de las pruebas efectuadas fue del orden de 10^{-6} .

Finalmente, y como trabajo futuro, queda ensayar el esquema de control predictivo desarrollado en el control de temperatura y nivel en la planta cónica no lineal en estudio, identificando previamente el modelo de la planta. Los resultados logrados en las pruebas de simulación permiten inferir que el esquema desarrollado, tendrá un buen desempeño en la planta real a controlar.

REFERENCIAS

- [1] A. Conradie, C. Aldrich, “Neurocontrol of a multi-effect batch distillation pilot plant based on evolutionary reinforcement learning,” *Chemical Engineering Science*, vol. 65, N.º 5, pp. 1627-1643, 2010.
- [2] M. Bazaraa, H. Sherali, C.M. Shetty, *Nonlinear programming: theory and Algorithms*, 3.ª ed., Nueva Jersey: Wiley Interscience, 2006, pp. 872.
- [3] S. Chen, S. A. Billings, “Representations of non-linear systems: the NARMAX model,” *International Journal of Control*, vol. 49, N.º 3, pp. 1013-1032, 1988.
- [4] H. González, M.S. Dutra, O. Lengerke, “Identification and modeling for non-linear dynamic system using neural networks type MLP,” presentado en Proceedings of the 2009 Euro American Conference on Telematics and Information Systems: New Opportunities to increase Digital Citizenship, Praga, junio 03-05, 2009.
- [5] R. Hecht-Nielsen, *Neurocomputing*, Boston: Ed. Addison Wesley, 1988, pp. 433.
- [6] J. Vojtesek, P. Dostal, “Adaptive control of water level in real model of water tank, Process Control (PC),” presentado en 20th International Conference on, Strbske Pleso, Eslovaquia, junio 9-12, 2015.
- [7] A. U. Levin y K. Narendra, “Control of nonlinear dynamical systems using neural networks,” *IEEE Neural Networks Council*, vol.7, pp. 30-42, 1996.
- [8] K. Narendra y K. Parthasarathy, “Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 7, N.º 1, 1996.
- [9] H. M. Nguyen y N. Subbaram, “Advanced control strategies for wind energy systems: An overview”, presentado en IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Phoenix, 2011.
- [10] K.J. Nidhil, S. Sreeraj, B. Vijay y V. Bagyaveereswaran, “System identification using artificial neural network”, Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), presentado en 2015 International Conference, Nagercoil, 2015.
- [11] M. Nørgaard, O. Ravn, N.K. Poulsen y LK Hansen, *Neural Networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*, Londres: Springer, 2000, pp. 246.
- [12] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 4.ª ed., Madrid: Prentice Hall, 2003, pp. 984.

- [13] D. T. Pham y L. Xing, *Neural Networks for identification, prediction and control*, Londres: Springer, 2012, pp. 238.
- [14] A. Kupin, "Application of neurocontrol principles and classification optimisation in conditions of sophisticated technological processes of beneficiation complexes". *Metallurgical y Mining Industry*, vol. 6, pp. 16-24, 2014.
- [15] R.J. Rajesh, R. Preethi, P. Mehata y B. Jaganatha Pandian, "Artificial neural network based inverse model control of a nonlinear process," presentado en *Computer, Communication and Control (IC4)*, International Conference, Indore, 2015.
- [16] V.R. Ravi, M. Monica, S. Amuthameena, S.K. Divya, S. Jayashree y J. Varshini, "Sliding Mode Controller for Two Conical Tank Interacting Level System," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 573, pp. 273-278, 2014.
- [17] A. M. Suárez, Nueva arquitectura de control predictivo para sistemas dinámicos no lineales usando redes neuronales, Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 1998.
- [18] D. Zhao, Z. Xia y D. Wang, "Model-Free Optimal Control for Affine Nonlinear Systems with Convergence Analysis", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 12, pp. 1461-1468, 2015.

Priorización de despachos en empresas de manufactura usando QFD difuso*

Juan Carlos Osorio Gómez**
Mayra Alejandra Peña Vega***
Deysi Yulieth Arias Giraldo****

Recibido: 18/03/2016 • Aceptado: 26/02/2018

<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a9>

Resumen

Las restricciones de capacidad instalada y de recursos de distribución a las que normalmente se encuentran sometidas las medianas y grandes empresas manufactureras, hacen que surja la necesidad de establecer métodos que sirvan como herramienta para tomar decisiones en cuanto a la priorización de cada una de sus bodegas al momento de abastecerlas. La importancia que el centro de distribución asigna a cada una de estas, se encuentra estrechamente relacionada con las condiciones y particularidades que las caracterizan, pudiendo ser estos factores de tipo cualitativo, cuantitativo o una mezcla entre los dos. Este artículo presenta un método multicriterio QFD difuso el cual, además de utilizar variables cuantitativas para establecer el orden de despacho de producto terminado, tiene en cuenta variables cualitativas, resultado de las opiniones que los expertos pueden ofrecer acerca de las situaciones particulares de cada bodega mediante variables lingüísticas que, finalmente, se cuantifican a través de números difusos triangulares.

Palabras clave: despliegue de la función de la calidad difuso; toma de decisiones multicriterio; priorización de despachos; QFD; lógica difusa.

* Proyecto derivado de la investigación en el marco del trabajo de grado de pregrado en Ingeniería Industrial realizado por las autoras Peña y Arias bajo la dirección del autor Osorio. Proyecto titulado *Formulación de un modelo para priorización de despacho de producto terminado en empresas manufactureras usando QFD fuzzy*. El proyecto fue financiado por los autores con recursos propios y se ejecutó entre 2015 y 2016.

** Doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle. Grupo de investigación Logística y Producción. Calle 13 N.º 100-00, Cali, Colombia. Teléfono: (+57) 23212100 ext. 7545. Correo electrónico: juan.osorio@correounivalle.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0001-5625-5609>

*** Ingeniera Industrial de la Universidad del Valle. Carrera 94 N.º 34-55, apto. 302 E Balcones del Lili, Cali, Colombia. Teléfono: (+57) 3113167993. Correo electrónico: mayralejandravp@outlook.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2759-8578>

**** Magíster en Administración de la Universidad del Valle. Km. 4 vía a Potrerito, Condominio campestre Haciendas de Potrerito, Hacienda Garzonero 17. Teléfonos: (+57) 310 7409912 - 311 691 6673. Correo electrónico: yuliehartias@hotmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5344-8122>

Prioritization of Deliveries in Manufacturing Companies Using Fuzzy QFD

Abstract

The restrictions of installed capacity and distribution resources to which medium and large manufacturing companies are normally subject, make it necessary to establish methods that serve as a tool to make decisions regarding the prioritization of each of their warehouses at the time of supplying them. The importance that the distribution center assigns to each of these, is closely related to the conditions and particularities that characterize them, being these factors of a qualitative, quantitative or a mixture between the two. This article presents a fuzzy QFD multi-criteria method which, in addition to using quantitative variables to establish the order of dispatch of the finished product, considers qualitative variables, the result of the opinions that experts can offer about the particular situations of each winery by means of linguistic variables that are finally quantified through fuzzy triangular numbers.

Keywords: fuzzy quality function deployment; multi-criteria decision making; dispatch prioritization; QFD; fuzzy logic.

Priorização de despachos em empresas de manufatura usando QFD difuso

Resumo

As restrições de capacidade instalada e de recursos de distribuição às quais as médias e grandes empresas manufatureiras normalmente se encontram submetidas fazem com que surja a necessidade de estabelecer métodos que sirvam como ferramenta para tomar decisões com respeito à priorização de cada um de seus estoques na hora de abastecê-los. A importância que o centro de distribuição designa a cada um deles está estreitamente relacionada às condições e particularidades que os caracterizam. Tais fatores podem ser de tipo qualitativo, quantitativo ou uma mistura dos dois. Este artigo apresenta um método multicritério QFD difuso que, além de utilizar variáveis quantitativas para estabelecer a ordem de despacho do produto terminado, leva em consideração variáveis qualitativas, resultados das opiniões que os especialistas podem oferecer sobre as situações particulares de cada estoque por meio de variáveis linguísticas que, finalmente, são quantificadas por meio de números difusos triangulares.

Palavras-chave: desdobramento da função da qualidade difuso; tomada de decisões multicritério; priorização de despachos; QFD; lógica difusa.

INTRODUCCIÓN

Las medianas y grandes empresas, especialmente las manufactureras y comercializadoras de productos de consumo masivo, generalmente cuentan con centros de despacho y bodegas a abastecer, las cuales se ubican en distintas zonas geográficas. Esto implica una serie de decisiones afectadas por múltiples criterios, como disponibilidad de recursos, ubicación geográfica, vida útil del producto, demanda del producto, políticas administrativas, planes estratégicos corporativos, políticas de distribución, entre otras.

Según [1], ha existido en la literatura gran cantidad de investigaciones que abordan la necesidad de atender a los clientes ágilmente, con un transporte eficiente y oportuno, sin embargo, también afirman que no se han encontrado trabajos donde se hayan definido, de manera clara, indicadores que permitan planificar los despachos de la organización, apuntando a aquellas variables clave para el servicio al cliente y la gestión efectiva de los recursos de los que dispone una empresa, de manera que la decisión acerca de los despachos involucre múltiples criterios. En ese sentido, ellos proponen una metodología sustentada en el proceso analítico jerárquico, el cual se puede considerar como un importante antecedente para este trabajo. Sin embargo, aquí se plantea utilizar el QFD difuso como herramienta para involucrar los diferentes criterios (cuantitativos y cualitativos) a considerar en el proceso de toma de decisión respecto al despacho desde el centro de distribución a las múltiples bodegas.

Si se conocen, para cada caso específico, los requisitos que las bodegas consideran importantes para el buen desarrollo del proceso de despacho de producto terminado, la herramienta QFD permitirá relacionar dichos requisitos con los aspectos técnicos que los deben satisfacer mediante la primera matriz de la metodología conocida como *casa de la calidad*, que arroja como resultado un *ranking* de los despachos. La incorporación de la lógica difusa permitirá considerar en el modelo QFD la ambigüedad que existe en cuanto a la importancia asignada a cada uno de los requisitos y criterios. A continuación, se presentan algunos elementos teóricos importantes a considerar sobre la herramienta mencionada.

La función de despliegue de la calidad (*quality function deployment*, QFD)

Aunque inicialmente fue concebida como herramienta para el diseño y desarrollo de productos, ha trascendido estas aplicaciones y hoy por hoy puede considerarse como una importante herramienta en el ámbito de los problemas de decisión multicriterio.

Según [2] se pueden mencionar los siguientes campos de aplicación del QFD: desarrollo de productos, administración de la calidad, análisis de las necesidades del cliente, diseño de productos, planificación del producto y del proceso, planificación general, planificación estratégica, planificación de procesos de negocios, de calidad de

servicios, ingeniería concurrente, ingeniería de calidad e ingeniería simultánea, toma de decisiones, administración, trabajo en equipo, programación de actividades, costeo y otros. Dos trabajos importantes para ampliar la información sobre el QFD son [2] y [3].

Lógica difusa

La modelación difusa permite la definición de métricas con las que se puede acceder a los factores intangibles y tratar con medidas heterogéneas. Además, lo que se busca a través de la matemática difusa es describir y formalizar la realidad empleando modelos flexibles que interpreten las leyes que rigen el comportamiento humano y las relaciones entre los hombres [4].

La lógica difusa permite expresar matemáticamente los valores intermedios a los que puede acudir un evaluador de determinada “situación” o “problema” de tipo cualitativo, en el cual no se sentiría satisfecho al calificar con solo dos valores, falso (0) o verdadero (1), sabiendo que es un evento que no se puede definir como totalmente verdadero o totalmente falso, sino que tiene un grado de verdad o falsedad, que puede variar de 0 a 1. En esencia, con esta lógica se amplían las opciones frente a una situación, pues en lugar de los extremos 0 y 1, se tiene el intervalo entre ellos para emitir un juicio. Los conjuntos difusos se manejan a partir de números difusos, los cuales pueden ser representados por funciones triangulares o trapezoidales [5].

Aplicaciones de la metodología QFD difusa

Si bien, no se ha encontrado en la literatura una aplicación de la metodología QFD difusa para la priorización de los despachos, se pueden encontrar aplicaciones recientes de QFD difuso en la toma de decisiones multicriterio en [6-12] y aplicaciones locales y específicas de la metodología se pueden encontrar en [13-15].

1. MATERIALES Y MÉTODOS: MODELO QFD-DIFUSO PARA PRIORIZACIÓN DE DESPACHO DE PRODUCTO TERMINADO

La metodología que se presenta a continuación está soportada fundamentalmente en el trabajo de [7]. Para el desarrollo de la misma es necesario incluir un grupo multidisciplinario que permita definir correctamente los objetivos del proceso que se desea trabajar y los parámetros de control que guíen el buen desarrollo del sistema lo cual permitirá garantizar la coherencia y fiabilidad de los resultados. Con respecto a este equipo, deberá estar conformado por las personas responsables del proceso que posean conocimiento y experiencia en el área de la decisión.

Una vez conformado el equipo, se procede con los pasos que a continuación se exponen.

1.1 Identificación de los qué o variables internas

Se identifican los factores que las bodegas (el cliente interno) esperan que el centro de distribución (proveedor) cumpla en lo referente a la entrega del producto. Se debe obtener y expresar lo que en realidad quiere el cliente, y no lo que el proveedor “piensa” que el cliente espera [16]. En este caso es importante contactar directamente a los clientes y conocer sus requerimientos. Para ello, además del contacto directo, se podría utilizar una encuesta y a partir de los resultados consolidados definir esos requerimientos que serán considerados como los qué o las variables internas.

1.2 Determinación de la importancia relativa o peso de los qué

Cuando los clientes enuncien sus deseos (los qué) también deben expresar el nivel de importancia que tiene cada uno de ellos. Para lograrlo, se propone emplear una escala lingüística que se traducirá en números difusos triangulares para el manejo matemático respectivo. Un ejemplo de escala lingüística y su correspondiente representación en números difusos triangulares se presenta en la tabla 1 y en la figura 1. La idea entonces es que, al mismo tiempo que se definan los criterios (qué), los clientes definan también la importancia de dichos criterios. A partir de esta calificación, se determina su importancia relativa a través de la ecuación (1):

$$\text{Pesos QUE} = \{W_i, \text{ donde } i = 1, \dots, K\} \tag{1}$$

$$W_i = \frac{1}{n} * (W_{i1} + W_{i2} + \dots + W_{in})$$

$$W_i = (W_{i\alpha}, W_{i\beta}, W_{i\gamma})$$

Donde K es el número de los qué y n es el número de evaluadores, cada elemento del vector *peso* de los qué (W_i), es un número triangular difuso. Los pesos finales se obtienen al sumar las calificaciones dadas por los evaluadores.

Tabla 1. Escala lingüística y números difusos triangulares equivalentes

<i>Variable lingüística</i>	<i>Número difuso triangular (a, b, c)</i>
Muy bajo (MB)	(0, 1, 2)
Bajo (B)	(2, 3, 4)
Medio (M)	(4, 5, 6)
Alto (A)	(6, 7, 8)
Muy alto (MA)	(8, 9, 10)

Fuente: [7]

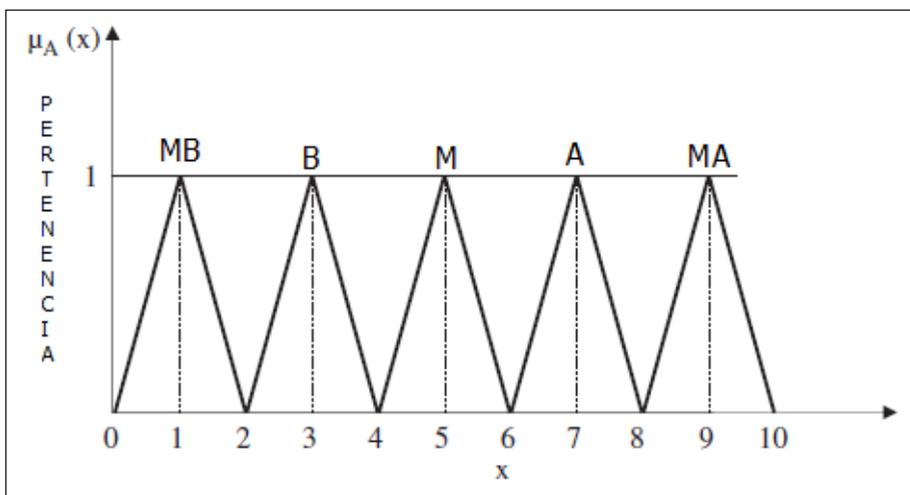


Figura 1. Escala cualitativa de calificación de importancia relativa

Fuente: [2]

1.3 Identificación de los cómo o variables externas

Se identifican los criterios que, se espera, satisfagan las exigencias y necesidades expresadas por los clientes en el paso anterior. En este caso, los factores que respondan a dichas exigencias, deben ser criterios para el despacho de producto terminado. A continuación, se presentan los criterios que fueron considerados [17]:

- Criterio de cobertura en unidades (CU).
- Criterio de cobertura en días (CD).
- Criterio tamaño del faltante (TF).
- Criterio tamaño del pedido (TP).
- Criterio de demanda.
- Criterio de variabilidad de demanda.
- Priorización de zona de mercado.
- Costo logístico.

Es importante aclarar que podrían incluirse criterios adicionales de acuerdo con las particularidades empresariales, pero que se considera que los criterios aquí presentados tienen una cobertura amplia de la situación y que la abordan desde diferentes perspectivas, lo cual hace más completo el proceso de toma de decisión.

1.4 Determinación de los niveles de relación entre los qué y los cómo

En este punto, cada miembro del equipo multidisciplinario expresa su opinión acerca del impacto que tiene cada variable externa (cómo) sobre cada variable interna (qué) por medio de la escala lingüística mostrada en la tabla 1. Después de que se han definido todas las correlaciones, se consolidan las diferentes opiniones para finalmente determinar el nivel de correlación entre las dos variables, utilizando la ecuación (2):

$$\text{Correlación} = \{rij, \text{ donde } i = 1, \dots, k \text{ y } j = \dots, m\} \tag{2}$$

K es el número de los qué, m el número de los cómo y n el número de miembros del equipo, aquí cada uno de los elementos *rij* representa el nivel de correlación consolidado entra cada *i*-qué y cada *j*-cómo. Estos se representan mediante números triangulares difusos de la forma que se aprecia en la ecuación (3):

$$rij = (rij \alpha, rij \beta, rij \gamma) \tag{3}$$

1.5 Cuantificación de la importancia relativa de cada cómo

La importancia relativa de cada cómo se calcula promediando los valores de correlación *rij* consolidados con los valores de la importancia relativa de cada qué *wj*, a través de la ecuación (4):

$$\text{Pesos COMO} = \{Wj, \text{ donde } j = 1, \dots, m\} \tag{4}$$

$$rij = \frac{1}{n} * (rij1 + rij2 + \dots + rijn)$$

$$Wj = \frac{1}{k} * [(rj1 * W1) + \dots + (rjk * Wk)]$$

K es el número de los qué, m el número de los cómo, cada uno de los elementos *wj*, del vector *peso-como* representan la importancia relativa de cada cómo, la cual se define por medio de la función de números triangulares difusos representados en la ecuación (5):

$$Wj = (Wj \alpha, Wj \beta, Wj \gamma) \tag{5}$$

1.6 Cálculo del valor numérico de los cómo para cada bodega

Se ingresa el valor numérico de cada cómo para cada una de las bodegas que se muestra en la tabla 5. En este paso, las variables externas (los cómo) se califican de manera cuantitativa obteniéndose los valores por medio de fórmulas matemáticas, asociados a los criterios presentados en el paso de la identificación de los cómo o variables externas y cuyas expresiones matemáticas se encuentran en [16].

Cada uno de estos criterios debe ser calculado antes de ser ingresados al modelo. Para los indicadores que no relacionan fórmulas matemáticas, se debe ingresar el dato numérico de la variable, por ejemplo, para el caso de la demanda, el valor de este indicador será la demanda mensual o semanal del producto expresada en unidades.

1.7 Ranking final para despacho de producto terminado

En este paso concluye el modelo QFD-difuso y se obtiene el orden final en el que se debe despachar el producto terminado. El ranking se calcula a través de un vector llamado *pesos de los cómo*, el cual se encuentra expresado en la ecuación (6):

$$W_j = (W_j \alpha, W_j \beta, W_j \gamma) \quad (6)$$

Una vez obtenido este vector se utiliza el enfoque de clasificación de números difusos triangulares definido en [18], logrando de esta forma la calificación consolidada de la importancia relativa de cada cómo expresada en números naturales mediante la ecuación (7):

$$C_j = \frac{(W_j \alpha + 2 * W_j \beta + W_j \gamma)}{4} \quad (7)$$

Aplicando la ecuación (7) a cada vector, se obtiene una calificación de la forma C_1, C_2, \dots, C_m para cada uno.

Al contar con la calificación de las variables externas de la forma C_j se realiza la sumatoria de las mismas y así se obtiene una ponderación de cada criterio (P_j); para esto se utiliza la ecuación (8):

$$Z = \sum c_j \quad P_j = \frac{C_j}{Z}$$

Donde:

$$\frac{C_j}{Z} \quad (8)$$

Se obtiene una ponderación P_j de cada variable externa de la forma P_1, P_2, \dots, P_n .

Finalmente, multiplica los P_j por el valor de la bodega respecto a la misma variable externa calificada de forma cuantitativa para cada una de estas, de acuerdo con el paso del cálculo del valor numérico de los cómo para cada bodega.

C_j : calificación consolidada de cada cómo.

P_j : ponderación cualitativa de cada cómo.

El puntaje final se obtiene al sumar los valores obtenidos de las multiplicaciones anteriores para cada bodega. Respecto a este puntaje se establece el *ranking* en orden de mayor a menor siendo la bodega del puntaje más alto, la primera a abastecer, continuando así hasta el abastecimiento de la bodega de menor puntaje. A continuación, se presenta un ejemplo en el cual se ilustra la aplicación de esta metodología propuesta.

2. RESULTADOS. EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para el caso de estudio que se presenta a continuación se obtuvo información de empresas manufactureras de la ciudad de Cali y sus zonas aledañas.

2.1 Identificar los qué o variables internas

Son los factores que las bodegas esperan que el proveedor cumpla en cuanto a la distribución y entrega de producto. Estos se convierten en las variables internas (los qué).

- Cumplimiento de hora y fechas de entrega.
- Calidad de las mercancías.
- Pedidos completos.
- Respuesta oportuna a novedades, inconvenientes y reclamos.
- Cumplimiento con la documentación requerida.
- Seguridad del producto.

2.2 Identificar los criterios relevantes para la evaluación de los proveedores. Los cómo o variables externas

Los criterios que satisfacen las exigencias y necesidades expresadas por el cliente fueron propuestos como las variables externas:

- Criterio de cobertura en unidades (CU).
- Criterio de cobertura en días (CD).
- Criterio tamaño del faltante (TF).
- Criterio tamaño del pedido (TP).
- Criterio de demanda.
- Criterio de variabilidad de demanda.
- Priorización de zona de mercado.
- Costo logístico.

2.3 Determinar la importancia relativa de las variables internas

En este caso, se trabajó con la escala lingüística presentada en la tabla 1. Estas calificaciones de carácter cualitativo, se cuantifican mediante la lógica difusa a través de los números triangulares difusos presentados en la tabla 1 e ilustrados en la figura 1. Para la aplicación práctica, la tabla 2 muestra las opiniones de los tres involucrados.

Tabla 2. Calificación de los qué

		<i>Jefe de logística</i>	<i>Supervisor de bodega</i>	<i>Jefe de bodega</i>
<i>QUÉ</i>	Cumplimiento de hora y fecha de entrega	MA	MA	A
	Calidad de las mercancías	MA	A	MA
	Pedidos completos	A	M	M
	Respuesta oportuna a novedades, inconvenientes y reclamos	A	MA	M
	Cumplimiento con la documentación requerida	B	MA	M
	Seguridad del producto	M	A	A

Fuente: elaboración propia

2.4 Cuantificar la importancia relativa de cada variable externa

La tabla 3 muestra la calificación dada por cada uno de los involucrados para el nivel de correlación que existe entre cada variable externa y cada variable interna en el caso de estudio.

Tabla 3. Correlación entre los qué y los cómo

		<i>CÓMO</i>									
		<i>Cobertura en unidades</i>			<i>Cobertura en días</i>			<i>Costo logístico</i>			
<i>CARGO</i>		<i>JL</i>	<i>SB</i>	<i>JB</i>	<i>JL</i>	<i>SB</i>	<i>JB</i>		<i>JL</i>	<i>SB</i>	<i>JB</i>
<i>QUÉ</i>	Cumplimiento de hora y fecha de entrega	B	M	A	MA	A	A		MA	MA	MA
	Calidad de las mercancías	M	B	M	M	B	A	...	M	A	MA
	Pedidos completos	A	MA	A	M	MA	A		A	MA	A
	Respuesta oportuna a novedades, inconvenientes y reclamos	M	M	B	M	M	A	...	B	MB	B
	Cumplimiento con la documentación requerida	A	B	M	M	M	A		MA	M	MA
	Seguridad del producto	M	B	M	M	B	A		A	M	MA

Fuente: elaboración propia

2.5 Determinar los niveles de correlación entre las variables internas y externas
 Continuando con la metodología, se definieron los niveles de correlación para las variables tanto internas como externas tal como se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Correlación entre las variables internas y externas

	Peso de los qué			Cobertura en unidades			Cobertura en días				Costo logístico											
Cumplimiento de hora y fecha de entrega	7	8	9	4	5	6	6,7	7,7	8,7		8	9	10									
Calidad de las mercancías	7	8	9	3,3	4,3	5,3	4	5	6	...	6	7	8									
Pedidos completos	5	6	7	6,7	7,7	8,7	6	7	8		6,7	7,7	8,7									
Respuesta oportuna a novedades, inconvenientes y reclamos	6	7	8	3,3	4,3	5,3	4,7	5,7	6,7	...	1,3	2,3	3,3									
Cumplimiento con la documentación requerida	5	6	7	4	5	6	4,7	5,7	6,7		6,7	7,7	8,7									
Seguridad del producto	5	6	7	3,3	4,3	5,3	4	5	6		6	7	8									
Peso de los cómo																						
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td>24</td><td>35</td><td>48</td><td>30</td><td>41</td><td>55</td><td>...</td><td>34</td><td>47</td><td>61</td> </tr> </table>													24	35	48	30	41	55	...	34	47	61
24	35	48	30	41	55	...	34	47	61													

Fuente: elaboración propia

2.6 Determinar el impacto final de cada bodega sobre los atributos considerados Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de los indicadores de cada bodega

		CÓMOS			
	BODEGAS	Cobertura en unidades	Cobertura en días		Costo logístico
QUÉS	Bodega A	-223	-1		2500
	Bodega B	228	1		3000
	Bodega C	533	2	...	1500
	Bodega D	-123	0		450
	Bodega E	360	1		1860
	Bodega F	12	0		1200
	Bodega G	144	1	...	50
	Bodega H	-67	0		2450
	Bodega I	261	1		1350
	Bodega J	134	0		145

Fuente: elaboración propia

2.7 Clasificación final de las alternativas (ranking de las bodegas)

En este caso particular, el *ranking* establecido se muestra en la tabla 6. Este *ranking* define la prioridad de despachos, lo cual quiere decir que las bodegas deberían ser atendidas en el orden presentado y en el evento que se agoten los recursos (camiones, o la misma producción), habrán sido abastecidas las bodegas prioritarias.

Tabla 6. Ranking de las bodegas

<i>Ranking</i>	
Bodega A	433
Bodega B	417
Bodega C	410
Bodega D	391
Bodega E	372
Bodega F	347
Bodega G	317
Bodega H	289
Bodega I	276
Bodega J	257

Fuente: elaboración propia

Como los pesos ya fueron definidos, al actualizar los valores de los indicadores en cada bodega, producto del abastecimiento, las prioridades cambiarán y el proceso se repetirá de manera que todas las bodegas serán atendidas a medida que avanza el tiempo. El proceso es dinámico y en el evento que se definan otros indicadores, puede realizarse nuevamente la valoración por parte de los expertos de acuerdo con la metodología presentada.

3. CONCLUSIONES

El modelo presentado es de fácil adaptación a otras circunstancias o situaciones: los nuevos requisitos de las bodegas pueden ser fácilmente adaptadas al modelo, al igual que los cómo con los que se busca satisfacer estos nuevos requisitos. En cualquier análisis de sensibilidad que se realice, se evidenciará la influencia de las variables lingüísticas y cuantitativas en el orden de despacho resultante. Al suponer cambios en las opiniones subjetivas respecto a los cómo del modelo, se podrá observar que este no trata de forma aislada las variables cualitativas y cuantitativas sino que, por el contrario, ambos tipos de variables son tenidos en cuenta de forma simultánea para llegar a un orden de despacho.

La forma en que se relacionan las variables lingüísticas y cuantitativas en este modelo hace que las decisiones a las que se llegan sean decisiones acordes a la luz de los indicadores logísticos, al tiempo que incorporan a dichas decisiones la opinión de las personas expertas en el tema.

La herramienta QFD-difuso permite incorporar al modelo indicadores logísticos, calculados por medio de fórmulas matemáticas. De igual manera, mediante QFD-difuso se hace posible incorporar al modelo QFD las opiniones subjetivas de las personas involucradas en la toma de decisiones por medio de la lógica difusa. Con lo que el modelo en su totalidad permite tomar una decisión integral, orientada hacia la satisfacción de todos los criterios de manera global.

REFERENCIAS

- [1] J.J. Bravo, J.C. Osorio y J.P. Orejuela, “Modelo para la priorización dinámica de despachos de vehículos utilizando el proceso analítico jerárquico,” *Revista Facultad de Ingeniería*, N.º 48, 201- 215, 2009.
- [2] L-K. Chan y M-L. Wu, “Quality function deployment: A literature review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 143, N.º 3, 463–497, 2002
- [3] J. A. Carnevalli y P. Cauchick P., “Review, analysis and classification of the literature on QFD–Types of research, difficulties and benefits,” *International Journal of Production Economics*, vol. 114, N.º 2, 737– 754, 2008.
- [4] M-T. Tsai, H-L. Wu y W-K. Liang, “Fuzzy Decision Making for Market Positioning and Developing Strategy for Improving Service Quality in Department Stores,” *Quality and Quantity*, vol. 42, N.º 3, 303 -319, 2008.
- [5] L. Lazzari, E. Machado y R. Pérez, *Teoría de decisión fuzzy*, Buenos Aires: Ed. Macchi, 1998.
- [6] E. Bottani y A. Rizzi, “Strategic management of logistics service: A fuzzy QFD approach,” *International Journal of Production Economics*, vol. 103, N.º 2, 585–599, 2006.
- [7] E. Bottani, “A fuzzy QFD approach to achieve agility,” *International Journal of Production Economics*, vol. 119, N.º 2, 380–391, 2009.
- [8] M. Celik, C.Selcuk, C. Kahraman y E.Deha, “An integrated fuzzy QFD model proposal on routing of shipping investment decisions in crude oil tanker market,” *Expert Systems with Applications*, vol 36, N.º 3, 6227–6235, 2009.
- [9] Y, Sohn So y I.S. Choi, “Fuzzy QFD for supply chain management with reliability consideration,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 22, N.º 3, 327–334, 2001.
- [10] L-H. Chen y W-C. Ko, “A fuzzy nonlinear model for quality function deployment considering Kano’s concept,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 48, N.º 3, 581–593, 2008.

- [11] H-T. Liu, "The extension of fuzzy QFD: From product planning to part deployment," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, N.º 8, 11131–11144, 2009.
- [12] S. H. Amin y J. Razmi, "An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, N.º 4, 8639–8648, 2009.
- [13] D. C. Arango y C.E. Ruales, "Selección de proveedores mediante el despliegue de la función de calidad difuso," Trabajo de grado de pregrado, Universidad del Valle, Cali, 2008.
- [14] D.J. Arias y M. A. Peña, "Formulación de un modelo para priorización de despacho de producto terminado en empresas manufactureras usando QFD fuzzy," Trabajo de grado de pregrado, Universidad del Valle, Cali, 2010.
- [15] Giraldo P y Martínez L (2009). "Propuesta de mejoramiento para el programa de ingeniería industrial de la universidad del valle utilizando QFD-fuzzy," Trabajo de grado de pregrado, Universidad del Valle, Cali, 2009.
- [16] M.F. Herrera y J.C. Osorio, "Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso," *Estudios Gerenciales Universidad ICESI*, N.º 99, pp. 69-88, 2006.
- [17] J.J. Bravo, J.P. Orejuela y J.C. Osorio, "Administración de recursos de distribución: Indicadores para la priorización en transporte," *Estudios Gerenciales Universidad ICESI*, vol 33, N.º 102, pp. 101-118, 2007.
- [18] G. Facchinetti, "Ranking functions induced by weighted average of fuzzy numbers," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, pp. 313-327, 2002.

El síndrome de “echar la culpa” desde una mirada sistémica y sus repercusiones para la solución de problemas en la empresa*

Jorge Iván Pérez-Rave**
Favián González-Echavarría***

Recibido: 14/12/2017 • Aceptado: 30/07/2018

<https://doi.org/10.22395/rium.v17n33a10>

Resumen

Los objetivos del estudio son: explorar estructuras sistémicas del síndrome de “echar la culpa” en la empresa, describir metodológicamente una herramienta lúdica que ayuda a reconocerlo y mitigarlo, y discutir sus repercusiones para el análisis de causas y la solución de problemas. La exposición de la lúdica comprende descripción del caso, equipo de trabajo y ubicación, escenarios de observación (con y sin echar la culpa) y despliegue en tres grupos de prueba. Los resultados se comparan para ambos escenarios y se analizan causas de pedidos defectuosos, porcentaje de defectos y productividad. La lúdica puede ser empleada por docentes, consultores y formadores en general para enfrentar a los aprendices a un entorno simulado con el síndrome y sin este. Facilita reflexionar sistémicamente sobre el tema, identificar sus señales e intervenirlas antes de llevar a cabo el análisis de causas. Este trabajo aporta elementos teóricos y empíricos acerca de los beneficios de erradicar el síndrome de “echar la culpa” en análisis de causas, y propone considerarlo como factor contingente en futuros estudios.

Palabras clave: síndrome de echar la culpa; síndrome del sistema vulnerable; análisis de causas; aprendizaje lúdico; mejora continua.

* Artículo derivado del proyecto de investigación *El síndrome de “echar la culpa” y su asocio con el éxito de los proyectos de mejora continua*. En desarrollo desde abril de 2017 hasta julio de 2019. Financiación interna Idinnov SAS. Colombia.

** Director del grupo de investigación Idinnov. Medellín, Colombia. Correo electrónico: investigacion@idinnov.com. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1166-5545>

*** Profesor de la Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial. Medellín. Correo electrónico: favian.gonzalez@udea.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1540-9859>

The “Blame-Blame” Syndrome from a Systemic Perspective and Its Implications for Problem Solving in a Company

Abstract

The objectives of the study are: to explore systemic structures of the “blame-blame” syndrome in a company, to describe methodologically a playful tool that helps to recognize and mitigate it, and to discuss its implications for causing analysis and problem solving. The ludic exposition includes case description, work team and location, observation scenarios (with and without blaming) and deployment in three test groups. Results are compared for both scenarios and causes of defective orders; percentage of defects and productivity are analyzed. Play can be used by teachers, consultants and trainers in general to confront learners in a simulated environment with and without the syndrome. It makes it easier to systemically reflect on the subject, to identify its signals and intervene before carrying out the cause analysis. This work provides theoretical and empirical elements about the benefits of eradicating the “blame-blame” syndrome in cause analysis, and proposes to consider it as a contingent factor in future studies.

Keywords: blame syndrome; vulnerable system syndrome; cause analysis; playful learning; continuous improvement.

A síndrome de “colocar a culpa” a partir de uma perspectiva sistemática e suas repercussões para a solução de problemas na empresa

Resumo

Os objetivos do estudo são: explorar as estruturas sistêmicas da síndrome de “colocar a culpa” na empresa, descrever metodologicamente uma ferramenta lúdica que ajuda a reconhecê-la e mitigá-la, e discutir suas repercussões para a análise de causas e para a solução de problemas. A exposição da ferramenta lúdica compreende a descrição do caso, da equipe de trabalho e da localidade, cenários de observação (com e sem colocar a culpa) e desdobramento em três grupos de teste. Os resultados são comparados para ambos os cenários e são analisadas as causas de pedidos defeituosos, porcentagem de defeitos e produtividade. A ferramenta lúdica pode ser empregada por docentes, consultores e formadores em geral para enfrentar os aprendizes em um ambiente simulado com a síndrome ou sem ela. Ajuda a refletir sistemicamente sobre o tema, identificar seus sinais e intervir antes de realizar a análise de causas. Este trabalho fornece elementos teóricos e empíricos sobre os benefícios de erradicar a síndrome de “colocar a culpa” em análises de causas e propõe considerá-la como um fator contingente em futuros estudos.

Palavras-chave: síndrome de colocar a culpa; síndrome do sistema vulnerável; análise de causas; aprendizagem lúdica; melhoria contínua.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento empresarial, desde la óptica del análisis-solución de problemas, implica avanzar desde una solución actual a otra deseada (de más generación de valor por parte de la organización), previa identificación e intervención de las causas que originan las brechas del caso, con alta participación de las personas y métodos sistemáticos (no necesariamente complejos). Así, la etapa de análisis de causas se constituye en un factor crítico para el progreso de las iniciativas de mejora, ya que termina guiando la planificación de las acciones, las futuras inversiones y las aspiraciones de los estrategas. A pesar de su amplio uso, los resultados no siempre son satisfactorios, ya que solo entre el 10 % y el 30 % de los proyectos de mejora tiende a lograr los resultados esperados [1], independiente del estilo de gestión en el que se enmarquen (*Lean, Six Sigma, TPM*, etc.).

Por años, los esfuerzos empresariales e investigativos se han centrado en técnicas y herramientas “duras” (o combinaciones entre ellas) para detectar y abordar las causas de los problemas y explicar el éxito de las iniciativas de mejora. A pesar de las múltiples metodologías propuestas y las configuraciones técnicas, los resultados no son concluyentes. Por ejemplo, Bessant *et al.* [2] en el año 1994 advertían sobre la necesidad de redescubrir la mejora continua y, más de veinte años después, McLean, Antony y Dahlgard [1] coinciden con la mayor parte de los llamados del primero. Aun así, hoy día parece seguirse en la búsqueda de una *receta universal* que integre *cinco porqués*, diagrama causa efecto, gráficos Pareto, lluvia de ideas, entre otras herramientas.

No obstante, la comunidad académica ha comenzado a enfatizar sobre aspectos blandos de los equipos de trabajo y de su entorno, en favor del éxito de las iniciativas de mejora [3-4]. Al respecto, y esto se puede afirmar a partir de la teoría contingente (véase [5-6]), así la empresa cuente con conocimientos y habilidades técnicas y haga uso de una metodología fiable y válida, si el entorno no es apto para que todos estos elementos interactúen de una forma armónica, el desempeño se verá reducido.

En tal sentido, si la organización mantiene un entorno repleto del síndrome de “echar la culpa” (tendencia a culpar a las personas por resultados desfavorables, conocido como *Vulnerable System Syndrome* en áreas de la salud [7], o cercano al síndrome del “enemigo externo” en la teoría del pensamiento sistémico [8]), los análisis de causas derivarán en tensiones emocionales y respuestas “apaga incendios”. Por ejemplo, las siguientes dos formas de explorar eventuales causas de un problema particular no necesariamente conducen por el mismo camino: 1) ¿Por qué daño tantas piezas?, 2) ¿Qué condiciones pueden estar generando piezas defectuosas?

En el caso de la primera pregunta, el análisis de causas tenderá hacia situaciones propias del individuo, como: desconcentración, negligencia, incompetencia, indisciplina, etc. Este hace referencia a un modelo de análisis de causas centrado en la persona,

el cual limita la responsabilidad y el control desde la organización [7-8]. En este caso, la aparente solución tiende a culminar con el despido del trabajador, por lo que no se propicia el aprendizaje del sistema.

La segunda pregunta se aparta de la persona, enfrenta las brechas como tensiones creativas y hace viable modificar el saber hacer del sistema. Las soluciones resultantes pueden mejorar procedimientos de entrenamiento, de auditoría de puntos clave, de selección, o de verificación de calidad; así como operaciones misionales, pruebas y ensayos, entre otros frentes. Es decir, evoluciona el saber hacer y se estimula el aprendizaje individual y colectivo.

La literatura ha venido alertando sobre la tendencia a echar la culpa en diversos ámbitos [9-12], y sobre lo negativa que resulta para el trabajo en equipo, el aprendizaje y la mejora de los procesos [13-15]. Sin embargo, este síndrome no ha sido lo suficientemente estudiado en contextos empresariales de análisis de causas y solución de problemas. De hecho, no se encontraron antecedentes de su operacionalización, ni tampoco ha tendido a tomarse en cuenta como constructo en los modelos estructurales en auge. Por el contrario, donde más se ha tratado ha sido en gestión de riesgos en áreas de la salud [7], por lo que el lenguaje, los síntomas, los patrones, las consecuencias y los tipos de errores, entre otros aspectos, no necesariamente son familiares o cercanos al análisis-solución de problemas en la empresa. De ahí que, además de ser pertinente tratar el síndrome de “echar la culpa” desde una óptica más comprensible para la gestión de empresas, también es pertinente proveer herramientas para detectarlo y hacerle frente. Más aún, cuando incluso en áreas de la salud se siguen reclamando trabajos que estimulen una cultura de detección y prevención de errores alejada del modelo prevaleciente, centrado en las personas [16].

Este artículo tiene como objetivo explorar la estructura sistémica del síndrome de “echar la culpa” en la empresa, describir metodológicamente una herramienta lúdica que ayuda a reconocerlo y mitigarlo, y discutir sobre sus repercusiones para el análisis de causas y la solución de problemas empresariales. El resto del documento se estructura así: la sección uno presenta varias razones, desde la literatura y desde un análisis sistémico, que sustentan por qué no echar la culpa en análisis-solución de problemas. La sección dos ofrece el desarrollo de la lúdica, comenzando por la descripción y finalizando por el despliegue en tres grupos de trabajo. La sección tres trata los resultados. La sección cuatro discute los hallazgos y propone desafíos. La sección cinco provee las conclusiones.

1. ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE ¿POR QUÉ NO ECHAR LA CULPA?

Cuando se cae en la costumbre de echar la culpa durante el análisis-solución de problemas, la aparente causa raíz es la persona en la que recayó la manifestación del

problema. Si esto es repetitivo, probablemente se opte por despedirla. Ahí termina el supuesto mejoramiento del sistema, en una variable dicotómica: con la persona, sin la persona, no más. El confort que deviene con el síndrome de “echar la culpa” es producido por el desconocimiento del mismo y por los círculos viciosos que este genera, algunos de los cuales se muestran en la figura 1 (véase más estructuras en [17]).

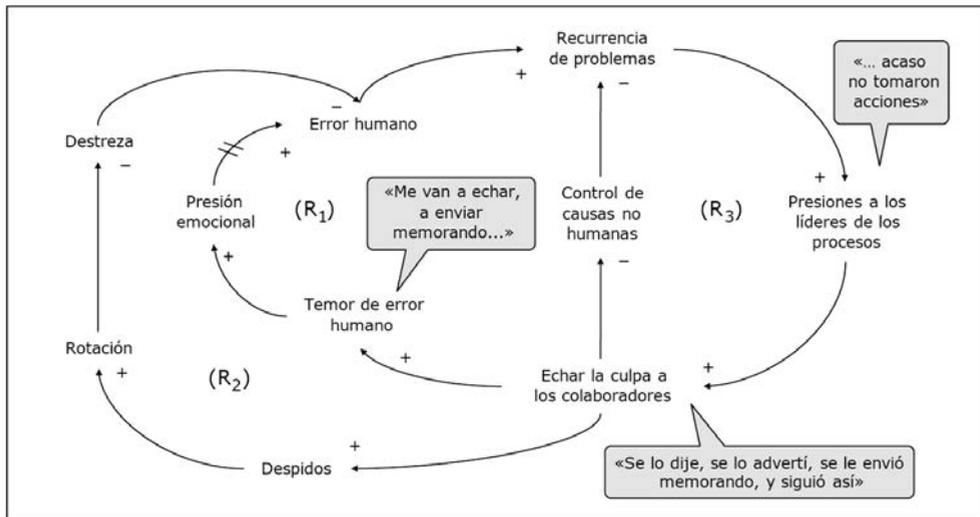


Figura 1. Algunos patrones subyacentes de “echar la culpa”

Fuente: [17]

Este diagrama (figura 1) se compone de varias estructuras sistémicas. Considere el origen de una determinada flecha como causa, y el fin de la flecha como efecto. La interpretación de estas relaciones se facilita a través de signos; el más (+) deduce una relación directa (si uno aumenta, el otro también), y el signo menos (-) refiere una relación inversa (uno aumenta, el otro disminuye, y viceversa).

Para un mejor entendimiento de la figura 1, pártase del elemento *Recurrencia de problemas*. En la medida en que los problemas se repitan con mayor frecuencia, los afectados directamente (por ejemplo, clientes corporativos, en el caso de defectos), ejercerán presión sobre los responsables de los procesos (gerencia, calidad, producción, etc.), estos, a su vez, pueden verse tentados a seguir con el síndrome de “echar la culpa”. Es decir, sus análisis de causas se inclinarán a culpar un determinado trabajador (ejemplo: quien estaba manipulando la máquina en la que se produjeron los pedidos defectuosos). Esta práctica impide explorar los múltiples factores no humanos, que es común agrupar en materiales, métodos, máquinas, mediciones y ambiente. Si estos no se identifican y controlan, sus posibles efectos no deseados seguirán impactando a lo largo del tiempo.

Por otro lado, echar la culpa desencadena nuevas consecuencias. Por ejemplo, sensaciones de temor en los trabajadores, los cuales pueden estar exageradamente prevenidos a las fallas humanas. En el corto plazo, quizá se disminuyan los defectos causados por el factor humano. Sin embargo, esta aparente “solución” a un problema desencadena nuevos efectos (estrés, miedo, frustración, insatisfacción, ...). Estos no solo afectan la salud y contaminan el entorno, sino que además incrementan las posibilidades de error humano: justo lo que se quería evitar. Por lo mismo, aumenta la intensidad de los problemas, lo cual es consistente con [18], sobre el hecho de que el estrés, las altas cargas de trabajo y las crisis estimulan la generación de los errores.

Aquí no termina el desenlace, pues es probable que se le haya dicho en varias ocasiones al trabajador “ponga más cuidado”, “esté más concentrado”, etc. Aun así, ante la supuesta ineptitud del trabajador, la empresa opta por despedirlo. Con esto se fuga una parte del saber hacer de la organización y se deben ejecutar nuevos procesos de selección, contratación, entrenamiento, etc. Los trabajadores que ingresan, ante cuestiones de curva de aprendizaje, se convierten en fuente potencial de riesgos, como defectos, accidentalidad, ineficiencia, entre otros. Entonces, lo que aparentemente solucionó el problema (impacto en causas visibles) se constituye en el motivo de la recurrencia de problemas, debido, por un lado, a que no se toman en cuenta las otras fuentes de variación y, por el otro, a causa de los efectos latentes de echar la culpa (ejemplo: aspectos emocionales, ...).

En la anterior descripción son aplicables varias premisas del pensamiento sistémico, como: “la cura puede ser peor que la enfermedad”, “soluciones rápidas que fallan” y “los problemas de hoy derivan de las soluciones del ayer” [8]. Sin embargo, el lector podría estar afirmando que, en el caso ilustrado, dichas premisas tienen validez en la medida en que las consecuencias de las demás causas ocultas (otros factores de variación), sean mayores que las del error humano. Pero, ¿qué tan válido resulta esto?

De acuerdo con gurús de la calidad como Joseph Juran, Philip Crosby y Edward Deming, es un error la tendencia a responsabilizar a los trabajadores por los defectos, pues como mínimo el 80 % de las causas corresponden al sistema y están bajo el control de los estrategas (citado en: [17, 19, 20]). Según Ruiz, González y Alcalde se debe “evitar centrar la atención en culpar al individuo, pues, aunque se reconozcan los errores activos, lo que verdaderamente interesa es conocer los errores latentes del sistema para buscar posibles soluciones” [21]. Asimismo, Port manifiesta que las causas de errores del sistema ameritan soluciones del sistema; es decir, algo en el sistema permitió que el error se generara o no se detectara, por lo que no es culpa del trabajador [22].

Este síndrome también puede entenderse desde la teoría “X”, la cual castiga el error y compensa el acierto [23]. Bajo esta óptica, en la medida en que el jefe obre bajo estos lineamientos se espera que los trabajadores desarrollen temor a los fallos, lo cual imposibilita el aprendizaje a través del error. Es decir, en lugar de considerar el error como una oportunidad de mejora, inherente al sistema, este se oculta y no da tiempo para reflexiones, análisis y soluciones, sino que prontamente se identifica un responsable. De esta manera, se desperdicia el potencial que tiene el intercambio recíproco de información para mejorar habilidades y cualidades de los individuos y, por ende, el desempeño de los procesos [24]. Entonces, el trabajador termina adoptando la misma postura “X” del jefe y evitará, a toda costa, la responsabilidad de un determinado comportamiento [25]. Además, dicho síndrome no solo puede surgir con la actividad laboral, sino desde los mismos hogares, la escuela, etc. Por ejemplo, si en la infancia o adolescencia el operador/gerente se vio atemorizado cada vez que se le relacionó con un fallo, recibiendo lo que se conoce como realimentación hacia el error, también puede presentar rasgos del citado síndrome.

En resumen, no solo desde factores internos sino también externos, la empresa es vulnerable a ser infectada con el síndrome “de echar la culpa”. Por tanto, es evidente la necesidad de estrategias para reconocer y mitigar este síndrome en análisis – solución de problemas, con el fin de apartar la mirada de factores visibles e ir en busca de las causas latentes. Aquellas que pueden conducir a un mejoramiento verdadero y sostenido del sistema.

2. DESARROLLO

2.1 Caso “Culpando al frutero”

Esta lúdica fue creada por [17] y expuesta en formato de novela de ingeniería. En esta oportunidad, dicha herramienta se describe metodológicamente, con el fin de comprenderla desde el punto de vista técnico, estimular su reproducibilidad y nutrir la discusión sistémica sobre el síndrome en cuestión.

El caso “Culpando al frutero” [17] simula una empresa de venta de canastas de frutas. Recién ingresó a la empresa un nuevo frutero. Este ha acumulado tres meses en la compañía. A fin de mes se evaluará qué tan bueno habrá resultado para el trabajo asignado, que se describe en la figura 2.

Cuando acabe el turno de trabajo (luego de empacar 8 pedidos de los clientes), el inspector consolidará los resultados: pedidos defectuosos (no conformes), pedidos totales (8), duración efectiva del turno (se contabiliza el tiempo desde el primer pedido hasta el último). Con esta información, se calcula el porcentaje de generación de defectos (PGD) y la productividad (pedidos conformes/minuto de frutero). Cabe anotar que el

número de frutas por pedido va aumentando, comenzando con tres y terminando con ocho frutas, lo cual es más difícil de memorizar.

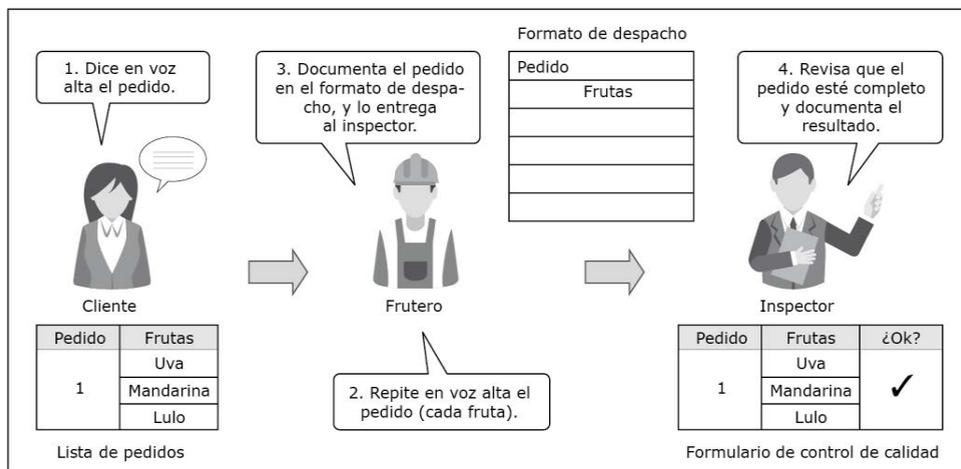


Figura 2. Procedimiento de producción de pedidos de frutas en escenario inicial.

Fuente: [17]

2.2 Equipos de trabajo y ubicación

En la lúdica intervienen tres personas: cliente, frutero(a) e inspector de calidad. Estas personas se ubican sentadas y cercanas entre sí, como se mostró en la figura 2. Es importante que tanto el inspector de calidad como el frutero tengan en sus asientos la posibilidad de apoyar sobre una base, puesto que les corresponderá escribir.

2.3 Escenarios de observación y materiales

Se simula dos escenarios de labor. El primero, llamado escenario con el síndrome de “echar la culpa”, busca culpables durante la identificación de las posibles causas de pedidos defectuosos. En cambio, el segundo (sin presencia del síndrome) se enfoca en factores latentes que den lugar al aprendizaje del sistema.

Los materiales para el primer escenario son: dos lapiceros (uno para el frutero y otro para el inspector), un reporte de pedidos (cliente), un formato de despacho (frutero) y un formato de control de calidad (inspector). En [17] puede profundizarse al respecto.

2.4 Despliegue

El presente despliegue no busca generalizar conclusiones hacia una población específica. En vez de ello, pretende ilustrar la forma en que la citada herramienta lúdica

posibilita crear un entorno simulado de trabajo para vivenciar síntomas y efectos del síndrome en cuestión, y propiciar la discusión de hallazgos. En ese sentido, “Culpando al Frutero” [17] se ejecutó en tres grupos de personas, con participación voluntaria, pertenecientes a una empresa manufacturera mediana. La conformación de cada grupo fue tal como se indicó en la figura 2 (cliente, frutero, inspector). Los grupos fueron intervenidos con la lúdica bajo los dos escenarios: 1) con síndrome de “echar la culpa” y 2) sin este. De cada escenario y grupo se tomaron dos observaciones, donde cada observación correspondió a ocho pedidos distintos. Así, se obtuvo un total de cuatro observaciones por grupo (o seis observaciones/escenario). En la figura 3, se resume el despliegue por grupo.

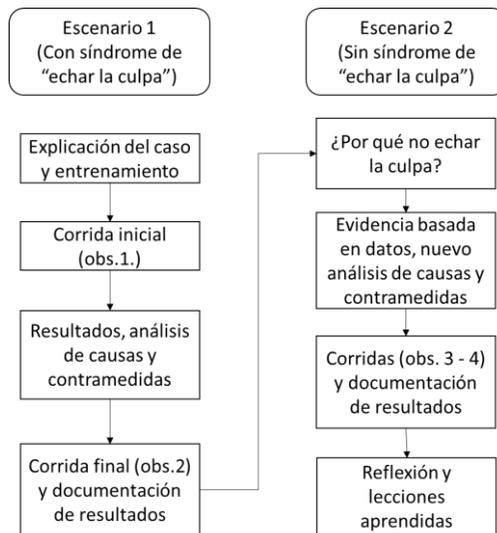


Figura 3. Secuencia de despliegue de la lúdica por cada grupo

Fuente: elaboración propia

El escenario con síndrome de “echar la culpa” fue el primero en desplegarse en cada grupo. Una vez terminó la primera corrida de producción, se documentaron los resultados, a través de dos indicadores: PGD y productividad (pedidos conformes/minuto). Luego, se dio inicio al análisis de causas, mediante una pregunta centrada en la persona: ¿Por qué el frutero dañó tantos pedidos? Allí, se recopilaban ideas de posibles causas de los pedidos defectuosos, y luego, cada equipo definió e implementó la contramedida. Se dio inicio a la segunda corrida de producción y se documentaron los nuevos resultados. Seguido, vino el segundo escenario (sin el síndrome de “echar la culpa”). En él, se compartieron razones (sistémicas y teóricas) expuestas en la sección de ¿Por qué no “echar la culpa”? Además, el análisis de causas, en lugar de centrarse en la persona, se enfocó sobre ¿qué factores pueden estar ocasionando pedidos defec-

tuosos?, previa socialización de datos sobre tasas de éxito de fruteros típicos. Al final del ejercicio, se dio espacio para reflexiones y para compartir lecciones aprendidas.

3. RESULTADOS

3.1 Escenario con síndrome de “echar la culpa”

Las ideas de posibles razones de pedidos defectuosos, encontradas en el primer escenario, giraron en torno a: frutero desconcentrado, poco comprometido, no capacitado, desmotivado, distracción desde los demás compañeros, ruido en el ambiente, y dificultad para retener tantas frutas (se mencionó en uno de los grupos). Los tres grupos aportaron, en su mayoría, ideas centradas en causas humanas, por lo que la contramedida fue cambiar el frutero o expresarle que “ponga más cuidado”. En la tabla 1 se presentan los resultados (PGD y productividad).

Tabla 1. Resultados para escenario con síndrome de “echar la culpa”

Grupos	G1		G2		G3	
	1	2	1	2	1	2
Corridas (observaciones)	1	2	1	2	1	2
Total pedidos	8	8	8	8	8	8
Pedidos defectuosos	4	3	3	4	3	3
Duración de la corrida (min)	4.0	3.86	4.01	3.7	3.98	4.1
PGD del grupo	44%		44%		38%	
PGD del escenario	42%					
Productividad del grupo	1.15		1.17		1.24	
Productividad del escenario	1.18					

Fuente: elaboración propia

Para este escenario (tabla 1), impregnado de “echar la culpa”, el PGD consolidado fue 42% (20/48), con una productividad de 1,18 pedidos conformes/minuto.

3.2 Escenario sin el síndrome de “echar la culpa”

El facilitador reorienta el análisis hacia causas latentes, alejadas de culpables. En ese sentido, se compartió información expuesta en [17] sobre la probabilidad de éxito (pedidos conformes) de tres fruteros, según la cantidad de frutas de los pedidos (figura 4).

Véase, en la figura 4, que los fruteros 1 y 2 acertaron todos los pedidos de máximo 4 frutas. Después de esta cantidad, fue notoria la tendencia a fallar. El frutero número 3 fue capaz de memorizar hasta 5 frutas. Ahora bien, haciendo énfasis en un entorno libre de “echar la culpa”, el nuevo análisis de causas se presenta en la figura 5.

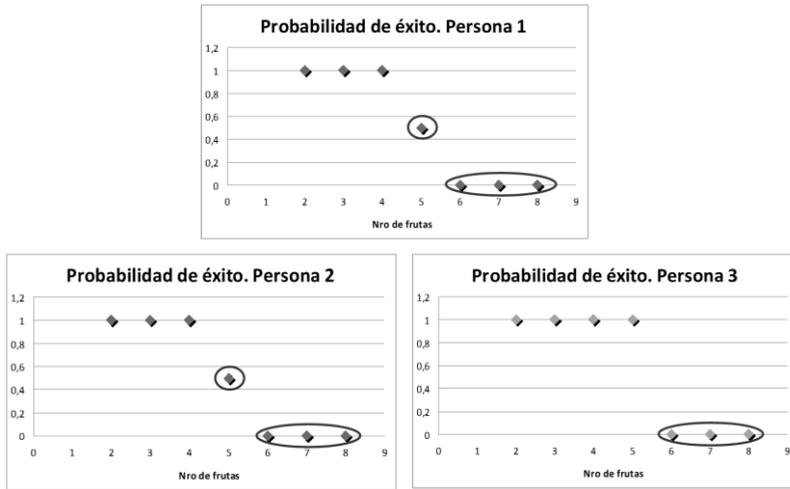


Figura 4. Información de apoyo en escenario sin el síndrome

Fuente: [17]

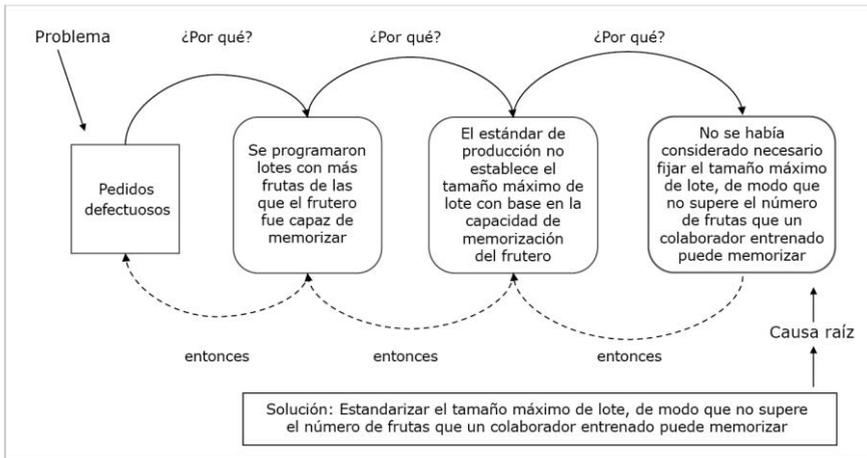


Figura 5. Diagrama de causas y consecuencias de “echar la culpa”

Fuente: [17]

Véase, en la figura 5, de izquierda a derecha, los cuestionamientos (¿por qué?) hasta llegar a la hipótesis de causa raíz del problema. Así mismo, de derecha a izquierda (parte inferior), nótese la coherencia entre causa – efecto, por medio del conector “entonces”. Bajo esta óptica, como no se había considerado necesario fijar el tamaño máximo de lote con base en la cantidad de frutas que un frutero típico (entrenado y motivado) tiende a memorizar, entonces no existe tal estándar de producción. Por tanto, al no existir, al frutero se le hacen pedidos con más frutas de las que este suele recordar. En

consecuencia, tiende a fallar en pedidos de 5 o más frutas. Nótese que la hipótesis es que la causa de los pedidos defectuosos se debe al diseño del estándar de producción y no a la persona. La solución propuesta es prácticamente la misma redacción que la causa, anteponiendo una acción; en este caso, estandarizar. En ese sentido, para intervenir dicha causa se dividió en dos partes (a y b) los pedidos con más de cuatro frutas, lo que lleva a estandarizar el tamaño máximo de lote, según la figura 6.

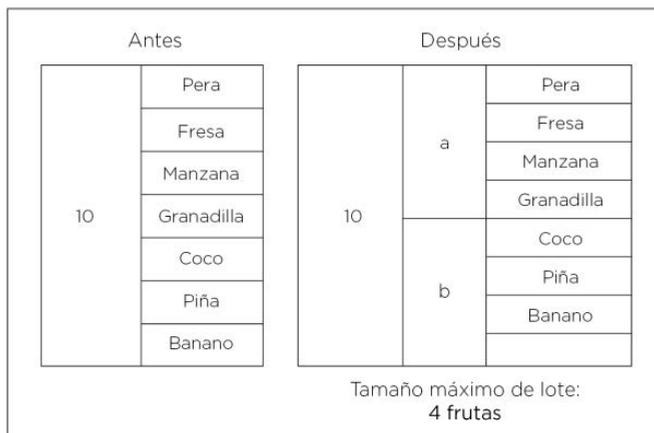


Figura 6. Nueva organización de los pedidos, ante el escenario sin síndrome de “echar la culpa”

Fuente: [17]

En este mismo escenario se aprovechó para mejorar el método de trabajo, atendiendo las ideas de mejora de los participantes. La figura 7 describe el nuevo método.

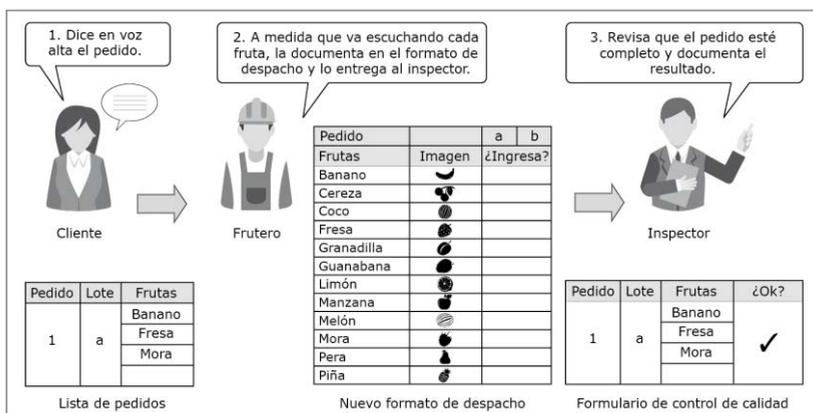


Figura 7. Procedimiento de producción de pedidos de frutas en escenario sin síndrome de “echar la culpa”

Fuente: [17]

Antes, el frutero debía repetir en voz alta el pedido y escribir cada fruta; pero, esta vez, el frutero solo debe marcar “✓” en la fruta que corresponda, a medida que el cliente hace el pedido. La tabla 2 ofrece los resultados obtenidos.

Tabla 2. Resultados para escenario sin síndrome de “echar la culpa”

Grupos	G1		G2		G3	
Corridas (observaciones)	3	4	3	4	3	4
Total pedidos	8	8	8	8	8	8
Pedidos defectuosos	1	0	0	0	0	0
Duración de la corrida (min)	2.94	2.88	2.85	3.1	2.98	2.86
PGD del grupo	6%		0%		0%	
PGD del escenario	2%					
Productividad del grupo	2.58		2.69		2.74	
Productividad del escenario	2.67					

Fuente: [17]

Para este escenario, vacunado contra el síndrome de “echar la culpa”, el PGD consolidado fue solo del 2 %, con una productividad de 2,67 pedidos conformes/minuto.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos bajo el escenario con el síndrome de “echar la culpa”, en el entorno simulado de trabajo, son notablemente desfavorables, comparados con el escenario libre de búsqueda de culpables. En la figura 8 se muestran los resultados consolidados para ambos escenarios. Se destaca que, bajo el escenario libre del síndrome, el PGD se redujo en 95% y la productividad aumentó en 126 %.

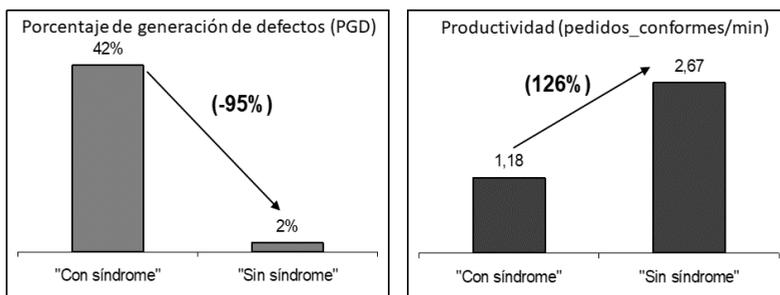


Figura 8. Comparación de resultados de ambos escenarios

Fuente: [17]

Estos resultados lúdicos y el desenlace en general, motivan varias reflexiones en contextos de análisis – solución de problemas empresariales. Así, en un entorno impregnado de “echar la culpa”, subyace un enfoque que considera al trabajador como un objeto de producción, al que hay que estar vigilando, supervisando para que “haga las cosas bien”. Las soluciones ante este estilo de gestión son “se lo dije, se lo advertí, pero no hizo caso, no sirve”. En cambio, bajo un escenario libre del síndrome de “echar la culpa”, el trabajador es un aliado, con sumo conocimiento, que puede ayudar a encontrar e intervenir la causa raíz de los problemas. La gerencia confía en sus empleados, cuida de ellos y busca liberarles el potencial humano. Todo esto redundo, entre otras bondades, en el mejoramiento de la calidad de los productos y la reducción de los costos y gastos.

En el primer escenario, la pregunta que motivó el análisis de causas giró en torno a “por qué cometió el error”. Esta forma de indagar tiende a estimular justificaciones en las personas, en lugar de la recopilación de los hechos. Mientras que, en el segundo escenario, que no indaga por causas humanas sino inherentes al sistema, se potencia la creatividad en busca de causas latentes que favorezcan el aprendizaje y permitan generar cambios en el saber hacer del sistema.

Otro aspecto por señalar, es la ausencia de información objetiva en el primer escenario. En tanto que el segundo estuvo acompañado de datos, procesados y resumidos en información estadística, que estimularon el proceso racional de toma de decisiones.

Es evidente que “echar la culpa” requiere menos recursos, tiempo e inversiones para fijar la contramedida, pero al final, los resultados hablan por sí solos. La práctica de “echar la culpa” conlleva a memorandos, llamados de atención y despidos, por lo que no hace más que tapar un hueco y destapar otros, cobrando validez premisas como “los problemas de hoy provienen de las soluciones del ayer” [8]. Bajo tal enfoque, los analistas de problemas evaden la responsabilidad de las decisiones que se toman o se dejan de tomar en el sistema, y se limitan, como en el caso de la lúdica, a concluir que los defectos se deben a “enemigos externos” (Ej: falta de concentración del frutero). Todo ello no hace más que deteriorar el sistema, pues genera un ambiente de tensión, de temor al despido, a descargos, a memorandos, etc. Incluso, puede ser tal la presión sobre la persona, que esta termina por convencerse de que es “culpable”, lo cual puede reducir su autoeficacia y su autoestima. De este modo, la “solución” no es más que prometer que “pondrá más cuidado” y, con ello, los ciclos viciosos-latentes se presentan una y otra vez.

La tendencia a “echar la culpa” ha sido mencionada en diversos ámbitos. Por ejemplo, Argyris advierte que esta práctica es una reacción defensiva, incluso en

personas de alta formación, y frustra la capacidad de aprender a aprender, lo que limita la mejora continua del individuo y de la organización [9]. Lamming, en contextos de cadenas de suministros, resalta la tendencia de buscar excusas y culpar a los demás por los problemas del sistema, sobre todo por parte de los directivos [10]. Kanji, en un escenario de gestión de la calidad en una empresa mediana, reporta la inclinación de jefes de departamentos a culpar a otros por la fabricación defectuosa [25]. Leape, refiriéndose a un escenario de instituciones de salud, señala “intensa presión sobre los individuos para ocultar los errores, negar la responsabilidad, distanciarse de ellos, culpar a los demás” [11, p.9]. Asimismo, [12], en una aplicación de la metodología *Lean* en el sector salud, se encontró, entre otros hallazgos, frustración e inclinación de diversos grupos profesionales por culpar a otros ante las dificultades. Adicionalmente, en [13] se resalta que cuando las personas son menos propensas a culpar a otros por los errores, se facilita el trabajo en equipo. Y, de hecho, se sabe que este último es un requisito indispensable para el éxito de las iniciativas de mejora. En esa vía, [14], en un contexto de satisfacción con el aprendizaje por parte de profesionales, señala, entre otras cosas, la importancia de no culpar a otros por las dificultades; que, en su lugar, es necesario responsabilizarse de los retos y afrontarlos con determinación en la búsqueda de la mejora continua. Sumado a ello, Yalçin, en un ambiente de enseñanza-aprendizaje del *Lean* bajo un nuevo método, recalca la necesidad de que los educadores derriben primero el hábito de culpar a otros cuando los resultados académicos en los estudiantes no son satisfactorios [15]. En contextos de salud, en [7] se alerta que, al echar la culpa, la organización falla en aprender que los errores marcan el inicio de una investigación sobre el tema, en vez de constituirse en la conclusión de esta. Por lo que es de entender que tal síndrome sea referido como una de las patologías más nocivas para la organización [7].

A pesar de los constantes reportes de la presencia del síndrome de “echar la culpa” en diversos ámbitos y de sus consecuencias sistémicas, la literatura sobre mejoramiento empresarial (*Lean*, *Six Sigma*, *TPM*, y Gestión de la Calidad en general) no ha estudiado lo suficiente este tipo de manifestación. La mayoría de los estudios, aunque valiosos, giran en torno a proponer marcos de trabajo o metodologías para análisis – solución de problemas, entre ellos: [26-30]. Asimismo, los estudios de naturaleza teórica (Ej: [1, 2]), si bien han contribuido con la comprensión de predictores del desempeño de las iniciativas de mejora, han tendido a considerar el factor macro “cultura/estilo”. No obstante, dicho síndrome, a pesar de que está inmerso en tal factor, presenta particularidades que lo hace único; más aún, cuando tiene tanta influencia sobre una de las etapas más críticas de la solución de problemas: el análisis de causas.

Así, se generan varias oportunidades de estudio, entre ellas: seguir observando y retratando las manifestaciones sistémicas del citado síndrome en la empresa,

crear una medida fiable y válida del constructo que representa, e incorporarlo como factor moderador/mediador, desde la Teoría Contingente, en modelos explicativos del desempeño. Esto resulta pertinente, teniendo presente el interés de la comunidad académica por explicar el desempeño de las iniciativas de mejora empresarial, a partir de constructos como: capacidad de absorción, liderazgo transformacional, cultura de aprendizaje, estrategia de innovación, etc. Todos ellos podrían verse favorecidos o reprimidos según la intensidad del síndrome de “echar la culpa” en la empresa.

Desde una óptica de análisis – solución de problemas en la empresa, este trabajo amplía y aporta patrones, explicaciones y hallazgos sobre cuatro aspectos clave acerca del síndrome en cuestión, reportados por [7] para contextos de salud (“vulnerable system syndrome”).

El primer aspecto clave que [7] plantea es que, debido a tal síndrome, algunos sistemas son más susceptibles a los eventos adversos. Al respecto, el presente artículo ha aportado evidencia exploratoria proveniente de un entorno simulado de trabajo (razones centradas en la persona, PGD y productividad). Además, ha mostrado cómo, desde una mirada sistémica, la presencia de tal síndrome alimenta tensiones emocionales (“ponga más cuidado”, “se lo dije/advertí”, ...) en vez de tensiones creativas, lo cual conduce a la recurrencia de problemas. El segundo aspecto planteado por [7] es la perpetuación de los niveles superiores de culpar a los trabajadores de primera línea, la tendencia a negar los problemas del sistema y la justificación de tales decisiones en el logro de las metas establecidas. Con relación a ello, se han citado y explicado estructuras sistémicas concretas (ciclos viciosos), las cuales se han interpretado desde contextos empresariales de análisis – solución de problemas. El tercero tiene que ver con la importancia de reconocer la presencia de este síndrome en las organizaciones, por lo que este artículo ha descrito metodológicamente una herramienta lúdica creada por Pérez-Rave [17] para revelar y reflexionar sobre la presencia de dicho síndrome. Para ello, tomando en cuenta el enfoque constructivista y el aprendizaje lúdico, dicha herramienta facilita que gerentes, personal táctico y operativo, docentes, estudiantes, etc., vivan la experiencia de trabajo en dos organizaciones simuladas; una que tiene el síndrome de “echar la culpa” y otra que lo ha derribado. El cuarto aspecto planteado por [7] es la necesidad de no quedarse en soluciones sintomáticas basadas meramente en acción – reacción, sino trascenderlas por medio de modificaciones constantes en los supuestos bajo los cuales se emprenden las acciones. Para ello, este artículo ha aportado razones de gurús de la calidad, de otros trabajos de referencia y de exploraciones empíricas sobre porqué la mayoría de los errores en la empresa no corresponden a las personas sino al sistema.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo explora el síndrome de “echar la culpa” desde una mirada sistémica y aporta elementos para reflexionar sobre la necesidad de mitigarlo. Asimismo, describe la lúdica “Culpando al frutero” [17] desde una orientación metodológica, contraria a como fue expuesta originariamente en [17] (narrativa). Esta puede ser empleada por docentes, consultores y formadores en general para enfrentar a los aprendices a un entorno simulado de trabajo con el síndrome de “echar la culpa” y sin este. De esta manera, bajo un enfoque constructivista, facilita reflexionar sobre el tema, identificar sus señales e intervenirlas, antes de llevar a cabo el análisis de causas.

Desde un punto de vista teórico, se invita a profundizar en el síndrome de “echar la culpa” en las organizaciones, así como a incorporarlo, en futuras investigaciones explicativas, como posible factor moderador o mediador de relaciones entre constructos en auge. De hecho, según [7], en escenarios de salud, la habilidad de reconocer los síntomas de este síndrome es catalogada como un factor clave de éxito. Además, dicho autor recalca que no hay organizaciones libres de caer en manos de tal síndrome [7].

REFERENCIAS

- [1] R. McLean, J. Antony y J. Dahlgard, “Failure of Continuous Improvement initiatives in manufacturing environments: a systematic review of the evidence,” *Total Quality Management and Business Excellence*, vol. 28, N.º3-4, pp. 219-237, 2017.
- [2] J. Bessant, S. Caffyn, J. Gilbert, R. Harding y S. Webb. “Rediscovering continuous improvement,” *Technovation*, vol. 14, N.º1, pp. 17-29, 1994.
- [3] R. Subramanian, “Soft-skills training and cultural sensitization of Indian BPO workers: A qualitative study,” *Communications of the IIMA*, vol. 5, N.º2, pp. 11-24, 2015.
- [4] A. Escrig-Tena, M. Segarra-Ciprés, B. García-Juan y I. Beltrán-Martín, “The impact of hard and soft quality management and proactive behaviour in determining innovation performance,” *International Journal of Production Economics*, N.º 200, pp. 1-14, 2018.
- [5] L. Donaldson, *The contingency theory of organizations*, Londres: Sage Publications, 2001,
- [6] J. Baron y D. Kreps, “Consistent human resource practices,” *California Management Review*, vol. 41, N.º 3, pp. 29-53, 1999.
- [7] J. Reason, J. Carthey y M. De Leval, “Diagnosing vulnerable system syndrome: an essential prerequisite to effective risk management,” *Quality in Health Care*, vol. 10, N.º 2, pp. 21-25, 2001.
- [8] P. Senge, *La quinta disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*, Ciudad de México: Naucalpan, 1998.

- [9] C. Argyris, "Teaching smart people how to learn," *Harvard Business Review*, vol. 69, N.º 3, pp. 5-15, 1991.
- [10] R. Lamming, "Squaring lean supply with supply chain management," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 16, N.º 2, pp. 183-196, 1996.
- [11] L. Leape, "Human factors meets health care: The ultimate challenge," *Ergonomics in Design*, vol. 12, N.º 3, pp. 6-12, 2004.
- [12] S. New, M. et al., "Lean participative process improvement: outcomes and obstacles in trauma orthopaedics," *PloS one*, vol. 11, N.º 4, pp. 1-13, 2016.
- [13] P. Castka, C. Bamber y J. Sharp, "Measuring teamwork culture: the use of a modified EFQM model," *Journal of management development*, vol. 22, N.º 2, pp. 149-170, 2003.
- [14] C. Mercado, E. Bayugo, Z. Leynes, C. Lontok, D. Medilla y J. Manongsong, "Accounting Students' Learning Satisfaction of Professional Subjects as Basis for Continuous Improvement," *Asia Pacific Journal of Education, Arts and Sciences*, vol. 3, N.º 1, pp. 99-109, 2016.
- [15] F. Yalçın, "A new method in education: Lean," *Electronic Turkish Studies*, vol. 12, N.º 6, pp. 811-826, 2017.
- [16] I. Lynch, P. Roberts, J. Keebler, O. Guttman y P. Greilich Error, "Detection and Reporting in the Intensive Care Unit: Progress, Barriers, and Future Direction," *Current Anesthesiology Reports*, vol. 7, N.º 3, pp. 310-319, 2017.
- [17] J. Pérez-Rave. *El legado de Robert: Novela de ingeniería para el mejoramiento empresarial*, Medellín: Idinnov, 2015.
- [18] J. Sexton, E. Thomas y R. Helmreich, "Error, stress, and teamwork in medicine and aviation: cross sectional surveys," *Brit Med J*, N.º 320, pp. 745-749, 2000.
- [19] D. Pérez-Arrieta. Modelo de análisis basado en el mejoramiento continuo para reducir la base de la pirámide de la seguridad: actos y condiciones inseguras y con esto el número de ocurrencias anormales de seguridad, medio ambiente y salud, Tesis de pregrado, Universidad de la Sabana, Bogotá, [En línea], acceso 05 de junio, 2017; Disponible: <https://goo.gl/6i0ZPC>
- [20] M. Hernández. Proceso de investigación de accidentes laborales, estudio de resultados, verificación de la calidad de informes disponibles en la Asociación Chilena de Seguridad y definición de modelo de análisis de incidentes y procesos. Asociación Chilena de Seguridad ACHS, junio de 2010. [En línea], acceso 04 de junio, 2010; Disponible: <http://www.fiso-web.org/Content/files/proyectos-premio-fiso/1170.doc>
- [21] P. Ruiz, C. González y J. Alcalde, "Análisis de causas raíz. Una herramienta útil para la prevención de errores," *Revista de Calidad Asistencial*, vol. 20, N.º 2, pp. 71-79, 2005.
- [22] J. Port, "Comprendiendo la variación. Análisis de causa para poner en práctica medidas correctivas," *Quality Progress*, [En línea], acceso 04 de junio, 2017; Disponible: <http://asq.org/quality-progress/2012/03/back-to-basics/volviendo-a-los-fundamentos-comprendiendo-la-variacion.html>

- [23] A. Vainikka y M. Young-Scholten, “Direct access to X’-theory: evidence from Korean and Turkish adults learning German,” *Language acquisition studies in generative grammar*, vol. 31, N.º4, 71-89, 1994.
- [24] P. Whithaker, *Cómo gestionar el cambio en contextos educativos*, Madrid: Narcea, 2005.
- [25] G. Kanji, “Implementation and pitfalls of total quality management,” *Total Quality Management*, vol. 7, N.º3, pp. 331-343, 1996.
- [26] I. Alsyouf, U. Kumar, L. Al-Ashi y M. Al-Hammadi, "Improving baggage flow in the baggage handling system at a UAE-based airline using lean Six Sigma tools", *Quality Engineering*, vol. 30, N.º 3, pp. 432-452, 2018.
- [27] L. Martin, K. Donohoe y D. Holdford, “Decision-Making and Problem-Solving Approaches in Pharmacy Education,” *American journal of pharmaceutical education*, vol. 80, N.º3, pp.1-6, 2016.
- [28] K. Łyp-Wrońska, “World Class Manufacturing methodology as an example of problems solution in Quality Management System,” *Key Engineering Materials*, vol. 682, pp. 342-349, 2016.
- [29] C. Milner y B. Savage, “Modeling continuous improvement evolution in the service sector: A comparative case study,” *International Journal of Quality and Service Sciences*, vol. 8, N.º3, pp. 438-460, 2016.
- [30] A. Camarillo, “Support to Continuous Improvement Process in Manufacturing Plants of Multinational Companies through Problem Solving Methods and Case-Based Reasoning Integrated within a Product Lifecycle Management Infrastructure,” *ICCBR*, (Cuadernos de trabajo), pp. 259-261, 2015.

Instrucciones a los autores

Revista Ingenierías Universidad de Medellín, es una revista científica para la publicación de artículos de alta calidad resultantes de las investigaciones en el campo de la ingeniería. La revista dará prioridad a las primeras tres tipologías de artículos que se describen a continuación y evaluará la conveniencia de aceptar o no productos derivados de investigación de acuerdo con su relevancia y calidad.

- 1) **Artículo original.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- 2) **Artículo de revisión.** Documento resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas sobre un campo de la ciencia o la tecnología con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de, por lo menos, 50 referencias.
- 3) **Artículo derivado de conferencia.** Son resultados de proyectos de investigación terminados o en curso en los que se presentan aportes originales y relevantes para la ciencia que requieren pronta divulgación. Se elaboran a partir de ponencias en eventos científicos de calidad académica.
- 4) **Artículo no derivado de investigación.** Documento que presenta puntos de vista originales que surgen de una revisión de un tema, de la reflexión sobre un problema particular, del interés para abrir el debate o del análisis continuado en el tiempo de un problema de interés para la ciencia, para lo cual se recurre a fuentes de calidad científica.

Las personas interesadas en someter a evaluación sus escritos, con destino a publicación en la *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, deberán cumplir las condiciones que se enuncian a continuación. Los artículos que no se ajusten a la temática o al estilo de la revista serán devueltos sin pasar a evaluación.

- Los artículos deben ser escritos preferiblemente en inglés, aunque se aceptan contribuciones en español o portugués. No se aceptan artículos ya publicados o

que se encuentren en proceso de publicación en otra revista. También es política de la revista publicar únicamente artículos que cuenten con el respaldo por escrito de todos sus autores. **Para el efecto, se recomienda descargar la carta modelo de originalidad y cesión de derechos de nuestro sitio web** <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/about/submissions#onlineSubmissions>

- El artículo, la carta de originalidad y cesión de derechos con las respectivas firmas escaneadas y las figuras en archivos independientes deben ser enviados a través de nuestro sistema en línea disponible en <http://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/about/submissions#onlineSubmissions>

Para cualquier duda en el manejo de la plataforma, escribir a revistaingenierias@udem.edu.co

- Se presentará el artículo en MS Office Word®, en tamaño carta (215 x 280 mm u 8,5 x 11 pulgadas), a doble espacio, a una columna, con márgenes de 2,5 cm en los cuatro lados, en letra Arial tamaño 12 y con una extensión máxima de 5000 palabras para los artículos derivados de investigación, y de hasta 6000 palabras para los artículos de revisión, excluyendo títulos, resúmenes y palabras clave. No se aceptan artículos de una extensión mayor.
- Salvo los artículos de revisión, no se admiten escritos con más de 20 referencias bibliográficas.
- Todas las páginas del artículo deben ser numeradas consecutivamente en la esquina superior derecha.
- El artículo debe llevar numeración de renglones o líneas a la izquierda. La numeración de renglones debe ser consecutiva a lo largo del documento sin que deba reiniciarse en cada página.

SECCIONES

El artículo se debe dividir en la siguiente secuencia de secciones:

1. En la primera página el título centrado del artículo en español e inglés. Como el envío es por la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista, debe garantizar el anonimato en la evaluación a doble ciego. En consecuencia, en el artículo enviado no se mencionan o incluyen a los autores. Sin embargo, en el registro de cada autor en la plataforma, se deben señalar con claridad sus títulos académicos o cargos que indiquen su autoridad en la materia, la dirección física, los teléfonos, la dirección de correo electrónico institucional y el fax de cada uno. No deben usarse direcciones de correo electrónico personales.
2. El resumen, escrito en español y traducido al inglés tendrá una extensión máxima de 150 palabras, e irá acompañado de un máximo de seis palabras clave en am-

bos idiomas al final. Las palabras clave deberán ser extraídas de un tesoro para permitir su homologación internacional. Si el idioma de origen es diferente al español o al inglés, en todo caso el título, el resumen y las palabras clave deben ir adicionalmente en estos dos idiomas

3. El resumen debe especificar el tipo de artículo para facilitar su clasificación, es decir, debe indicar con claridad si se trata de un resultado de investigación, una revisión de tema o una reflexión del autor o autores. En caso de tratarse de un resultado de investigación se debe mencionar el origen de los fondos con los que se financia el estudio.
4. En las páginas siguientes irán en su orden: la introducción, los materiales y métodos, los resultados, la discusión, los agradecimientos y las referencias. Estos títulos van en mayúscula sostenida. La numeración de las secciones empieza en materiales y métodos con el 1 en arábigos. La introducción y las referencias no se numeran.

TABLAS, FIGURAS Y ECUACIONES

- Las tablas, figuras y ecuaciones deben estar citadas en el texto, enumérelas en el orden en que aparecen citadas por primera vez, evite redundancia entre tablas, figuras y texto. La rotulación de cada tabla debe ir a la cabeza de la misma, la fuente y la simbología deben aparecer al pie de la tabla.
- Las ecuaciones deben enumerarse en arábigos entre paréntesis al margen extremo derecho de cada una. Se exige que las ecuaciones estén escritas en el editor de ecuaciones de MS Office Word® y no incrustadas como imágenes en el texto.
- Todas las ilustraciones, incluyendo fotos, diagramas, mapas y gráficos, se clasifican como figuras y deben tener una resolución no inferior a 300dpi. Las figuras deben realizarse en alta calidad y resolución, con líneas y letras de suficiente tamaño, de manera que permanezcan legibles cuando se procesen para la publicación. Las fotografías deben ser de excelente calidad. Se debe poner un número y una leyenda en la parte inferior de cada figura, así como su respectiva fuente y hacer referencia a ella en el lugar apropiado del texto. La leyenda de cada figura o tabla tiene que ser lo suficientemente elocuente, para que la figura o tabla se pueda leer independientemente del texto.
- Todas las tablas y figuras deberán citarse en el texto pero ubicarse al final del artículo con su respectiva numeración para facilitar el proceso de edición.
- No se aceptan tablas incrustadas como imagen. Estas deben estar hechas en MS Office Word® o MS Office Excel®.

- Las figuras deben subirse en archivos independientes en formato tiff, gif o jpg a la sección de archivos complementarios en la plataforma OJS de la Revista al momento del envío. Este requisito es obligatorio para garantizar la calidad de las imágenes en la edición final.

ABREVIATURAS Y ESTILO

- No se admite el uso de pies de página en el texto, salvo los necesarios para indicar la filiación institucional de los autores.
- Por ninguna razón se deben dividir las palabras en el margen derecho en ningún lugar del artículo, esto incluye las palabras unidas por un guion, así como las divisiones entre sílabas.
- Se debe usar el sistema métrico y sus abreviaturas para todas las medidas y utilizar decimales en lugar de fracciones (por ejemplo, 0,6), excepto en ecuaciones.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto no usar letra negrita sino cursiva.
- Si el artículo está escrito en español o portugués, las expresiones en inglés que no tengan traducción deben estar en letra cursiva.

REFERENCIAS

Cuando se citen referencias en el texto, se deben emplear las pautas ilustradas con los siguientes ejemplos, que están adaptadas del IEEE Editorial Style Manual versión 2007. Se recomienda el uso del estilo IEEE Design Test Comp con el software EndNote Web® o EndNote® de escritorio de Thomson Reuters.

Las referencias que se citen en el texto deben ir encerradas entre corchetes y numerarse en arábigos. Su orden en la lista de referencias al final del artículo deberá respetar el orden de aparición en el escrito y se anteceden de su respectiva numeración entre corchetes.

Referencias en el texto. Durante la escritura del texto, debe emplearse la citación del siguiente modo:

- Cuando una expresión o párrafo requiera de varias citas, se deben incluir en un solo corchete. Si se trata de una secuencia de tres o más referencias, se debe poner la referencia inicial y la final separada por un guion. Si las referencias no son secuenciales, se debe separar cada una por una coma, pero conservando la condición de estar en un solo corchete.

- As shown by Brown [4-6]; as mentioned earlier [2, 4-7, 9]; Smith [4] and Brown and Jones [5]; Wood *et al.* [7]. *Nota:* cuando se trate de más de dos autores deben indicarse las iniciales de nombre y apellido del primero, seguido de la expresión *et al.*
- Cuando se trata de dos autores, se utiliza la conjunción “y” entre ellos, o “and” si el artículo está en inglés. No se permite el uso del signo *ampersand* “&”.
- Como se muestra en [3]; de acuerdo con [4] y [6-9]
- Si se vuelve a citar la misma fuente en otro lugar del documento, se conserva el número asignado inicialmente.

TIPOS DE REFERENCIAS

Artículos de revistas. Inicial(es) de nombre(s), apellido(s) de autor con mayúscula inicial, título del artículo encerrado entre comillas, título de la revista en cursiva, volumen, número, rango de páginas, año. Ejemplos:

- [1] L. Benvenuti y L. Farina, “Positive and compartmental systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, N.º 2, pp. 370-373, 2002.
- [2] H. A. Rondón y F. Reyes, “Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento,” *Rev. Ing. Univ. de Medellín*, vol. 6, N.º 11, pp. 65-90, 2007.
- [3] J. C. Carr *et al.*, “Surface interpolation with radial basis functions for medical imaging,” *IEEE Transaction on medical imaging*, vol. 16, N.º 11, pp. 96-107, 1997.

Libros. Inicial(es) de nombre(s), apellido(s) de autor con mayúscula inicial, título del libro en cursiva, edición (se menciona después de la primera), lugar de publicación, editorial, año de publicación, total de páginas de la obra. Ejemplos:

- [4] B. Klaus y P. Horn, *Robot vision*. Cambridge, MA: MIT Press, 1986, 513 p.
- [5] J. P. Uyemura. *Introducción al diseño de sistemas digitales: un enfoque integrado*. Ciudad de México: International Thomson Editores, 2000, 496 p.
- [6] R. Lauwerys *et al.*, *Toxicologie Industrielle et intoxications professionnelles*, 5.^a ed., París: Elsevier Masson SAS, 1997, 1259 p.

Capítulos de libro. Inicial(es) de nombre(s), apellido(s) de autor con mayúscula inicial, título del capítulo entre comillas. Se escribe la expresión “en” seguida del título del libro en letra cursiva, edición (se menciona después de la primera), inicial(es)

de nombre(s), apellido(s) de editores o compiladores con mayúscula inicial seguido de la expresión “ed(s).”, rango de páginas precedido de la expresión “pp.”, lugar de publicación, editorial, año. Ejemplos:

- [7] G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics,” en *Plastics vol. 3, Polymers of Hexadromicon*, 2.^a ed., J. Peters, ed., pp. 15-64, Nueva York: McGraw-Hill, 1964.
- [8] L. Arnold y H. Crauel, “Iterated function systems and multiplicative ergodic theory,” en *Diffusion Processes and Related Problems in Analysis, Vol. II, Stochastic Flows, Progress in Probability 27*, M. A. Pinsky y V. Vihstutz, eds., pp. 283-305, Boston: Birkhäuser, 1992.

Fuentes electrónicas. Pueden ser libros en versión electrónica, artículos, documentos de trabajo, monografías, material en CD, entre otros. Se incluyen inicial(es) de nombre(s), apellidos(s) de autor, título del escrito u obra, entre corchetes se indica la procedencia [En línea], o [CD-ROM], edición si aplica, nombre de la revista o medio si aplica en letra cursiva, volumen si aplica, número si aplica, páginas, enlace electrónico precedido de la expresión “disponible” y año. Cuando se trate de una página web, se utiliza, además, la expresión “acceso, mes, año” después de indicar la procedencia. Ejemplos:

- [9] N. Rajesh y K. Yogesh, “Surfactant enhanced chromium removal using a silica gel column,” *Universitas Scientarum*, [En línea], vol. 6, N.º 1, Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/499/49911595006.pdf>, 2001.
- [10] B. Moore *et al.*, “Eclipse development using the Graphical Editing Framework and the Eclipse Modeling Framework,” [En línea], Disponible: <http://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg246302.pdf>, 2004.
- [11] EEA. “European Environment Agency. State of the art of noise mapping in Europe,” [En línea], acceso 14 de diciembre, 2010; Disponible: <http://www.cedex.es/>, 2005.

Normas y estándares. Incluyen la entidad que los genera, el título del estándar en cursiva, la numeración o nomenclatura y su año. Ejemplos:

- [12] USACE, *Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, ETL 1110-2-556*, U. S. Army Corps of Engineers, 1999.
- [13] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.

Ponencias, conferencias. Inicial(es) de nombre(s), apellido(s) de autor con mayúscula inicial, título de conferencia o ponencia encerrado entre comillas, evento al que es presentado el trabajo precedido de la expresión “presentado en”, lugar del evento, fecha. Ejemplos:

- [14] J. G. Kreifeldt, “An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise,” presentado en Intl. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, 1989.
- [15] D. Nieto *et al.*, “Movilidad, territorio y sostenibilidad,” presentado en el 5.o Foro del Investigador, Universidad de Medellín, Medellín, 2009.

Consultar con la revista en el correo electrónico revistaingenierias@udem.edu.co cualquier duda acerca del uso del estándar de citación.

Por tratarse de una publicación con arbitraje, la revista recibe, revisa y envía los trabajos al Comité Editorial, el cual aprueba su publicación con base en el concepto de pares evaluadores especializados. Una vez notificado el autor sobre las observaciones del Comité Editorial, dispondrá de dos semanas para devolver el artículo con las modificaciones sugeridas, en caso contrario, el artículo podrá ser rechazado.

Como derechos de autor se reconoce un ejemplar de la revista, que se envía a cada autor.

Correspondencia:

Los autores deben especificar cuál de ellos es el autor de correspondencia. Esta será la única persona con la cual el Editor o el Comité Editorial tendrán contacto para todo lo relacionado con el proceso editorial y la publicación.

Guide for Authors

Authors who send articles to be published in any of the Universidad de Medellín journals should send a certification specifying that the article has not been previously published, that he/she is the author and that it has not been submitted to be published at the same time it is being submitted for publication in Universidad de Medellín journals. The certification should also indicate that Universidad de Medellín is the owner of the article's copyright and that the institution is authorized to publish the article either printed, by Internet, by Cd, etc.

Revista Ingenierías Universidad de Medellín is a scientific journal in which high quality articles, resulting from research in engineering field, are published. According to Publindex de Colciencias, this journal will prioritize the following type of articles:

- 1) *Article of scientific and technological research. It is a document which presents – in a detailed way- original results of a completed research project. The structure generally has the following characteristics: introduction, methodology, results, and conclusions.*
- 2) *Reflection article. A document which presents completed research results, under the author's analytic, interpretative or critical perspective on a specific topic, taking original sources.*
- 3) *Review article. A document which presents completed research results, analyzing, systematizing and integrating results of published or not published research, about a field in science or technology, in order to disclose advances and development techniques. Up to 50 bibliographic references are accepted in this type of article.*

Authors interested in submitted articles to be evaluated for publication, with the purpose to be published in *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* should comply with the following requirements. If articles do not follow these requirements or are not within the topics of the journal will be returned with no evaluation at all.

- Articles may be written in English, Portuguese or Spanish. Articles already published or submitted to be published in another journal will not be accepted.

It is also a policy of the journal to publish only articles supported in writing by all the authors of the article.

- The article should be submitted in a CD duly identified and printed copy in bond paper, letter size (215 x 280 mm or 8.5 x 11 inches), specifying the type of text processor used (preferably in MS Office Word®), written in only one face of the paper, double space, one column, margins of 2.5 cm each side, Arial letter 12, with a maximum of 20 pages. Review articles could be written in a maximum of more 3 pages for the bibliography. Articles written in more pages will not be accepted.
- Except for review articles, articles with more than 20 references will not be accepted.
- All pages of the article should be numbered on the right superior corner.

SECTIONS

The article should have the following sections:

1. In the first page, the title of the article in the middle of the line in Spanish and English followed by the name of authors- also centered. In footnotes, there should appear academic titles, positions indicating knowledge of the topic, home or office address, telephone number, institutional e-mail, and fax number of each author. Personal e-mails should not be included.
2. The abstract of the article in English and Spanish with maximum of 150 words and 6 key words. Key words should also be written in English at the end of the abstract, and shall be taken from a thesaurus for a better international understanding.
3. The abstract should specify the type of article for a better classification; that is,
4. research result, topic review or author (s) reflection.
5. In the following pages, there should appear introduction, materials and methods, results, acknowledgment, and references. The whole should be written in capital letters. The numbering of sections begins in materials and methods under No. 1 in Arabic numbers. Introduction and references are not numbered.

TABLES, FIGURES, AND EQUATIONS

- Tables, equations, and figures should be quoted in the text; they should be numbered according to the order of appearance; avoid redundancy among tables, figures, and text. The name of each table should be placed on the top of the table; the source and symbols should be written at the button of the table.

-
- Equations should be numbered in Arabic numbers within parenthesis on the right side of each one. They should be written in MS Office Word® equations editor; they should not be placed as images.
 - All illustrations, including photographs, diagrams, maps, and graphs are classified as figures and should be written in a resolution not lower than 300dpi. Figures should be made in high quality and resolution, with line and letters with in a good size, so they can be legible when processed for publication. Photographs should be of excellent quality. They should bear a number and something written in the lower part of each one, as well as the source and make a reference to it in the appropriate place in the text. The information of each photograph or table should be meaningful enough so the it can be read without depending on the written text.
 - All tables and figures should be quoted in the text; however, they should be placed at the end of the article with corresponding number in order to make the edition process easy.
 - Tables placed as images are not accepted. They should be made in MS Office Word® or MS Office Excel®.
 - Pictures should be provided in independent files in tiff, gif or jpg form, within the CD in which the article is provided. This requirement is mandatory in order to assure the quality of images in the final edition.

ABBREVIATION AND STYLE

- Footnotes are not accepted in the text, expect the necessary ones to indicate the author's institutional affiliation.
- Word division at the right margin of the article is not accepted, including hyphenated words as well division between syllables.
- For all measures, metric system and its abbreviations and decimals instead of fractions (e.g.0.6) should be used, except in equations.
- Page break and end of section should not be included.
- For highlighting words or phrases only italics is accepted. Letters or phrases in bold are not accepted.
- If the article was written in Spanish or Portuguese, expressions with no translation should be written in italics.

REFERENCES

For references quoted in the text follow these examples, adapted from IEEE Editorial Style Manual version 2007. IEEE Design Test Comp with EndNote Web® software or Thomson Reuters' EndNote® is recommended.

References quoted in the text should be within brackets and numbered with Arabic numbers. They should be written in the same order at the end of the text in EnNotes and followed by their corresponding number within brackets.

References in the text. While writing the text, quotation should be made as follows:

- Several quotations in a expression should be included in one bracket. For three or more sequential references, initial and final references should divided by a hyphen. If references are not sequential, they should be separated by a comma but in only one bracket.
- As shown by Brown [4-5]; as mentioned earlier [2, 4-7, 9]; Smith [4] and Brown and Jones [5]; Wood et al. [7]. Note: For more than two authors, initials of name and surname of the first author should be written followed by the expression et al.
- For two authors, use the expression “y” between them, or “and” if written in English. The sign ampersand “&” is not accepted.
- As shown in [3], according to [4] and [6-9], if the same source is quoted in another part of the document, it should bear the number previously assigned.

TYPES OF REFERENCES

Journal articles. Author's names and surnames' initials should be written in capital letters, the title of the article should be within quotations, the name of the journal should be written in italics, volume, number, pages consulted , year in small case. Examples:

- [1] L. Benvenuti, y L. Farina, “Positive and compartmental systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 2, pp. 370-373, 2002
- [2] H. A. Rondón y F. Reyes, “Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento,” *Rev. Ing. Univ. de Medellín*, vol. 6, no. 11, pp. 65-90, 2007.
- [3] J. C. Carr *et al.*, “Surface interpolation with radial basis functions for medical imaging,” *IEEE Transaction on medical imaging*, vol. 16, no. 11, pp. 96-107, 1997.

Books. Author's names and surnames' initials should be written in capital letters, the title of the book should be written in italics, edition (it should be mentioned after the first edition), place of publication, editorial, year of publication, total of pages. Exams:

- [4] B. Klaus y P. Horn, *Robot vision*. Cambridge, MA: MIT Press, 1986, 513 p.
- [5] J.P. Uyemura. *Introducción al diseño de sistemas digitales: un enfoque integrado*. México: International Thomson Editores, 2000, 496 p.
- [6] R. Lauwerys *et al.*, *Toxicologie Industrielle et intoxications professionnelles*, 5a ed., Paris: Elsevier Masson SAS, 1997, 1259 p.

Chapters of a book. Author's names and surnames' initials should be written in capital letters, the title of the chapter should be written within quotations. The expression "in" should be followed by the title of the book in italics, edition (it is only mentioned after the first edition), editors or compilers' names and surnames' initials should be written in capital letters followed by the expression "ed(s).", pages consulted preceded by the expression "pp.", place of publication, editorial, year. Examples:

- [7] G.O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," en *Plastics vol. 3, Polymers of Hexadromicon*, 2a ed., J. Peters, ed., pp. 15-64, Nueva York: McGraw-Hill, 1964,.
- [8] L. Arnold, y H. Crauel, "Iterated function systems and multiplicative ergodic theory," en *Diffusion Processes and Related Problems in Analysis, Vol. II, Stochastic Flows, Progress in Probability 27*, M. A. Pinsky y V. Vihstutz, eds., pp. 283-305, Boston: Birkhäuser, 1992

Electronic sources. They could be electronic books, articles, documents monographs, and material in CD, among many others. Author's names and surnames' initials, title of the document consulted, source within brackets [On line] or [CD-ROM], edition applies, name of the journal or electronic media also applies, written in italics, volume applies, number applies, pages, electronic link preceded by the expression "available" and year. For a web page, the expression "access, month, year" is also used after the origin. Example:

- [9] N. Rajesh, y K. Yogesh, "Surfactant enhanced chromium removal using a silica gel column," *Universitas Scientarum*, [En línea], vol. 6, no. 1, Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/499/49911595006.pdf>, 2001
- [10] B. Moore *et al.*, "Eclipse development using the Graphical Editing Framework and the Eclipse Modeling Framework," [En línea], Disponible: <http://www.redbooks.ibm.com/redbooks/pdfs/sg246302.pdf>, 2004

- [11] EEA. “European Environment Agency. State of the art of noise mapping in Europe,” [On line], access 14, December , 2010; available: <http://www.cedex.es/>, 2005

Norms and standards. It includes the issuing entity, the name of standard in italics, number or nomenclature and year. Example:

- [12] USACE, *Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, ETL 1110-2-556*, U. S. Army Corps of Engineers, 1999.

- [13] *IEEE Criteria for Class IE Electric Systems*, IEEE Standard 308, 1969.

Papers, lectures. Author’s names and surnames’ initials should be written in capital letters, title of the lecture or paper within quotations, event in which the paper or the lecture will be presented preceded by the expression: “presented at”, place of the event, date. Examples:

- [14] J.G. Kreifeldt, “An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise,” presented at Intl. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, 1989.

- [15] D. Nieto *et al.*, “Movilidad, territorio y sostenibilidad,” presentado en 5to Foro del Investigador Universidad de Medellín, Medellín, 2009.

If you have any question related to the use of quotation standard, please consult to the journal.

Since this is a publication with arbitration, the journal receive, reviews, and send papers to Editorial Committee, which approves its publication based on the specialized peers’ concept. Once the author is notified about the comments of the Editorial Committee, he/she will have to weeks to return the article with suggested modifications; otherwise, the article the article could be rejected. Original document received are kept as part of the journal’s files .

A copy of the journal sent to the author is the recognition of the journal as author’s copyright.

Correspondence:

The articles should be sent to

Comité Editorial

Revista Ingenierías Universidad de Medellín

Carrera 87 N° 30-65

Medellín, Colombia, Suramérica

Correos electrónicos: jflopez@udem.edu.co; revistaingenierias@udem.edu.co



Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 17, núm. 33
se terminó de imprimir en 2018 en Xpress Estudio Gráfico y Digital.

Para su elaboración se utilizó papel Bond Bahía 70 g
en páginas interiores y Propalcote 250 BD en carátula.
La fuente usada es Times New Roman a 11 puntos.