

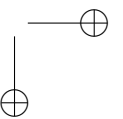
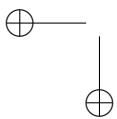
**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**
FACULTAD DE INGENIERÍA

Revista Ingeniería

Volumen 20 · Número 2 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA SEMESTRAL

2015



Revista Ingeniería

Volumen 20 - Número 2 - Año 2015 - ISSN 0121-750X - E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA SEMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 4 - Facultad de Ingeniería
Bogotá - Colombia
Teléfono: 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo: revista_ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería, con artículos de contenido original e inédito. La revista está dirigida a investigadores, especialistas, docentes, estudiantes de pregrado y posgrado, ingenieros en ejercicio y al sector empresarial.

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Jose Marcio Luna, PhD. GRASP Lab, University of Pennsylvania, Estados Unidos
Cristina González Caro, PhD. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia
José Luis Villa, PhD. Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia
Victor Hugo Grisales, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Carlos Eduardo Moreno Mantilla, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Henry Alberto Diosa, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia
Marco Aurelio Alzate, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia
Juan Carlos Figueroa, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia
Rodrigo Herrera, Msc. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia
Luz Esperanza Bohórquez, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Iván Santelices Malfanti, PhD. Universidad del Bío-Bío, Chile
Germán Jairo Hernández, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Diego Cantor, PhD. University of Western Ontario, Roberts Research Institute
Diego Pardo Ayala, PhD. Agile and Dexterous Robotics Lab - ETHZ (Zurich)
Germán Méndez, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia
Carlos Andrés Peña, PhD. University of Applied Sciences Western Switzerland
Ana María Peña, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia
Edwin Rivas, PhD. Universidad Distrital F. J. de C., Colombia

DIRECTIVAS

Carlos Javier Mosquera S. (E) Nelson Libardo Forero Chacón
Rector Centro de Investigación y Desarrollo Científico
Roberto Ferro Escobar
Decano Facultad Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Gestora editorial Corrección de estilo
Carolina Suárez R., Ing. Msc. Jenny Alexandra Jiménez, Msc.
Diagramación en L^AT_EX Impresión
Daniel Contreras Niño Carvajal

INDIZADA EN



ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Gina Nuñez Hernandez, Msc. INVIMA
Juan Ruge Cárdenas, PhD. Universidad Católica de Colombia
Bibiana Vallejo Díaz, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Jairo Coronado Hernandez, Msc. U Tecnológica de Bolívar, Colombia
Juan Múnera, Msc. Universidad EAFIT, Colombia
José González Fajardo, Msc. U Autónoma de Yucatán, México
Cristina Gonzalez, PhD. U Autónoma de Bucaramanga, Colombia
William Castro García, Msc (e). Universidad Nacional de Colombia
Sonia Ordoñez S., PhD. Universidad Distrital F.J.C., Colombia
Eliana González Neira, Msc. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Pedro Gómez Vilda, PhD. Universidad Politécnica de Madrid, España
Manuel Arana Jiménez, PhD. Universidad de Cádiz, España
Nidia Rincón Parra, Msc. UNAD, Colombia
Carlos Urazán Bonells, PhD. Universidad de la Salle, Colombia
Carmen Carlos Ornelas, PhD. Inst. Tecnológico de Aguascalientes, México
Romel Solís Carcaño, Msc. Universidad Autónoma de Yucatán, México
Elizabeth León Guzmán, PhD. Universidad Católica de Colombia
Edgar Duarte Forero, Msc. Universidad Libre de Colombia
Patricia Gallego Torres, PhD. Universidad Distrital F.J.C., Colombia
Manuel Barón Molina, Msc. Universidad Católica de Colombia
Luis Enrique Mendoza, Msc. Universidad de Pamplona, Colombia
José Humberto Serrano D., Msc. Universidad Distrital F.J.C., Colombia
Marco Valenzo Jiménez, PhD. U. Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México
Omar Salazar, Msc. Universidad Distrital F.J.C., Colombia
Elyn Lizeth Solano C., Msc. Université de Technologie de Troyes
Henry A. Diosa, PhD. Universidad Distrital F. J. C., Colombia
Gabriel Zambrano Rey, PhD. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Cristina Greiner, Msc. Universidad Nacional del Nordeste, Colombia
Ricardo Moreno C., PhD. Escuela Colombiana de Ing. Julio Garavito, Colombia
Carlos Mateo Domingo, PhD. Universidad Pontificia Comillas, España
Luis Angel Moreno Anselmi, Msc. Universidad Católica de Colombia
Carolina Suárez, Msc. Universidad Agustiniiana, Colombia
Jaime Velasco Medina, PhD. Universidad del Valle, Colombia
Jackeline Murillo Hoyos, PhD(e). Purdue University, Canadá
Leonardo Leottau, PhD (e). Universidad de Chile
Marcela Mejía Fajardo, PhD. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia
Percy Viego Felipe, PhD. Universidad de Cienfuegos, Cuba
Javier Orjuela, PhD (e). Universidad Distrital F.J.C., Colombia
William Puche Plaza, PhD (e). Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
María Osorio Angarita, PhD (e). Universidad de Boyacá, Colombia
María Esperanza Amórtegui M., Msc. Pontificia Universidad Javeriana, Colombia
Edwin Causado Rodríguez, PhD. Universidad del Magdalena, Colombia
Rodrigo Herrera, Msc. Universidad Distrital F.J.C., Colombia
Luz Esperanza Bohórquez, PhD. Universidad Distrital F.J.C., Colombia
Juan Sebastián Solís Chaves, PhD (e). Universidade Federal do ABC, Brasil
José Posada Aguilar, PhD (e). University of Pittsburgh, Estados Unidos
Silena Herold García, PhD. Universidad de Oriente, Cuba

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores.



Esté trabajo está bajo una Licencia de Creative Commons
Reconocimiento - No comercial - Sin Obra Derivada 3.0 Unported

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital F.J.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endoso, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

La carátula es una alegoría a la construcción de la academia, como un rompecabezas de modestos pero valiosos aportes (conceptos, métodos, herramientas, ideas y experiencia) que todos los actores de la comunidad contribuyen desde sus motivaciones, formaciones y convicciones.
(Idea creativa: Sergio A. Rojas y Carolina Suárez; diseño: Félix López).

CONTENIDO

EDITORIAL

Resúmenes estructurados: Rápidos y furiosos 163

Sergio A. Rojas, Ph.D.

ARTÍCULOS REGULARES

Integración externa en las cadenas de suministro agroindustriales: Una revisión al estado del arte 167

External Integration on Agri-Food Supply Chain: A review to the state of the art

Andrés Felipe Ruiz Moreno · Andrés Leonardo Caicedo Otavo · Javier Arturo Orjuela Castro

Algoritmo de dimensionamiento de almacenes para empresas de edificación en el sector de la construcción 189

Stores sizing algorithm for edification companies in the construction sector

Andrés Mauricio Hualpa Zúñiga · Cesar Amílcar López Bello

Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá mediante Dinámica de Sistemas 209

Assessment of scenarios of vehicular decongestion in Bogotá D.C., using system dynamics

Carlos Franco Franco · Germán Andrés Méndez Giraldo · John Espitia

An approach for solving Goal Programming problems using Interval Type-2 Fuzzy goals 233

Un enfoque para resolver problemas de programación por metas utilizando metas difusas de intervalo tipo 2

Juan Sebastian Patiño-Callejas · Krisna Yoel Espinosa-Ayala · Juan Carlos Figueroa-García

Arquitectura FPGA para simulación de aprovisionamiento de alimentos en colonias de hormigas artificiales 245

A FPGA architecture for foraging behavior in simulation and colonies

Cristian David Rodríguez Rodríguez · Miguel Alberto Melgarejo Rey

Análisis y comparación del descriptor Cone curvature frente al reconocimiento de expresiones faciales 261

Analysis and comparison of the cone curvature descriptor in facial gesture recognition tasks

Julián S. Rodríguez · Flavio Prieto

Revisión de las tecnologías y aplicaciones del habla sub-vocal 277

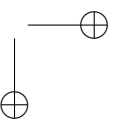
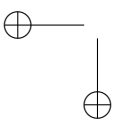
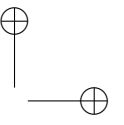
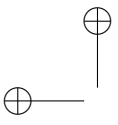
Technologies and applications review of subvocal speech

Erika Nathalia Gamma · Darío Amaya Hurtado · Olga Lucía Ramos Sandoval

Evaluación del impacto de la generación distribuida mediante índices normalizados con base en la normatividad colombiana y estándares IEEE 289

Impact assessment of distributed generation using standardized indexes based on colombian regulations and IEEE standards

Diego González Herrera · Gustavo Luna Russi · Edwin Rivas Trujillo



Editorial

Resúmenes estructurados: Rápidos y furiosos

La producción de literatura científica a escala mundial experimenta un crecimiento excepcional, que se estima en una tasa entre 3% y 4% anual¹. Colombia no es ajena a este fenómeno: el aumento de productos de nuevo conocimiento se acerca a una variación del 5% anual². Dichos volúmenes claramente sobrepasan la capacidad de asimilación de nuevo conocimiento por parte de los investigadores. Limitándonos solamente a las ramas de la ingeniería (en nuestro país existen más de 50 revistas científicas, más de 700 grupos de investigación y otra buena cantidad de eventos científicos que se realizan anualmente), la producción total de artículos arbitrados excede en términos reales la capacidad humana para realizar seguimiento. A manera de ilustración, considérese exclusivamente a las 50 revistas nacionales, con un promedio modesto de veinte artículos anuales por revista (dos ediciones semestrales de diez cada una), obtendríamos cerca de 1000 nuevos productos para asimilar anualmente; un investigador colombiano requeriría leer en promedio cuatro artículos nuevos por día hábil para no quedar atrasado. Claro, no todos estos artículos serán pertinentes para todo investigador, pero si a ello adicionamos memorias de congresos y revistas internacionales en esa escala de crecimiento, esta última cifra de lectura diaria no parece tan descabellada para un futuro no muy lejano.

Precisamente estos dos aspectos (volumen y relevancia), conducen a la necesidad de contar con herramientas más efectivas para el filtrado y asimilación de nuevos productos científicos a medida que aparecen. En este sentido juega un papel primordial el resumen o *abstract*, que se constituye en la carta de presentación, en el adelanto de lo que el lector encontrará en el manuscrito. De allí la importancia de que su redacción sea clara, sencilla, enfocada y concreta. En las publicaciones en ingeniería es usual encontrar los resúmenes redactados de manera abierta, dejando su contenido a elección libre de los autores en cuanto a su forma, pues se sabe que en el fondo, su propósito es comunicar de manera sintetizada las respuestas a

¹ Ver por ejemplo, el informe *Science and Engineering Indicators 2014 de la National Science Board*.

² Ver por ejemplo, *Boletín Estadístico No.2-2013* de Colciencias.

las siguientes preguntas respecto a la investigación o estudio que se reporta: ¿Qué se propuso? ¿Por qué se propuso? ¿Qué se sabía anteriormente? ¿Qué se encontró o se logró novedoso? ¿Por qué es importante lo que se encontró o se logró? Lastimosamente redactar sus respuestas de una forma fluida y coherente suele causarnos dificultad como autores, o lo que es peor, llevarnos a omitir o empañar aspectos claves que impiden divulgar efectivamente los resultados de la investigación. Como consecuencia, un resumen mal redactado puede llevar a los lectores a confundir o menospreciar la investigación realizada. Bien se dice que los ojos son el espejo del alma; se podría entender el resumen como el espejo del artículo.

Una alternativa a esta dificultad la representa el resumen estructurado, que no es otra cosa que un resumen organizado en apartados demarcados por encabezados: *Antecedentes*, *Objetivos*, *Métodos*, *Resultados*, *Conclusiones*. Los resúmenes estructurados fueron popularizados en la literatura médica, donde se utilizan desde hace tres décadas. Las ventajas que tienen con respecto a los resúmenes tradicionales son conocidas: facilitan la lectura, promueven una mayor recordación, contienen información más relevante, son más concisos y enfocados, aunque pueden ser más extensos³. Tanto es así, que otras disciplinas como las ciencias sociales, naturales y económicas han comenzado a adoptarlos recientemente. Incluso, algunos journals de IEEE (*Transactions on Biomedical Engineering* y *Transactions on Personal Communication*) y Elsevier (*Information and Software Technology*) ya se han inclinado a su favor.

Es así que siguiendo esta misma línea y buscando brindar herramientas que favorezcan la labor de nuestros autores, junto con la experiencia de usuario de nuestros lectores, hemos decidido adoptar la utilización del resumen estructurado a partir de nuestra próxima edición (Vol. 21, 2016). Hasta donde sabemos no existe en Colombia revista de ingeniería que siga este formato de resumen, por lo que lo asumimos como un reto con la mejor intención de aumentar el seguimiento e impacto de las investigaciones que publicamos, con la esperanza de que sea apreciado por la comunidad académica. No desconocemos que el cambio requerirá un ciclo de aprendizaje, por ello los invitamos a acoger esta iniciativa y a proponer comentarios y sugerencias constructivas durante su etapa piloto. Tenemos confianza en que la decisión contribuirá a que los resúmenes de INGENIERÍA sean de mayor legibilidad, facilidad de comprensión y contundencia en la transmisión del mensaje. De allí que los calificuemos como resúmenes rápidos y furiosos.

La adopción del formato obviamente implica un cambio de diseño de la primera página de nuestros artículos, la cual se acomodará a la plantilla que presentamos seguidamente (versión inglés). En este nuevo diseño se pueden apreciar cuatro apartados principales: *Contexto*, *Método*, *Resultados* y *Conclusiones*. La organización del resumen en apartados ofrece unas ventajas interesantes, entre las que se cuentan: simplicidad en la escritura (es más sencillo redactar congruentemente párrafos de 2 o 3 líneas que párrafos de 20 o 25 líneas); facilidad de seguimiento y filtrado (si es la primera vez que se lee el artículo, inspeccionando los apartados de contexto o métodos se puede identificar rápidamente si es de interés o no para el lector); incremento en la recordación (después de leído el artículo, es más sencillo recordar sus aportes principales remitiéndose a los apartados de resultados o conclusiones); estructuración del contenido principal (el manuscrito final puede conservar y construirse bajo la misma estructura, es decir, los autores simplemente tienen que extender cada apartado del resumen para obtener el artículo completo) y minería de texto científicos (la posibilidad de utilizar algoritmos au-

³Uno de los estudiosos más reconocidos en este tema es el profesor James Hartley de la Universidad de Keele, UK. Se sugiere consultar por ejemplo su artículo: "Current findings from research on structured abstracts: an update", *J Med Libr Assoc.* 2014 Jul; 102(3): 146–148.

tomáticos de procesamiento y clasificación de artículos a partir de la extracción y análisis inteligente de los apartados mencionados).

Abstract

Context: A paragraph roughly around 2-3 sentences long, describing briefly the problem or question that motivated the study, a background of previous or related work, and the proposed approach.

Method: A paragraph roughly around 3-4 sentences long, describing the principles, protocols, techniques, tools and/or materials (including data, images, databases or primary sources such as inter-views, documents or regulations) used to conduct or implement reliably and rigorously the proposed approach.

Results: A paragraph roughly around 3-4 sentences long, describing the findings or the outcomes obtained as a result of the method that was conducted.

Conclusions: A paragraph roughly around 2-3 sentences long, emphasising to what extent the results contribute to solve the problem or question stated in the context section, and what avenues for future research remain open. This is the take-home message to the readers.

Keywords: keyword1, keyword2, keyword3.

Acknowledgements: To other participants, funding agencies or sponsors (optional).

Language: (english or spanish).

Es más, inclusive este formato de estructura puede ser llevado a un nivel más alto de abstracción, que permita expresar el resumen en una representación gráfica, como por ejemplo mapas conceptuales. Ya hoy en día varias revistas internacionales solicitan a sus autores incluir un resumen gráfico adicional al resumen textual, seguramente motivados en aquella otra máxima según la cual una imagen vale más que mil palabras (o 300 palabras en nuestro caso).

No estaría de más mencionar que el nuevo formato permitirá dar uniformidad a artículos sin importar su tipología, es decir, que independientemente de si es un artículo de investigación, de revisión o de reporte de caso, será posible ajustarlo a la estructura propuesta. En efecto, todos los artículos partirían de una pregunta que motiva el estudio, la cual tendrá seguramente trabajo previo relacionado (*Contexto*). El *Método* para un artículo de investigación incluirá un enfoque que define formalismos, técnicas, modelos y fuentes de datos si se necesitan, mientras que un artículo de revisión contemplará un análisis sistemático de información de documentos obtenida desde bases de datos bibliográficas o producción de grupos de investigación; un reporte de caso incluirá una metodología estándar aceptada en la academia o la industria o su adaptación a un nuevo dominio previamente no publicado. En cuanto a los *Resultados* reportarán lo obtenido según el método seguido en cada tipo de artículo. Las *Conclusiones* son transversales a cualquier tipo de artículo, pues su propósito es transmitir el mensaje de fondo que los autores quieren divulgar sobre la relevancia de los resultados y las posibilidades de continuación del estudio.

Vale resaltar la intención no es establecer este mecanismo como camisa de fuerza, sino como una herramienta para obtener una síntesis íntegra y coherente del estudio que se reporta. De hecho una vez construido el resumen estructurado, bastaría con prescindir de los encabezados, de los cambios de líneas y añadir unos cuantos conectores para convertirlo en un resumen tradicional, pero mucho más estilizado y contundente. A manera de guía, se propone a nuestros autores la siguiente lista de verificación de los aspectos que deben contemplarse para la correcta construcción del resumen estructurado:

1. ¿El Contexto declara explícitamente cuál es el problema o pregunta que motivó la realización del estudio?

2. ¿El Método menciona claramente los pasos seguidos y herramientas utilizadas para realizar el estudio?
3. ¿Los Resultados indican cuál fue el hallazgo o producto más importante obtenido durante el estudio?
4. ¿Las Conclusiones explican en qué grado los resultados contribuyen a solucionar o despejar el problema o pregunta detrás del estudio, y como podría extenderse?

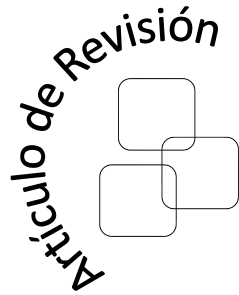
Finalmente y para mayor ilustración, hemos consignado en nuestra página Web ejemplos de resúmenes estructurados para diferentes tipos de artículos que nuestros autores y lectores pueden consultar a discreción.

Colofón 1. Nuestras iniciativas de mejoramiento de calidad editorial y científica siguen rindiendo frutos: nos complace comunicar que INGENIERÍA ha sido aceptada desde el volumen 19 para indexación en la base bibliográfica con comité de selección SciELO Colombia (*Scientific Electronic Library Online*), quizás la de mayor importancia en el país. Sabemos que es un reconocimiento a nuestra labor y a la vez una responsabilidad que asumiremos con igual entusiasmo y esfuerzo ingente para contribuir de manera objetiva y rigurosa con la difusión de la investigación de la ingeniería en Colombia. Este logro se suma a la inclusión en EBSCO y PUBLINDEX B, buscando seguir fortaleciendo la visibilidad de nuestra Revista en beneficio de nuestros árbitros, editores y por supuesto autores.

Colofón 2. A propósito, expresamos a estos últimos nuestra gratitud por los aportes que hicieron posible este nuevo número, sobre temas relacionados con: una revisión bibliográfica sobre integración de cadenas de suministro, un nuevo algoritmo para dimensionamiento de bodegas para el sector de la construcción, una mirada a la congestión vehicular en Bogotá desde la dinámica de sistemas, una nueva técnica de programación matemática por metas con sistemas difusos, una arquitectura de procesador FPGA para simular colonias de hormigas, un nuevo descriptor para reconocimiento facial, una revisión de la tecnología para el habla sub-vocal y un estudio sobre el impacto de la generación distribuida de energía normalizada para Colombia. Agradecemos también a los miembros del Comité Editorial por sus sugerencias que nos permitieron afinar y mejorar la versión inicial de la nueva plantilla del resumen estructurado. Y de manera especial queremos agradecer igualmente a Omar Salazar, nuestro apreciado colega y colaborador, por la elaboración de la versión \LaTeX de la misma. Y como siempre, aprovechamos para invitar a nuestros lectores a vincularse con nuestras páginas. Estaremos prestos a su servicio.

Sergio A. Rojas, PhD.
Editor General Revista INGENIERÍA

Citación: Ruiz, A. F., Caicedo, A. L. y Orjuela, J. A. (2015). Integración externa en las cadenas de suministro agroindustriales: Una revisión al estado del arte. En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 167-188
© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a01>



Integración externa en las cadenas de suministro agroindustriales: Una revisión al estado del arte

Andrés Felipe Ruiz Moreno
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
afuizm@udistrital.edu.co

Andrés Leonardo Caicedo Otavo
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
alcaicedoo@udistrital.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de ingeniería
Bogotá - Colombia
jorjuela@udistrital.edu.co

External Integration on Agri-Food Supply Chain: A review to the state of the art

Resumen

La Integración de la Cadena de Suministro (ICS) ha sido un tema ampliamente abordado debido a su importancia estratégica; no obstante, existen pocos estudios de integración en cadenas agroindustriales. El propósito de este artículo es hacer una revisión de la ICS, enfocándose en el impacto de mecanismos de integración externa sobre el desempeño de las cadenas agroindustriales. Los resultados muestran que los mecanismos de integración externa más utilizados han sido el intercambio de información y la toma de decisiones conjunta, mientras que las medidas de desempeño usadas con mayor frecuencia han sido los costos, la utilidad, el rendimiento de la inversión y los niveles de inventario. La revisión identifica la necesidad de evaluar el impacto de varios mecanismos de manera simultánea en el desempeño de la Cadena de Suministro (CS), enfatizando la importancia de hacer investigación en mecanismos de integración de toma de decisiones conjunta, como el inventario administrado por el vendedor (VMI) y la planeación colaborativa, pronóstico y reabastecimiento (CPFR). En cuanto a la medición del desempeño, se requiere la inclusión de al menos un indicador por categoría (eficiencia, flexibilidad, capacidad de respuesta y calidad de los alimentos) del marco de desempeño descrito para cadenas agroindustriales; mientras que para la medición de desempeño logístico de cadenas agroindustriales se requiere mayor investigación en los modos (procesos de gestión) y medios (recursos) logísticos.

Palabras claves: cadena de suministro agroindustrial, desempeño logístico, integración de la cadena de suministro.

Abstract

Supply Chain Integration (SCI) has been broadly taken into account due to its strategic importance; however, there are a few agri food supply chain studies. The purpose of this paper is to review the SCI focused on the external integration mechanisms impact on agri food supply chain performance. The results shows that external integration mechanisms most used have been information sharing and joint decision making, while efficiency has been frequently used as a performance indicators. The review identifies the need to assess several external integration mechanisms simultaneously on Supply Chain performance emphasizes on the importance to research in joint decision making mechanism, such as Vendor Managed Inventory (VMI) and Collaborative planning, forecasting, and replenishment (CPFR). For performance measurement, it is needed to include at least one indicator for each category (Efficiency, Flexibility, Responsiveness and Food Quality) of the Agri Food Supply Chain performance framework described, whereas for measuring Agri Food logistics performance is required further research on modes (process management) and means (resources) logistics.

Key words: agri-food supply chain, logistics performance, supply chain integration.



Recibido: 17-03-2015
Modificado: 13-05-2015
Aceptado: 30-06-2015

1. Introducción

La Integración de la Cadena de Suministro (ICS) ha sido considerada como una estrategia fundamental para mejorar el desempeño de la Cadena de Suministro (CS) [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7]. La importancia estratégica de la integración empezó a verse reflejada con el SCOR (Supply Chain Reference Model, por sus siglas en inglés), propuesto por el Supply Chain Council en 1996, puesto que el modelo asume que todas las empresas llevan a cabo unos procesos estratégicos con proveedores y clientes para planear, abastecer, fabricar y entregar [2]. La integración de los agentes de la CS facilita el desarrollo de nuevos productos y procesos [8]; asimismo, la efectiva integración de los agentes en la generación de valor de la CS es clave para que las empresas logren ser competitivas, Ragatz et al. (citado en [2]). La integración de la CS, tema creciente en años recientes, se considera una nueva área de investigación [2] [6] [9] [10] [11] [12].

A medida que la gestión de la CS ha cobrado importancia, han surgido las primeras definiciones de integración [13], Pagell [14] afirma que “todo el concepto de CS está basado en la integración”. En este sentido, la integración se define como el control unificado de un número de procesos que anteriormente se llevaban a cabo de forma independiente, Webster (citado en [6]). En el contexto de la CS, una definición aceptada ampliamente es la de Flynn et al. [6], quienes definen la ICS como el grado en que una empresa colabora estratégicamente con los demás miembros de la CS y logra colaborativamente gestionar los procesos intra e interorganizacionales, con el fin de alcanzar un flujo efectivo y eficiente de productos o servicios, información y recursos financieros, para poder brindar el máximo valor a los consumidores a bajo costo y una alta velocidad.

La ICS ha sido abordada en diferentes dimensiones, algunos han optado un enfoque unidimensional [3] [15]; mientras otros en integración externa e interna [6] [9] [11] [12] [16] [17] [18]. Se ha considerado la CS como un único sistema, en lugar de intentar optimizar los subsistemas que los compone, un perspectiva que incluye múltiples dimensiones [10] [19].

Por otra parte, tanto en la teoría como en la práctica se cree que con mayor integración los beneficios para la CS crecerán [11] [20] [21]. Sin embargo, no existe certeza sobre el grado en que la integración impacta el desempeño de los miembros o de la CS como un todo [2] [22]. Los resultados en la literatura muestran inconsistencia, ya que algunos autores no han encontrado sus efectos en el desempeño [23]. Se han encontrado efectos directos [11] [24] [25] o hallado efectos indirectos [10] [16].

Esta problemática podría explicarse por el diverso entendimiento alrededor del concepto de integración en la CS [5] [7] [13] [14] [16] [26] [27]. A pesar de esto, los beneficios reportados de integrar los agentes de la CS para las empresas, han motivado a seguir la implementación de mecanismos para la mejora del desempeño de la organización y de toda la CS. Algunos beneficios encontrados son la reducción de: el efecto látigo, costos, plazos de entrega, riesgos, así como lograr mayor flexibilidad, entre otros [28] [29] [30].

Los mecanismos de integración externa para alcanzar estos beneficios pueden ser clasificados en integración por contratos; integración por medio de toma de decisiones conjunta, como el VMI (Vendor Managed Inventory, por sus siglas en inglés) y el CPF (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment, por sus siglas en inglés); integración por información

compartida e integración por medio de la tecnología de la información, como EDI (Electronic Data Interchange, por sus siglas en inglés), ERP (Enterprise Resource Planning, por sus siglas en inglés), entre otros [31].

Se encuentra un gran número de artículos de integración en CS convencionales, pocos trabajos en CS de alimentos y aún menos en CS agroalimentarias [32] [33], debido a los retos que representan varios aspectos como la volatilidad de las condiciones meteorológicas, el carácter perecedero de los productos, el entorno complejo reglamentario de la seguridad alimentaria, las restricciones de capacidad, los cambios de tendencia de vida de los consumidores, las preocupaciones medioambientales y la gran cantidad de actores involucrados [34] [35].

El artículo tiene como objetivo presentar una revisión de los estudios realizados en los mecanismos de integración externa de la CS en cadenas agroindustriales, incluyendo el impacto en el desempeño en la CS y en la logística. El artículo presenta en la sección 2, metodología y revisión del estado actual de la literatura. En la sección 3, se aborda la definición de la integración de la CS, los tipos de integración en la CS, los beneficios y razones de integrar la CS y finalmente, la revisión de los estudios que han abordado el impacto de mecanismos de integración externa en el desempeño de la CS y en la logística de las cadenas agroindustriales con el fin de identificar vacíos en la literatura actual. Por último, en la sección 4 se muestran las conclusiones.

2. Metodología

La revisión del estado del arte se llevó a cabo a partir de la consulta de las siguientes bases de datos: ScienceDirect, SpringerLink, IEEE, Emerald y Scopus. En cada una de estas se realizó la búsqueda en Title, Abstract y Keywords con los campos de búsqueda de la Tabla I. Los artículos seleccionados fueron los comprendidos entre los años 2000 y 2014; no obstante, también se incluyeron algunos artículos seminales.

Tabla I. Palabras clave usadas en la revisión

Categoría	Key word
Campo de aplicación	Agri food supply chain, Food Supply Chain.
Palabras relacionadas con integración	Integration, Coordination, Cooperation, Collaboration, Relationship, Alliance, Partnership, Power.
Mecanismo de integración	Contract, Joint Decision Making, VMI, CPFR, Information sharing, Information Technology.
Medida desempeño	Performance, Logistics Performance.

Fuente: Los autores.

La primera revisión bibliográfica permitió identificar la tendencia histórica en el campo de la integración externa en CS (Figura 1). La búsqueda tuvo como objetivo responder las siguientes preguntas ¿cuál ha sido la evolución del concepto de integración?, ¿qué diferencia existe entre la integración, coordinación, cooperación y colaboración?, ¿cuáles son los tipos de integración?, ¿cuáles son las razones y beneficios de integrar la CS?

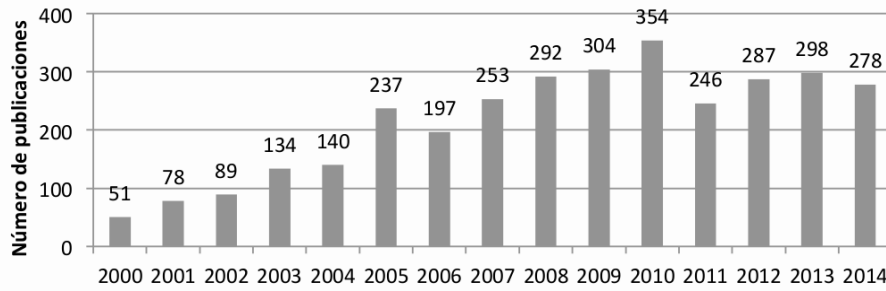


Figura 1. Tendencia histórica de publicaciones en la temática de integración externa en cadenas de suministro.

Fuente: elaboración propia a partir de Scopus.

Posteriormente, en una segunda búsqueda se identificó el comportamiento de las publicaciones referentes a la integración externa en cadenas de suministro agroindustriales (Figura 2). A partir del año 2008 se produce un incremento en el número de publicaciones, en los años posteriores a 2008 se evidencia un aumento con poca variación de un año a otro. Es claro que han sido pocos los estudios de integración externa en cadenas con productos perecederos (138 publicaciones en total); sin embargo, es un campo de estudio que está tomando mayor relevancia.

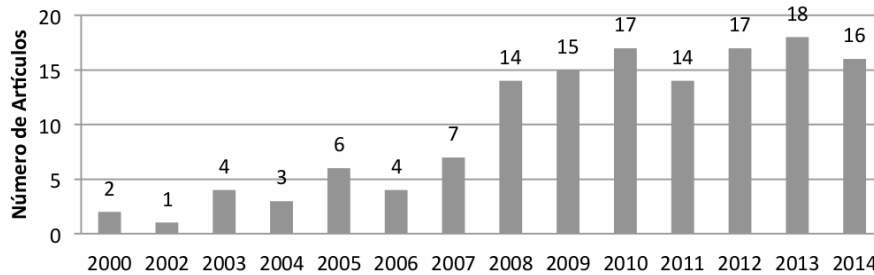


Figura 2. Tendencia histórica de publicaciones en la temática de integración externa en cadenas de suministro agroindustriales.

Fuente: elaboración propia a partir de Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Emerald, IEEE.

La segunda búsqueda tuvo como objetivo determinar el estado del arte en cuanto a los estudios que han abordado el impacto de mecanismos de integración externa en el desempeño de la CS y en la logística de las cadenas agroindustriales, para ello las preguntas planteadas fueron ¿cómo es la relación entre la integración externa y el desempeño de la CS?, ¿qué mecanismos de integración externa existen?, y finalmente, ¿qué medidas de desempeño, para la CS y la logística, son usadas en la cadena de suministro agroindustrial?

3. Integración en la cadena de suministro agroindustrial

En esta sección se desarrolla un marco conceptual sobre la integración de la CS y otros conceptos asociados, los tipos de integración en la CS, los beneficios obtenidos por integrar la cadena y finalmente los mecanismos de integración externa para el caso de las cadenas agroindustriales.

3.1. Evolución del concepto de integración

La mayoría de los conceptos de ICS asumen la existencia de un flujo de bienes y un flujo de información a lo largo de la CS [2] [3] [6] [14] [22]. Sin embargo, no existe una definición única sobre la ICS [13] [14]. La ICS según Clancy (citada en [36]) consiste en fortalecer los vínculos de los componentes de la CS, a fin de mejorar la toma de decisiones y obtener a todas las partes de la cadena interactuando de una manera más eficiente. De acuerdo con Frohlich y Westbrook [2], la ICS consiste en coordinar actividades operacionales compartidas, como el flujo de avance físico de las entregas entre proveedores, fabricantes y clientes.

Por otro lado, Stank, Keller, & Daugherty [16] aseguran que la ICS consiste en la integración de funciones internas, con proveedores y consumidores. O'Leary-Kelly & Flores [17] definen la integración como “el grado en que las partes separadas trabajan de manera cooperativa para llegar a resultados mutuamente aceptables”. De acuerdo con esta definición, la integración engloba conceptos como cooperación, coordinación e interacción. Por su parte, Power [22] afirma que la ICS integra los procesos básicos a través de los límites de la organización por medio de una clara comunicación, asociaciones, alianzas y cooperación.

A pesar de las diversas definiciones presentadas, la definición con mayor aceptación de la ICS es la adoptada por Flynn et al. [6]: “la integración de la cadena de suministro es el grado en que una empresa colabora estratégicamente con los demás miembros de la CS y logra gestionar los procesos intra e inter-organizacionales, con el fin de alcanzar un flujo efectivo y eficiente de productos o servicios, información y recursos financieros, para brindar el máximo valor a los consumidores a bajo costo y una alta velocidad”.

Las cadenas de suministro agroindustriales comprenden un conjunto de procesos desde el cultivo, producción o procesamiento, embalaje, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización [37] [38], los flujos son físicos, financieros, de información, de energía, con un ciclo de vida corto. Estos procesos y flujos se encuentran integrados gracias a los actores que la componen y sus relaciones, los cuales pueden ser instituciones, agricultores, productores, cooperativas agrícolas, industrias, transportadores, intermediarios, comerciantes mayoristas y minoristas y finalmente clientes [39] [40].

La integración ha sido motivada en cadenas agroindustriales por factores tecnológicos, regulatorios y financieros, también por consumidores cada vez más exigentes con la calidad y seguridad de los productos de corto ciclo de vida [32]; además, tales cambios han alterado el contexto actual de los agentes que componen este tipo de cadenas, fomentando la integración aguas arriba y aguas abajo [39].

Los términos integración, coordinación, colaboración y cooperación han sido usados indiscriminadamente en la literatura actual, sin embargo existen diferencias entre estos conceptos [41] [42]. Mientras la cooperación se define como actuar o trabajar de manera conjunta por un objetivo común [41] [42]. Por su parte, la coordinación se refiere a una cooperación más directa y activa [42], la colaboración se define como el “trabajo conjunto” para un objetivo particular e involucra una mentalidad organizacional con una visión compartida para un plan de acción [43].

A pesar de las diferencias entre estos conceptos, la cooperación, coordinación y colaboración son complementarios entre sí [31] [44] y pueden ser utilizados en el contexto de la CS

para describir los esfuerzos de integración entre los socios y mejorar el desempeño global de la CS. En esta revisión se asume dicha complementariedad de los términos; considerando de igual manera, que el principal propósito es aumentar el beneficio de todos los actores de la CS.

3.2. Tipos de integración en la cadena de suministro

En la literatura se han reconocido dos tipos de ICS: externa e interna [6] [9] [10] [11] [12] [16] [17] [18]. La integración externa e interna desempeñan papeles diferentes en la integración de la CS, se describen a continuación.

3.2.1. Integración externa

La integración externa se refiere al grado en que un agente puede relacionarse con los miembros más importantes de la CS (proveedores y consumidores) con el fin de estructurar sus estrategias interorganizacionales, procedimientos y comportamientos en un contexto colaborativo y sincronizado que permita cumplir con los requerimientos del cliente [26] [16]. La integración externa representa el más alto nivel de la gestión de la CS [6] [19], incluye alianzas estratégicas con los proveedores y consumidores, en donde la compañía construye dichas relaciones estratégicas para poder conjuntamente desarrollar y aprovechar oportunidades del mercado [9].

La gestión de la CS se ha incorporado como un factor clave en la industria agroalimentaria dada la necesidad de una integración externa [45]. Asimismo, tanto la complejidad de las cadenas agroindustriales como los mercados cada vez más globalizados han agudizado la importancia de una cadena unificada por medio de mejores relaciones estratégicas y decisiones colaborativas con los demás agentes [46] [47]. En el caso específico de las cadenas agroindustriales, la integración externa puede darse entre los agricultores, cooperativas agrícolas, intermediarios, empresas agroindustriales, transportadoras, comerciantes mayoristas y minoristas, y finalmente clientes [39] [48].

3.2.2. Integración con proveedores

La integración de proveedores consiste en proporcionar información entre ambas partes y participar mancomunadamente en la toma de decisiones. La integración con los proveedores se caracteriza por la cooperación existente entre el comprador y el proveedor de materia prima e insumos. Las relaciones podrían potencialmente incluir iniciativas y programas que fomenten los vínculos entre los socios [7]. La integración con los proveedores está vinculada con un mejor desempeño en la entrega de productos [49].

3.2.3. Integración con consumidores

La integración con el cliente implica una adecuada interacción entre el cliente y los productos y procesos del fabricante [50]. La integración con el consumidor comprende los flujos de información, materiales y realimentación de información del consumidor a la empresa [2] [51] e incluye la participación del cliente en los procesos de la organización, especialmente por los cambios de tendencia de los consumidores de productos perecederos [35].

3.2.4. Integración interna

La integración interna se refiere al grado en que los departamentos en una empresa funcionan como parte de un proceso integrado, se relaciona con la coordinación, colaboración e integración de áreas funcionales dentro de la compañía [20]. La integración interna rompe las barreras funcionales y promueve la cooperación entre los departamentos con el fin de cumplir los requisitos de los clientes, en lugar de operar dentro del esquema de departamentalización y especialización tradicional [6]. Esta integración interna es difícil visualizarla en algunos de los actores de la cadena agroindustrial, como es el caso del agricultor y los comerciantes, tanto mayoristas como minoristas. Esto a su vez aumenta la falta de cooperación y transparencia [52].

Algunos elementos importantes de la integración interna incluyen el intercambio de información entre las áreas funcionales de la organización, la planeación conjunta, la cooperación entre funciones estratégicas y los equipos interfuncionales [6]. Cada función (subsistema) en una empresa (sistema) debe ser integrado para que la organización tenga un alto nivel de desempeño [53].

3.3. Beneficios de la integración de la cadena de suministro

La integración de la CS se considera de gran importancia estratégica [2] [3] [5]; por eso existen diversas razones y beneficios para que los actores involucrados deseen integrarse interna o externamente, aun cuando se han reportado algunos problemas de la integración como: diferencias en los intereses de los miembros de la CS, conflictos entre los objetivos de cada agente, desacuerdos sobre la toma de decisiones y acciones conjuntas, falta de transparencia de la información y altos costos de inversión para implementar sistemas de información entre las organizaciones [3] [31] [54] [55].

En las cadenas agroindustriales la principal barrera es la complejidad de la industria y la heterogeneidad de su estructura, debido a que está compuesta por una gran cantidad de agentes, lo que resulta en numerosas interacciones, volviendo problemático el intercambio de información y aumentando la posibilidad de incompatibilidad, desde el punto de vista tecnológico y de los sistemas para compartir información. Asimismo, en las cadenas agrícolas existe asimetría en el poder ya que las empresas con mayor dominio lo ejercen imponiendo las reglas de colaboración, lo cual aumenta continuamente el desbalance de los beneficios impidiendo que los demás agentes busquen integrarse [39].

Los beneficios y razones que motivan a las empresas a integrarse se condensan en la tabla II.

En las cadenas agroindustriales se pueden agregar otros beneficios particulares dadas las características inherentes de la misma. Los principales beneficios para los dos agentes más importantes de la cadena agroindustrial, agricultor y empresa agroindustrial se presentan en la tabla III.

Tabla II. Beneficios para integrar la CS

Integración interna	Integración externa
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pronósticos más precisos ▪ Mayor utilización de la capacidad ▪ Reducción de inventario ▪ Alta rotación de inventario ▪ Aumento de la calidad en los productos ▪ Bajos costos de producción ▪ Aumento de la flexibilidad para adaptarse a la demanda incierta ▪ Mejor toma de decisiones con información en tiempo real ▪ Flujos efectivos y eficientes de productos y servicios, información y dinero para proporcionar el máximo valor para el cliente final 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor respuesta para cumplir las órdenes ▪ Aumento de la calidad ▪ Reducción de los tiempos de abastecimiento ▪ Reducción de los riesgos ▪ Reducción del efecto látigo y sus costos asociados ▪ Acceso al capital financiero y mejora en la capacidad de aprendizaje y transferencia de conocimiento ▪ Mejor servicio al cliente, aumentado la satisfacción del mismo ▪ Aumentar el mercado objetivo actual ▪ Mejor desarrollo de producto, debido al aumento de la innovación conjunta ▪ Aumento de los ingresos recibidos por ventas ▪ Promueve la capacidad de una empresa para aprovechar rápidamente las oportunidades del mercado

Fuente: elaboración propia a partir de [3] [28] [30] [31] [42] [55] [56].

Tabla III. Beneficios para el agricultor y la empresa agroindustrial

Beneficios para el agricultor	Beneficios para la empresa agroindustrial
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducción de la incertidumbre asociada a la disponibilidad de insumos, calidad y costos ya que los insumos pueden ser entregados por las empresas agroindustriales ▪ Algunos servicios (por ejemplo, el transporte), y asistencia tecnológica pueden ser soportados por las empresas ▪ Mayor calidad del producto, mejores propiedades sensoriales y de apariencia. ▪ Las técnicas de producción son reforzadas por la prestación de asistencia técnica ▪ Facilidad para acceder al mercado de tal manera que la incertidumbre y los costos de transacción involucrados en la búsqueda de mercados se reducen. ▪ Reducción de los riesgos de comercialización ▪ Estabilidad en los ingresos de los agricultores ▪ Uso de subproductos y residuos originados por la actividad agrícola para otros fines por parte de otras empresas ▪ Menores costos de transacción 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor regularidad en los suministros de productos agrícolas. ▪ Mayor utilización de la capacidad de procesamiento e infraestructura de distribución. ▪ Mejor coordinación en la entrega de productos ▪ Mayor calidad cuando el agricultor permite un mejor control de los procesos agrícolas ▪ Mayor capacidad para satisfacer las necesidades de los consumidores y las normas de calidad y seguridad obligatorias ▪ Reducción de los costos por unidad. Las economías de escala se pueden alcanzar por las empresas que adquieren grandes cantidades de insumos agrícolas ▪ Mayor flexibilidad, especialmente la expansión y contracción de la producción ▪ Mayor fiabilidad en la entrega ▪ Aumento del rendimiento de la inversión

Fuente: elaboración propia a partir de [57] [58] [59].

Los beneficios son numerosos, pero no se debe evaluar solamente el valor potencial de la integración, también es necesario decidir qué tan duraderos serán los vínculos con las partes interesadas [3]. Asimismo, es esencial investigar las condiciones bajo las cuales la integración es beneficiosa y no genera únicamente altos costos y flujos imprecisos de información [31].

3.4. Mecanismos de integración externa y su impacto en el desempeño

En este apartado se da a conocer la relación existente entre la integración externa y el desempeño de la CS. Posteriormente, con base en la taxonomía propuesta (Figura 3) se muestran los estudios que han analizado los efectos de mecanismos de integración externa (contratos, toma de decisiones conjunta, intercambio de información y tecnologías de información), en el desempeño de la CS agroindustrial (eficiencia, flexibilidad, capacidad de respuesta, calidad de los alimentos) y en el desempeño logístico, bien sea en los modos (aprovisionamiento, inventarios, distribución) o en los medios (sistemas de información y trazabilidad, embalaje, almacenes, transporte e infraestructura).

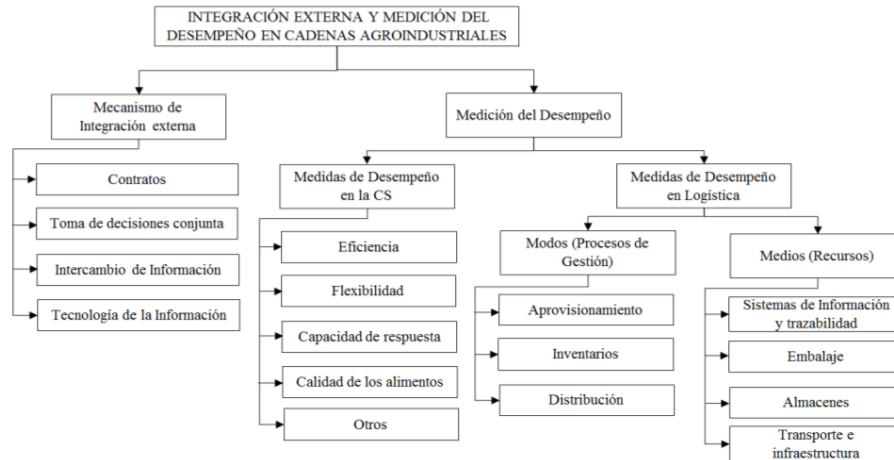


Figura 3. Taxonomía de integración externa y medición del desempeño para cadenas agroindustriales.

Fuente: elaboración propia a partir de [31] [59] [60].

3.4.1. Relación entre la integración y el desempeño de la cadena de suministro

La integración de la CS es considerado uno de los aspectos más importantes para mejorar el desempeño global de la cadena, especialmente en el rendimiento operativo y financiero [2] [5] [51]; sin embargo, no en todos los casos la integración puede ser una estrategia efectiva para mejorar el desempeño [13] [22] [61]. Las conceptualizaciones incompletas han dado lugar a que los resultados sean contradictorios, en cuanto a la relación entre el rendimiento operativo y la integración de la CS [16] [14] [26] [27] [13] [5] [7], esta relación no está definida en su totalidad, por lo tanto sigue siendo un tema amplio de investigación [6] [13].

Se ha comprobado empíricamente la relación positiva entre la integración de proveedores y clientes con el desempeño de la CS [2] [4] [6] y el nivel de servicio y el desempeño de la organización [10], el papel de la calidad, flexibilidad, entrega y costo entre el desempeño

empresarial y la integración de la CS [15]. Finalmente, el grado de integración de la CS no índice significativamente en el desempeño de las empresa, puesto que no se ha comprobado la existencia de una relación directa [5], según [10] y [15] esta relación debe ser medida con otras variables.

En cadenas agroindustriales se ha tornado difícil la medición de su desempeño [59], más aún su relación con la integración. Han sido pocos los sistemas de medición de desempeño propuestos para cadenas agroindustriales [35]; en el 2000 aparece una propuesta para medir el desempeño logístico en CS alimentarias, con indicadores clasificados en tres niveles jerárquicos de desempeño: en la CS, en el nivel organizacional y del proceso de negocio [62]. Luego en 2006 se presenta un marco de medición teniendo en cuenta cuatro elementos: estructura de la red, procesos de negocio, gestión de la red y recursos, elementos relacionados directamente con los objetivos de la cadena: diferenciación de la red, segmentación del mercado, calidad integrada y optimización de la red, por lo tanto la medición del desempeño tiene un rol importante en el diseño y gestión de la CS [48].

Un sistema de medición de desempeño más completo y específico para cadenas agroindustriales fue planteado en 2006, se basó en la revisión de los principales KPI (Key Performance Indicator, por sus siglas en inglés) y los modelos SCOR (Supply Chain Operations Reference, por sus siglas en inglés), Balanced Scorecard, Multi Criteria Analysis, DEA (Data Envelopment Analysis, por sus siglas en inglés), Life Cycle Analysis y Activity Based Costing [59]. En este sentido, el marco conceptual para la medición del desempeño en cadenas agroindustriales se categorizó en cuatro grupos: eficiencia, flexibilidad, capacidad de respuesta y calidad de los alimentos [59]. Posteriormente, este marco fue evaluado a través de un caso de estudio en la CS de tomate en Alemania [63]. Los autores concluyeron que el marco conceptual era útil para calcular el desempeño en estas cadenas por su capacidad de medir cambios en los niveles de calidad a medida que se avanza por la CS, tiempos de producción extensos, estacionalidad de la producción, transporte y almacén especial, entre otros. Adicionalmente, determinaron que el uso de cada indicador depende de los objetivos de la CS y de cada miembro de la cadena.

3.4.2. Mecanismos de integración externa en cadenas agroindustriales

Para esta revisión los mecanismos de coordinación, colaboración y cooperación se asumen como esfuerzos para lograr una adecuada integración de los agentes de la CS. La literatura ha reportado importantes investigaciones sobre mecanismos de coordinación e integración, a pesar de ello, existen pocos estudios sobre mecanismos de integración externa aplicados a casos con productos perecederos [64]. La clasificación adoptada para esta revisión se relaciona con los mecanismos categorizados por [31], los cuales son: contratos en la CS, toma de decisiones conjunta, intercambio de información y tecnologías de la información (Tabla IV).

3.4.2.1. Contratos

El uso de contratos para la integración de la cadena de abastecimientos mejora las relaciones entre los eslabones de la cadena y permite una mejor gestión del riesgo por fluctuaciones en los inventarios y precios. El contrato se puede definir como un acuerdo entre dos partes, es un conjunto de cláusulas que ofrece información adecuada, convirtiéndolo en un incentivo para garantizar la integración y mejora del rendimiento de la CS [65]. Adicionalmente, los

contratos especifican parámetros como: cantidad, calidad, tiempo y precio, con el fin de que el proveedor cumpla a cabalidad la orden del comprador [31]; es por eso que es uno de los mecanismos de mayor uso en las cadenas agroindustriales en general [32], permitiendo mejorar directamente el nivel de eficiencia y sostenibilidad en la CS agroindustrial [66].

Los contratos frecuentemente ofrecen a los agricultores importantes beneficios, como la reducción de los costos asociados con los flujos de ingresos inciertos, pueden facilitar la transferencia de nuevas tecnologías de producción, incluyendo avances en genética, servicios nutricionales, fertilizantes y control de plagas. Los contratos pueden reducir costos de procesamiento y proporcionar a los consumidores productos más asequibles [67].

3.4.2.2. Toma de decisiones conjunta

La toma de decisiones conjunta ayuda a resolver conflictos entre los miembros de la CS [31]. Los principales mecanismos de toma de decisión conjunta, que son considerados dentro de la revisión, son el inventario administrado por el vendedor y la planeación colaborativa, pronóstico y reabastecimiento [31] [43]. Persiste la confusión acerca del número de miembros, niveles de inversión y duración de las relaciones óptimos [55].

El Inventario Administrado por el Vendedor (VMI, Vendor-Managed Inventory, por sus siglas en inglés), es un mecanismo de integración que mejora la eficiencia de la CS a nivel de proveedores, compradores y clientes [68]. El proveedor asume la responsabilidad de mantener ciertos niveles de inventario y generar pedidos de compra para el reabastecimiento del inventario de los clientes. No obstante, surge la necesidad de poder compartir información y aumentar la visibilidad y transparencia en toda la CS; así, se combinó el VMI y el EDI [55]. Por esto mismo, el uso del VMI implica generalmente la utilización de un software en donde se comparten los pronósticos de demanda y costos de la información, parámetros de riesgo, intercambio de objetivos comunes y niveles de responsabilidad establecidos entre el comprador y el proveedor [31].

El CPFR (Collaborative Planning Forecasting and Replenishment, por sus siglas en inglés) tuvo su origen en 1995, cuando se realizó un proyecto piloto entre Wal-Mart, Warner-Lambert, Benchmarking patterns, SAP y Manugistics, dando como resultado un modelo de negocios llamado “forecasting and replenishing inventory collaboratively” [69]. Es una estrategia de colaboración entre dos partes o más de la CS, que busca planear conjuntamente una serie de actividades promocionales y elaborar pronósticos conjuntos. Si los proveedores tienen una mejor visibilidad de los pronósticos de ventas de los minoristas, entonces pueden planificar mejor su operación, y si tienen una mejor visibilidad de las órdenes de los minoristas, los proveedores podrán planificar mejor su reaprovisionamiento [70]. En las cadenas agroindustriales la implementación de estrategias colaborativas como el CPFR permiten balancear la demanda con la oferta a lo largo de toda la cadena, desde los agricultores hasta los clientes [71].

3.4.2.3. Intercambio de la información

El intercambio de información, útil para sistemas, personas y organizaciones, ha demostrado mejorar las medidas de desempeño en las cadenas de abastecimiento [31], esencial para

la integración de cadenas de suministro, más ahora con la introducción global de la cooperación y coordinación de largo plazo de las compañías [72]. Para mejorar los resultados de este mecanismo, las empresas deben responder cuatro preguntas clave; ¿qué compartir?, ¿a quién compartirlo?, ¿cómo compartirlo? y finalmente ¿cuándo hacerlo?. Responder adecuadamente dichas preguntas permitirá evitar redundancias, reducir los costos del intercambio de información y mejorar la capacidad de respuesta [73].

En este mecanismo los miembros de cadenas de abastecimiento coordinan compartiendo información acerca de la demanda, órdenes, inventario, costos de producción, pronósticos, entre otros [72]. Para el caso de cadenas agrícolas, las granjas pueden proporcionar información sobre el origen y los procesos de producción, mientras que las empresas ofrecen información sobre las características del producto. Se puede compartir también información sobre los pronósticos, el monitoreo del tiempo y la calidad, los planes de producción y pronósticos de las entregas, así como las condiciones en que se realiza. Sin embargo, la información no es completamente fiable dada la variabilidad del clima, características del suelo, entre otros [74].

3.4.2.4. Tecnologías de la Información y la Comunicación

La Tecnología de la Información y las Comunicaciones (TIC) es usada para mejorar la coordinación, ha mostrado tener un impacto positivo en medidas de desempeño como el servicio al cliente, lead time y costos de producción [10]. Los diferentes avances de la tecnología de la información como internet, el intercambio electrónico de información (EDI), el ERP, el e-business y muchos más, han permitido a las firmas intercambiar productos, información, fondos y usar métodos colaborativos para optimizar las operaciones de la CS. Se ha demostrado que internet puede mejorar considerablemente la comunicación y da la posibilidad a los miembros de la CS de revisar el desempeño pasado y monitorear el desempeño actual [75].

El uso de estas tecnologías ha aumentado en las cadenas agroindustriales, creando un nuevo modelo de negocios para las compañías que operan en este sector, especialmente con las aplicaciones de internet, ya que resulta más económico que el EDI [76]. Para lograr una mejor calidad del producto, cumplir con estándares de seguridad y tener tiempos eficientes de respuesta es prescindible el uso de tecnologías de información que faciliten su intercambio [34].

Los sistemas de información en las cadenas agrícolas pueden ser una fuente de ventaja competitiva para todo el sistema logístico cuando la tecnología es usada para facilitar el intercambio de información entre los actores de la cadena [77]. Entre las tecnologías pertinentes para la recopilación, procesamiento, presentación y comunicación de datos e información (incluyendo comunicación con el cliente) se destacan los dispositivos multipropósito, RFID y tecnologías para la captura de datos y recolección de información [74].

3.4.3. Medidas de desempeño en cadenas agroindustriales

Las medidas de desempeño consideradas para la construcción de la Tabla IV fueron tomadas de [59, p. 63] ya que, como los autores aseguran, existen numerosos indicadores cuantitativos o cualitativos, financieros o no financieros, pero no existe consenso en cómo medir el desempeño de las CS y mucho menos en el campo de la agroindustria; es por eso que se usó este marco conceptual de medición de desempeño específico para cadenas de suministro

agroindustriales, el cual se divide en cuatro categorías: eficiencia, flexibilidad, capacidad de respuesta y calidad de alimentos, cada categoría incluye indicadores específicos. Además, se incluyó una categoría llamada “otros” para el caso en donde se tomaban otras medidas de desempeño que no fueron contempladas en el marco de medición descrito previamente (Tabla IV).

En lo que se refiere al desempeño logístico se utilizó la metodología para el diagnóstico logístico de CS agroindustriales de [60], la cual se divide en dos categorías de análisis: modos (procesos de gestión) y medios (recursos).

3.4.4. Impacto de la integración externa en el desempeño de cadenas agroindustriales

En la Tabla IV se muestra que solo 43 artículos de los 138 incluyen algún tipo de mecanismo de integración y miden el impacto en alguna de las categorías de desempeño de la CS y logística (Figura 2), mientras los demás (92 publicaciones) se excluyen de la tabla, dado que no contemplan su incidencia en el desempeño logístico o de la CS.

Tabla IV. Artículos con tipo de mecanismo de integración y medidas de desempeño en CS Agroindustrial

Mecanismo de integración	Autor	Año	Medidas de desempeño de la CS					Medidas de desempeño Logísticas									
			E	F	CR	CA	O	Modos	Medios								
								A	I	D	ST	EM	AL	TI			
Contratos	[78]	2013	X														
	[79]	2011	X														
	[80]	2009	X						X								
	[81]	2009	X	X			X				X						
	[82]	2008	X	X				X	X								
	[83]	2008	X														
	[84]	2008	X														
	[85]	2008	X														
	[86]	2007	X	X			X										
[87]	2003					X											
Toma de decisiones conjunta	[88]	2012	X					X									
	[89]	2011	X														
	[90]	2011	X					X	X					X			
	[91]	2010	X														
	[92]	2009	X	X													
	[93]	2008	X	X													
Intercambio de información	[94]	2014					X										
	[95]	2014	X				X										
	[96]	2013		X				X									
	[97]	2013	X				X										
	[98]	2013															
	[99]	2012	X	X	X		X				X	X					
	[100]	2011	X				X										
	[101]	2011			X					X	X						
	[102]	2010	X	X						X							
	[103]	2010	X				X										
	[104]	2010		X													
	[105]	2010						X									
	[106]	2010			X		X	X	X	X							
	[107]	2009	X														

Continúa

	[108]	2009	X				X								
	[109]	2009	X			X	X								
	[110]	2007	X	X			X								
	[111]	2006	X												
	[112]	2006			X										
	[113]	2004	X												
Tecnología de la información	[33]	2013	X	X			X	X	X	X	X				
	[114]	2009	X	X			X	X	X	X	X				
Intercambio de información - Tecnología de la información	[115]	2010	X				X								
	[116]	2009	X		X										
	[117]	2009	X		X	X		X			X				
	[34]	2005	X	X					X		X				
	[76]	2005	X				X				X			X	
Total				34	13	6	10	12	6	9	5	6	0	1	1

E: Eficiencia; F: Flexibilidad; CR: Capacidad de Respuesta; CA: Calidad de los alimentos; O: Otros; A: Aprovisionamiento; I: Inventarios; D: Distribución; ST: Sistemas de Información y trazabilidad; EM: Embalaje; AL: Almacenes; TI: Transporte e infraestructura.

Los mecanismos de integración externa han sido usados en su mayoría de manera aislada como se observa en la Figura 4, cada mecanismo de integración externa es representado con un círculo y las intersecciones muestran cuándo se usó más de un mecanismo de manera simultánea.

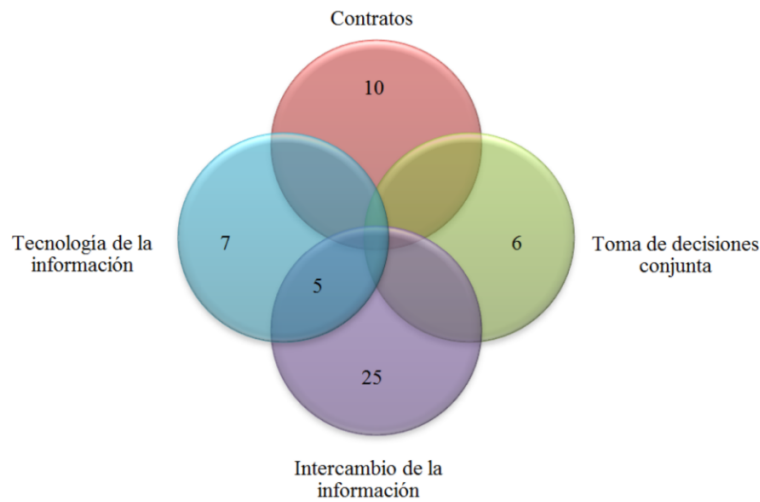


Figura 4. Frecuencia de uso de mecanismos de integración externa.

Fuente: los autores.

El mecanismo usado con mayor frecuencia es el intercambio de información (58,1%), seguido del uso de contratos (23,3%), mientras que el uso de tecnologías de la información (16,3%) y la toma de decisiones conjunta (13,9%) han sido poco utilizados. Por otra parte, solo autores como [34] [76] [115] [116] y [117], utilizaron dos mecanismos de integración externa de manera simultánea (intercambio de la información y tecnologías de la información), por lo tanto, es necesario evaluar cómo la sinergia de varios mecanismos usados de manera simultánea afecta el desempeño de cada eslabón y la CS agroindustrial. En cuanto a las medidas de desempeño de las CS estudiadas, la Figura 5 muestra el uso de cada categoría de indicadores y la frecuencia cuando se usó incluyó más de una categoría de desempeño al tiempo.

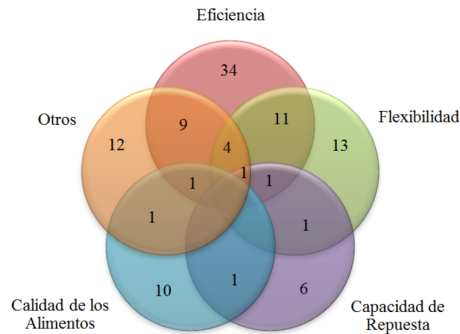


Figura 5. Frecuencia de uso de medidas de desempeño en la CS agroindustrial.

Fuente: los autores.

La mayor parte de los autores analizaron el efecto de la integración externa en la eficiencia de la CS agroindustrial (79,1 %), seguido de la flexibilidad de la CS con un 30,2 %, la calidad de los alimentos con un 23,3 % y la capacidad de respuesta con un 14,0 %, mientras que un 27,9 % incluyó otras medidas de desempeño como la tasa de crecimiento en ventas, cuota de mercado, exactitud en los pronósticos, mejor comunicación, entre otros. Ninguno de los autores consideró al menos un indicador de eficiencia, flexibilidad, capacidad de respuesta y calidad de los alimentos, por consiguiente, es importante evaluar el efecto de la integración externa en todas las categorías del marco de desempeño para cadenas agroindustriales propuesto por [59].

Respecto a la medición del desempeño logístico, la Figura 6 muestra la cantidad publicaciones que consideraron los medios, modos o ambos a la vez. Medios Medios y modos Modos

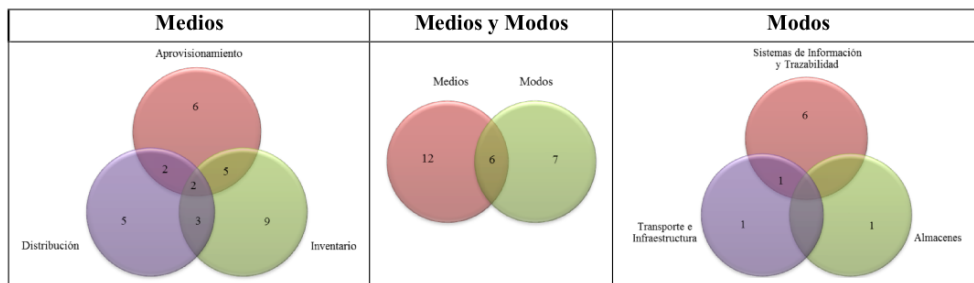


Figura 6. Frecuencia de uso de medios y modos logísticos.

Fuente: los autores.

Solo doce publicaciones (27,9 %) de las 43 en total, analizaron el efecto de mecanismo de integración en los modos, el 16,3 % en los medios logísticos y el 14,0 % en ambos. En cuanto a los modos (procesos de gestión), el 20,9 % del total de publicaciones aspectos de aprovisionamiento, 14,0 % incluyó de inventario y solo 11,6 % el proceso de distribución. En los medios (recursos) un 14, % del total de publicaciones consideró los sistemas de información y trazabilidad, un 2,3 % abordó recursos de almacenes y otro 2,3 % transporte e infraestructura. Ninguno de los autores incluyó el embalaje o empaque. De este modo, son pocos los estudios

que han tomado como eje principal el tema logístico, lo cual resalta la necesidad de estudios en CS agroindustriales que evalúen uno o más mecanismos de integración en el desempeño logístico.

Finalmente, no existe una clara comprensión de cómo está evolucionando este campo de conocimiento, por lo cual esta revisión propone seguir la metodología de selección de uno o varios mecanismos de integración externa de [31] y su medición bajo el marco de desempeño para la CS agroindustriales de [59] y la medición del desempeño logístico de las categorías de análisis propuestas por [60].

4. Conclusiones

La integración en la cadena de suministro agroindustrial no es un concepto nuevo, su evolución ha sido paulatina e impulsada por factores de mercado, regulatorios, tecnológicos, entre otros. La relación existente entre la integración y el desempeño de la CS ha sido ampliamente abordada en cadenas convencionales, no obstante, esta revisión ha mostrado que los estudios en CS agroindustriales han sido escasos, representando una oportunidad de investigación; además, la revisión permite organizar los futuros avances sobre este campo ya que encamina los esfuerzos de investigación, tanto para mecanismos de integración externa como para indicadores de desempeño.

En cuanto a mecanismos de integración externa, muy pocos autores han abordado más de un mecanismo de integración a la vez, de esta manera es necesario estudiar el impacto de varios mecanismos de integración externa en el desempeño de la CS y su impacto en los diferentes eslabones. Tampoco se evidencia un estudio que aclare bajo qué condiciones y contextos de la CS agroindustrial resultan más eficiente los mecanismos de integración externa.

Adicionalmente, la mayor parte de las publicaciones se enfocó en el intercambio de información como principal mecanismo de integración externa, mientras que el mecanismo con menor frecuencia de uso ha sido la toma de decisiones conjuntas, con estrategias colaborativas como el VMI y el CPFR, ya que las características de las CS agroindustriales aumentan su complejidad, por consiguiente, es importante desarrollar mecanismos de toma de decisiones conjunta que se adapten a estas características inherentes de la CS agroindustrial y garanticen un mayor desempeño para los actores y la CS en general.

Con respecto a la medición del desempeño, actualmente no existe un marco común de medición de desempeño para las CS agroindustriales, lo cual dificulta el avance en este campo, por lo tanto, es necesario analizar el impacto de la integración externa sobre un marco de medición como el descrito en esta revisión, adaptándolo a las características de cada eslabón y la CS agroindustrial.

5. Trabajo futuro

Los trabajos futuros que trabajen uno o más mecanismos de integración externa en las CS agroindustriales deberían incluir al menos un indicador por categoría del marco de medición de desempeño referido (eficiencia, flexibilidad, capacidad de respuesta y calidad de los alimentos), permitiendo una visión más completa del efecto de la integración en el desempeño

de la CS agroindustrial y no solo en la eficiencia de la CS con indicadores como costos, utilidad, rendimiento de la inversión y niveles de inventario. En lo que se refiere a la integración externa y el desempeño logístico de cadenas agroindustriales, sigue siendo un campo incipiente y con potencial para futuras investigaciones, tanto en los modos (procesos de gestión) como en los medios (recursos) logísticos, lo que podría profundizar en el enfoque propuesto por Orjuela y Adarme [60].

Esta revisión no incluye un análisis de las principales CS agroindustriales sometidas a estudio, así como las herramientas y métodos utilizados en las publicaciones para evaluar el impacto de mecanismos de integración externa en el desempeño. Por otra parte, la taxonomía puede ser aún más detallada. Respecto a la medición de desempeño, se puede especificar la variable a medir, unidad de medida, objetivos de la medición, métrica, tipo de información e indicador de desempeño, mientras que para los mecanismos se puede profundizar en cada uno, mostrando los tipos de contratos usados, información compartida, tecnología de la información utilizada y estrategias colaborativas.

Referencias

- [1] D. Lambert, M. Cooper and J. Pagh, "Supply Chain Management Implementation Issues and Research Opportunities", *The International Journal of Logistics Management*, vol. 9, no. 2, pp. 1-17, 1998.
- [2] M. Frohlich and R. Westbrook, "Arcs of Integration: An International Study of Supply Chain Strategies", *Journal of Operations Management*, vol. 19, no. 2, pp. 185-200, 2001.
- [3] S. Fawcett and G. Magnan, "The rhetoric and reality of supply chain integration", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, pp. 339-361, 2002.
- [4] S. Zailani and P. Rajagopal, "Supply chain integration and performance: US versus East Asian companies", *Supply Chain Management*, vol. 10, no. 2, p. 379- 393, 2005.
- [5] T. Van der Vaart and Van Donk, "A critical review of survey-based research in supply chain integration", *International Journal of Production Economics*, vol. 111, no. 1, pp. 42-55, 2008.
- [6] B. Flynn, B. Huo and X. Zhao, "The impact of supply chain integration on performance: A contingency and configuration approach", *Journal of Operations Management*, pp. 58-71, 2010.
- [7] C. Droge, S. Vickery and M. Jacobs, "Does supply chain integration mediate the relationships between product/process strategy and service performance? An empirical study", *International Journal of Production Economics*, vol. 137, no. 2, pp. 250-262, 2012.
- [8] T. Davis, "Effective supply chain management", *Management Review Summer*, pp. 35-46, 1993.
- [9] R. Narasimhan and S. Kim, "Effect of supply chain integration on the relationship between diversification and performance: evidence from Japanese and Korean firms", *Journal of Operations Management*, vol. 20, no. 3, pp. 303-323, 2002.
- [10] S. Vickery, J. Jayaram, C. Droge and R. Calantone, "The effects of an integrative supply chain strategy on customer service and financial performance: An analysis of direct versus indirect relationships", *Journal of Operations Management*, pp. 523-539, 2003.
- [11] C. Droge, J. Jayaram and S. Vickery, "The Effects of internal versus external integration practices on time-based performance and overall firm performance", *Journal of Operations Management*, vol. 22, no. 6, pp. 557-573, 2004.
- [12] M. Swink, R. Narasimhan and C. Wang, "Managing beyond the factory walls: effects of four types of strategic integration on manufacturing plant performance", *Journal of Operations Management*, vol. 25, no. 1, pp. 148-164, 2007.
- [13] N. Fabbe-Costes and M. Jahre, "Supply chain integration and performance: a review of the evidence", *The International Journal of Logistics Management*, vol. 19, no. 2, pp. 130-154, 2008.

- [14] M. Pagell, "Understanding the factors that enable and inhibit the integration of operations, purchasing and logistics", *Journal of Operations Management*, vol. 22, no. 5, pp. 459-487, 2004.
- [15] E. Rosenzweig, A. Roth and J. Dean, "The influence of an integration strategy on competitive capabilities and business performance: An exploratory study of consumer products manufacturers", *Journal of Operations Management*, vol. 21, no. 4, pp. 437-456, 2003.
- [16] T. Stank, S. Keller and P. Daugherty, "Supply chain collaboration and logistical service performance", *Journal of Business Logistics*, vol. 22, no. 1, pp. 29-48, 2001.
- [17] S. O'Leary-Kelly and B. Flores, "The integration of manufacturing and marketing/sales decisions on organizational performance", *Journal of Operations Management*, vol. 20, no. 3, pp. 221-240, 2002.
- [18] L. Vijayasathy, "Supply integration: an investigation of its multi-dimensionality and relational antecedents", *International Journal of Production Economics*, vol. 124, no. 2, pp. 489-505, 2010.
- [19] G. Stevens, "Integrating the Supply Chain", *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, vol. 19, no. 8, pp. 3-8, 1989.
- [20] G. Stock, N. Greis and J. Kasarda, "Logistics, strategy and structure: A conceptual framework", *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 18, no. 1, pp. 37-52, 1998.
- [21] C. Gimenez and E. Ventura, "Logistics-Production, Logistics-Marketing and External Integration", *International Journal of Operations & Production Management*, pp. 20-38, 2005.
- [22] D. Power, "Supply chain management integration and implementation: a literature review", *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 10, no. 4, pp. 252-263, 2005.
- [23] A. Rodrigues, T. Stank and D. Lynch, "Linking strategy, structure, process, and performance in integrated logistics", *Journal of Business Logistics*, vol. 25, no. 2, pp. 65-94, 2004.
- [24] W. Kim, "An investigation on the direct effect of supply chain integration on firm performance", *International Journal Production Economics* 119, vol. 119, no. 2, pp. 328-346, 2009.
- [25] D. Prajogo and J. Olhager, "Supply chain integration and performance: the effects of long-term relationships, information technology and sharing, and logistics integration", *International Journal of Production Economics*, vol. 135, no. 1, pp. 514-522, 2012.
- [26] I. Chen and A. Paulraj, "Towards A Theory of Supply Chain Management: The Constructs and Measurements", *Journal of Operations Management*, pp. 119-150, 2004.
- [27] R. Germain and K. Iyer, "The interaction of internal and downstream integration and its association with performance", *Journal of Business Logistics*, pp. 29-53, 2006.
- [28] H. Lee, V. Padmanabhan and S. Whang, "Information distortion in supply chain: The bullwhip effect", *Management Science*, vol. 43, no. 4, pp. 546-558, 1997.
- [29] Arshinder, A. Kanda and S. Deshmukh, "A coordination theoretic model for three level supply chains using contracts", *Indian Academy of Science*, vol. 34, no. 5, pp. 767-798, 2009.
- [30] M. Maleki and V. Machado, "An Empirical Review On Supply Chain Integration", *Management and Production Engineering Review*, vol. 4, no. 3, pp. 85-96, 2013.
- [31] Arshinder, A. Kanda and Deshmukh, "Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions", *International Journal of Production Economics*, vol. 115, no. 2, p. 326, 2008.
- [32] O. Ahumada and R. Villalobos, "Application of planning models in the agri-food supply chain: A review", *European Journal of Operational Research*, vol. 196, no. 1, pp. 1-20, 2009.
- [33] J. Han, H. Lu, J. Trienekens and S. Omta, "The impact of supply chain integration on firm performance in the pork processing industry in China", *Chinese Management Studies*, vol. 7, no. 2, pp. 230-252, 2013.
- [34] E. Mangina and I. Vlachos, "The changing role of information technology in food and beverage logistics management: beverage network optimisation using intelligent agent technology", *Journal of Food Engineering*, vol. 70, no. 3, p. 403- 420, 2005.
- [35] N. Tsolakis, C. Keramydas, A. K. Toka, D. Aidonis and E. Iakovou, "Agrifood supply chain management: A comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy", *Byosystems Engineering*, vol. 120, pp. 1-18, 2013.
- [36] I. Putzger, "All the ducks in a row", *World Trade*, vol. 11, no. 9, pp. 54-60, 1998.
- [37] E. Iakovou, D. Vlachos, C. Achillas and F. Anastasiadis, "A methodological framework for the design of green supply chains for the agrifood sector", de 2nd International Conference on Supply Chains, Greece, 2012.

- [38] J. Orjuela, M. Calderon and S. Buitrago, "Elementos para el análisis del mercado en la cadena agroindustrial", *Revista Científica*, pp. 13-52, 2006.
- [39] A. Matopoulos, M. Vlachopoulou, V. Manthou and B. Manos, "A conceptual framework for supply chain collaboration: empirical evidence from the agri-food industry", *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 177-186, 2007.
- [40] J. Orjuela and I. Chavarrio, "Caracterización de la Cadena de Abastecimiento de Panela para la Provincia de Bajo Magdalena- Cundinamarca", *Ingeniería*, pp. 107-124, diciembre, 2011.
- [41] H. Moharana, J. Murty, K. Senapati and K. Khuntia, "Coordination, Collaboration and Integration for Supply Chain Management", *International Journal of Interscience Management Review*, pp. 46-51, 2012.
- [42] M. Cao and Q. Zhang, *Supply Chain Collaboration: Roles of Interorganizational Systems, Trust, and Collaborative Culture*, London: Springer, 2013.
- [43] M. Hudnurkar and U. Rathod, "Collaborative supply chain: insights from simulation", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 3, no. 2, pp. 122-144, 2012.
- [44] M. Cao and Q. Zhang, "Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage and firm performance", *Journal of Operations Management*, vol. 29, no. 3, pp. 163-180, 2011.
- [45] Chen, "Agri-food supply chain management: opportunities, issues, and guidelines", de International conference on livestock services, Beijing, 2006.
- [46] J. Van der Vorst, C. da Silva and J. Trienekens, *Agro-industrial supply chain management concepts and applications*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007.
- [47] C. Fischer and M. Hartman, *Agri-food chain relationships*, London: CAB International, 2010.
- [48] J. Van der Vorst, "Performance measurement in agri-food supply chain networks. An overview", *Quantifying the Agri-food Supply Chain*, Springer, 2006, pp. 15-26.
- [49] X. Koufteros, T. Cheng and K. Lai, "Black-box and gray box supplier integration in product development: antecedents, consequences and the moderating role of firm size", *Journal of Operations Management*, vol. 225, no. 4, pp. 847-870, 2007.
- [50] J. Wisner, K. Tan and K. Leong, *Principles of Supply Chain Management: A Balanced Approach*, 3 ed., South-Western: Cengage Learning, 2011.
- [51] X. Zhao, B. Huo, B. Flynn and F. Yeung, "The impact of power and relationship commitment on the integration between manufacturers and customers in a supply chain", *Journal of Operations Management*, vol. 26, no. 3, pp. 368-388, 2008.
- [52] J. Van der Vorst, "Performance levels in food traceability and the impact on chain design: results of an international benchmark study", de *Dynamics in chains and networks: Proceedings of the sixth International Conference on chain and network management in agribusiness and the food industry*, Netherland, Wageningen Academic Press, pp. 175-183, 2004.
- [53] X. Zhao, B. Huo, W. Selen and J. Yeung, "The impact of internal integration and relationship commitment on external integration", *Journal of Operations Management*, vol. 29, no. 2, pp. 17-32, 2011.
- [54] W. Zhao and Y. Wang, "Coordination of joint pricing-production decisions in a supply chain", *IIE Transactions*, vol. 34, no. 8, pp. 701-715, 2002.
- [55] U. Ramanathan, "Performance of supply chain collaboration-A simulation study", *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 1, pp. 210-220, 2014.
- [56] W. Yu, M. Jacobs, D. Salisbury and H. Enns, "The effects of supply chain integration on customer satisfaction and financial performance: An organizational learning perspective", *International Journal of Production Economics*, vol. 146, no. 1, p. 346- 358, 2013.
- [57] C. Da Silva, *The growing role of contract farming in agri-food systems development: drivers, theory and practice*, Rome, 2005.
- [58] C. Eaton and A. Shepherd, *Agricultura por contrato: Alianzas para el crecimiento*, Roma, 2001.
- [59] L. Aramyan, C. Ondersteijn, O. van Kooten and A. Lansink, "Performance indicators in agri-food production chains", *Quantifying the agri-food supply chain*, pp. 49-66, springer, 2006.
- [60] J. Orjuela and W. Adarme, "Identificación de asimetrías en los medios de almacenamiento and transporte en la cadena de frutas colombiana.", de *Primer Congreso Internacional Industria y Organizaciones, Logística para la Competitividad*, Bogotá D.C., 2014.

- [61] M. Christopher and M. Juttner, "Supply chain relationships: making the transition to closer integration", *International Journal of Logistics: Research and Applications*, pp. 5-23, 2000.
- [62] J. Van der Vorst, *Effective food supply chains: Generating, modelling and evaluating supply chain scenarios*, Wageningen, 2000.
- [63] L. Aramyan, O. Lansink and J. Van der Vorst, "Performance measurement in agrifood supply chains: A case study", *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 304-315, 2007.
- [64] M. Reina, W. Adarme and O. Suarez, "Coordination on Agrifood Supply Chain", *World Academy of Science Engineering and Technology*, vol. 6, pp. 11-27, 2012.
- [65] G. Cachon, "Supply chain coordination with contracts", in *Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation*, North-holland, 2003, pp. 2-5.
- [66] A. Beulens, D. Broens, P. Folstar and G. Hofstede, "Food safety and transparency in food chains and networks: relationships and challenges", *Food Control*, vol. 16, no. 6, pp. 481-486, 2005.
- [67] J. MacDonald, J. Perry, M. Ahearn, D. Banker, W. Chambers, C. Dimitri, K. Nigel, K. Nelson and L. Southard, "Contract, markets, and prices :organizing the production and use of agricultural commodities", *Agricultural Economic Report*, 2004.
- [68] M. Waller, E. Johnson and T. Davis, "Vendor - Managed Inventory in the retail supply chain", *Journal of Business Logistics*, pp. 183-203, 1999.
- [69] P. Danese, "Designing CPFR collaborations: insights from seven case studies", *International Journal of Operations & Production Management*, pp. 181 - 204, 2007.
- [70] Y. Sheffi, "The value of CPFR", in *Proceedings of RIRL Conference*, Lisboa, 2002.
- [71] T. Netland, E. Alfnes and I. Heskestad, "Integrated manufacturing planning in agri-food supply chains towards end-to-end integration in a Norwegian meat company", de 8th International Conference on Management in Agri-Food Chains and Networks, Netherland, 2008.
- [72] Z. Lotfi, M. Mukhtar, S. Sahran and A. T. Zadeh, "Information Sharing in Supply Chain Management", *Procedia Technology*, vol. 11, pp. 298-304, 2013.
- [73] S. Sun and J. Yen, "Information supply chain: A unified framework for information-sharing", *Intelligence and Security Informatics*, vol. 3495, pp. 422-428, 2005.
- [74] R. J. Lehmann, R. Reiche and G. Schiefer, "Future internet and the agri-food sector: State-of-the-art in literature and research", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 89, pp. 158-174, 2012.
- [75] J. Liu, S. Zhang and J. Hu, "A case study of an inter-enterprise workflow-supported supply chain management system", *Information & Management*, vol. 42, no. 3, p. 441- 454, 2005.
- [76] V. Manthou, A. Matopoulos and M. Vlachopoulou, "Internet-based applications in the agri-food supply chain: a survey on the Greek canning sector", *Journal of Food Engineering*, vol. 70, no. 3, p. 447- 454, 2005.
- [77] V. Salin, "Information technology in agri-food supply chains", *International Food an Agribusiness Management review*, vol. 1, no. 3, p. 329- 334, 1998.
- [78] L. Chen, "Dynamic supply chain coordination under consignment and vendor-managed inventory in retailer-centric B2B electronic markets", *Industrial Marketing Management*, vol. 42, no. 4, pp. 518-531, 2013.
- [79] T. Zhang and S. Lu, "Study on win-win of coordinating supply chain", *Proceedings 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information*, pp. 140-144, 2011.
- [80] D. Shen, M. Wang, K. Lai and L. Liang, "Production-inventory cooperation for perishable products in supply chain", *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, pp. 876-878, 2009.
- [81] X. Zhang and L. Aramyan, "A conceptual framework for supply chain governance", *China Agricultural Economic Review*, vol. 1, no. 2, pp. 136-154, 2009.
- [82] A. Gyau and A. Spiller, "The impact of supply chain governance structures on the inter-firm relationship performance in agribusiness", *Agricultural Economics*, vol. 54, no. 4, p. 2008.
- [83] S. Kuiran, Z. Xiao and Z. Lin, "Supply chain coordination problem with loss-averse retailer and buyback contract", 2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008.
- [84] J. Z. G. S. D. Cai, "Analysis of coordination mechanisms in a two-echelon supply chain", *Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, pp. 1997-2001, 2008.

- [85] B. Liu and W. Ma, "Application of quantity flexibility contract in perishable products supply chain coordination", Chinese Control and Decision Conference, pp. 2758-2761, 2008.
- [86] J. Han, J. Trienekens, T. Tan and S. Omta, "Quality management and governance in pork processing industries in China", in Tropical food chains Governance for Quality in Tropical Food Chains, vol. 10, Netherland, Wageningen Academic Publishers, 2007, pp. 133-152.
- [87] D. Zylbersztajn and C. Filho, "Competitiveness of meat agri-food chain in Brazil", Supply Chain Management, vol. 8, no. 2, pp. 155-165, 2003.
- [88] Y. Yu, Z. Wang and L. Liang, "A vendor managed inventory supply chain with deteriorating raw materials and products materials and products", International Journal of Production Economics, vol. 136, no. 2, pp. 266-274, 2012.
- [89] P. Akhtar, C. Fischer and N. Marr, "Improving the effectiveness of food chain coordinators: A conceptual model", Acta Horticulturae, vol. 895, pp. 15-21, 2011.
- [90] D. Shen, K. Lai, S. Leung and L. Liang, "Modelling and analysis of inventory replenishment for perishable agricultural products with buyer- seller collaboration", International Journal of Systems Science, vol. 42, no. 7, pp. 1207-1217, 2011.
- [91] S. Fu, L. Sun, J. Wu and L. Diao, "On decision-making model for the performance of agricultural supply chain cooperation under information asymmetry", Proceedings-3rd International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2010.
- [92] F. Du, S. Leung, J. Zhang and K. Lai, "Procurement of agricultural products using the CPFR approach", Supply Chain Management: An International Journal, pp. 253-258, 2009.
- [93] P. Southard and S. Swenseth, "Evaluating Vendor-Managed Inventory (VMI) in Non Traditional Environments Using Simulation", Management Department Faculty Publications, vol. 116, no. 2, pp. 275-286, 2008.
- [94] M. Ding, F. Jie, K. Parton and M. Matanda, "Relationships between quality of information sharing and supply chain food quality in the Australian beef processing industry", International Journal of Logistics Management, vol. 1, pp. 85-108, 2014.
- [95] K. Grekova, H. Bremmers, J. Trienekens, R. Kemp and S. Omta, "Extending environmental management beyond the firm boundaries: An empirical study of Dutch food and beverage firms", International Journal of Production Economics, vol. 152, pp. 174-187, 2014.
- [96] J. Bastian and J. Zentes, "Supply chain transparency as a key prerequisite for sustainable agri-food supply chain management", International Review of Retail, Distribution and Consumer Research, vol. 23, no. 5, pp. 553-570, 2013.
- [97] P. Leat and C. Revoredo-Giha, "In search of differentiation and the creation of value: The quest of the Scottish pig supply chain", British Food Journal, vol. 115, no. 10, pp. 1487-1504, 2013.
- [98] V. Kumar, S. Akkarangoon, J. Garza-Reyes, L. Rocha, A. Kumari and Y. Wang, "A Multi-Agent Architecture Framework to Improve Wine Supply Chain Coordination", Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 1077-1088, 2013.
- [99] G. Peng, J. Trienekens, S. Omta and W. Wang, "The relationship between information exchange benefits and performance: Mediating the effect of supply chain compliance in the chinese poultry chain?", International Food and Agribusiness Management Review, vol. 15, no. 4, pp. 65-92, 2012.
- [100] S. Naspetti, N. Lampkin, P. Nicolas, M. Stolze and R. Zanolli, "Organic supply chain collaboration: A case study in eight EU countries", Journal of Food Products Marketing, vol. 17, pp. 141-162, 2011.
- [101] J. Saengadsapaviriya, "Collaborative supply chain management for agricultural produce under Thailand-China FTA: A case study on fresh longans export", Proceedings-2011 4th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, pp. 496-500, 2011.
- [102] J. Li, Y. Chai and D. Fu, "Cooperation of multi-level supply chain with perishable products based on model predictive control", Journal of Information and Computational Science, vol. 7, no. 13, pp. 2935-2942, 2010.
- [103] J. Coronado, J. Bijman, O. Omta and A. Lansink, "Relationship characteristics and performance in fresh produce supply chains: The case of the Mexican avocado industry", Journal on Chain and Network Science, vol. 10, no. 1, pp. 1-15, 2010.
- [104] L. Hobley and P. Batt, "How buyer-supplier relationships can create value: The case of the Australian wine industry", de Agri-food Chain Relationships, 2010, pp. 220-234.

- [105] Q. Li, "Analysis on channel information and control structure performance in food supply chain under e-commerce environment", 2nd International Symposium on Information Science and Engineering, pp. 119-121, 2010.
- [106] A. Humphries and L. McComie, "Performance measurement in the management of food supply chain relationships", de Performance measurement in the management of food supply chain relationships, 2010, pp. 19-36.
- [107] X. Sun and R. Collins, "Systems thinking, relationship management and supply chains", 53rd Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences, pp. 116-126, 2009.
- [108] K. Bryceson and G. Slaughter, "Integrated autonomy-A modeling-based investigation of agrifood supply chain performance", 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2009.
- [109] C. Hill, G. Zhang and G. Scudder, "An empirical investigation of EDI usage and performance improvement in food supply chains", IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 56, no. 1, pp. 61-75, 2009.
- [110] J. Han, S. Omta and J. Trienekens, "The joint impact of supply chain integration and quality management on the performance of pork processing firms in China", International Food and Agribusiness Management Review, vol. 10, no. 2, pp. 67-95, 2007.
- [111] S. Vellema, L. Admiraal, J. Naewbanij and J. Buurma, "Cooperation and strategic fit in the supply chain of Thai fruit", Acta Horticulture, vol. 699, p. Acta Horticulturae, 2006.
- [112] A. Fearne, S. Barrow and D. Schulenberg, "Implanting the benefits of buyer-supplier collaboration in the soft fruit sector", Supply Chain Management, vol. 11, no. 1, pp. 3-5, 2006.
- [113] R. Duffy and A. Fearne, "Buyer-supplier relationships: An investigation of moderating factors on the development of partnership characteristics and performance", Food and Agribusiness Management Review, vol. 7, no. 2, pp. 1-25, 2004.
- [114] J. Han, J. Trienekens and S. Omta, "Integrated information and logistics management, quality management and firm performance of pork processing industry in China", British Food Journal, vol. 111, no. 1, pp. 9-25, 2009.
- [115] G. Kenyon and B. Neureuther, "A comparison of information technology usage across supply chains: A comparison of the U.S. beef industry and the U.S. food industry", International Journal of Information Systems and Supply Chain Management, vol. 3, no. 4, pp. 42-69, 2010.
- [116] R. Rajaguru and M. Matanda, "Influence of inter-organisational integration on business performance: The mediating role of organisational-level supply chain functions", Journal of Enterprise Information Management, vol. 22, no. 4, pp. 456-467, 2009.
- [117] A. Matopoulos, M. Vlachopoulou and V. Manthou, "Understanding the factors affecting e-business adoption and impact on logistics processes", Journal of Manufacturing Technology Management, vol. 20, no. 6, pp. 853-865, 2009.

Andrés Felipe Ruiz Moreno

Nació en Bogotá, Colombia. Es estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Integrante del Grupo de investigación GICALyT.
e-mail: afruizm@udistrital.edu.co

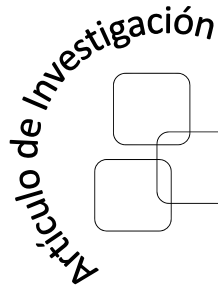
Andrés Leonardo Caicedo Otavo

Nació en Bogotá, Colombia. Es estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Integrante del Grupo de investigación GICALyT.
e-mail: alcaicedoo@udistrital.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero de Alimentos, Ingeniero Industrial, Especialista en Ingeniería de producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Investigación y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Actualmente estudia Doctorado en Ingeniería Industria y Organizaciones en la Universidad Nacional de Colombia, Se desempeña como profesor e investigador en las áreas de Logística en Distrital Francisco José de Caldas, Director del Grupo de investigación GICALyT.
e-mail: e-mail: jorjuela@udistrital.edu.co

Citación: Hualpa, A. M. y López, C. A.(2015). Algoritmo de dimensionamiento de almacenes para empresas de edificación en el sector de la construcción. En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 189–208
© Los autores. Titular de los derechos de reproducción: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.2.a02>



Andrés Mauricio Hualpa Zúñiga
Magister en Ingeniería Industrial
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Docente investigador Universidad
Cooperativa De Colombia
Andres.hualpa@campusucc.edu.co

Cesar Amílcar López Bello
Docente Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
clopezb@udistrital.edu.co



Algoritmo de dimensionamiento de almacenes para empresas de edificación en el sector de la construcción

Stores sizing algorithm for edification companies in the construction sector

Resumen

Este artículo contiene el desarrollo de un algoritmo aplicado a la solución de problemas de dimensionamiento de espacios en el almacenamiento en empresas del sector de la construcción. Este problema se justifica bajo el grado de informalidad que se presenta al momento de asignar áreas de almacenamiento, sin considerar parámetros relacionados con las etapas de construcción, las características del producto y las disposiciones de área en la obra. En un estudio previo se identifica que el grado de informalidad al momento de asignar áreas de almacenamiento genera índices de utilización de la capacidad y la entrega de pedidos de manera incompleta.

El diseño del algoritmo está soportado por un modelo integral de dimensionamiento sujeto a un sistema de ecuaciones con variables de cantidad, volumen y dimensiones de material, para establecer finalmente el área necesaria del almacén. El algoritmo es adaptado a lenguaje de programación con el objeto de presentar los resultados en lenguaje gráfico en donde sea visible el dimensionamiento de espacios de almacenamiento. Estos resultados son validados mediante la evaluación de la utilización de la capacidad de almacenamiento y pedidos completamente entregados para diferentes unidades de carga, demostrando mejoras en estos indicadores.

Palabras claves: Algoritmo, almacén, dimensionamiento, unidad de carga.

Abstract

This article contains the development of an algorithm applied to the solution of problems of sizing of storage spaces in companies in the construction sector. This problem is justified under the degree of informality that occurs at the time of assigning storage areas, without considering parameters related to stages of construction, the characteristics of the product and the provisions of the work area. In a previous study it is identified that the degree of informality at the moment of assigning storage areas, generates poor rates of capacity utilization and delivery of incomplete orders.

The design of the algorithm is supported by a comprehensive model of sizing subjected to a system of equations with variables of quantity, volume and material dimensions, to finally establish the necessary storage area. The algorithm is adapted to programming language in order to present the results in graphic language where the sizing of storage spaces is visible. These results are validated through the evaluation of storage capacity utilization and completely delivered orders for different cargo units, where improvements in these indicators are shown.

Key words: Algorithm, warehouse, sizing, load unit.

Recibido: 07-04-2015
Modificado: 30-05-2015
Aceptado: 30-06-2015

1. Introducción

La industria de la construcción es uno de los sectores más importantes y estratégicos para el desarrollo de Colombia. Según estadísticas presentadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística, el PIB en el año 2014 creció en 5,4 % con relación al año anterior. Al analizar las variaciones por ramas de actividad, se registra mayor crecimiento en este sector con un 17,2 % [1]. De acuerdo con lo anterior este incremento proporciona la necesidad de ejercer mayores acciones de abastecimiento y almacenamiento de materiales en obras civiles y de edificación. Particularmente, el almacenamiento de materiales es una tarea especializada y compleja, porque está sujeta a las condiciones de manipulación, espacio necesario y disponible, desplazamientos periódicos de material, temporalidad de almacenamiento, entre otros. Estos aspectos son considerados características diferenciales con otros sistemas de abastecimiento, debido a que son temporales, al ser desmontados al finalizar la obra. Estos aspectos hacen que el proceso de flujo de material este condicionado a un componente de planeación en el cual es prioritario realizar “trazado” en el que se asigna y dimensiona las áreas de almacenamiento para la obra de construcción.

A pesar del crecimiento significativo de este sector, el desarrollo que ha tenido en Colombia presenta diversos problemas generados por el aumento de costos, incumplimiento en los plazos de entrega, desperdicios y almacenaje inoficioso en las obras [2]. Particularmente las funciones de trazado de áreas de almacenamiento se realizan de manera subjetiva, limitando la utilización de espacios y en algunos casos genera interferencias en la sincronización del flujo de material. Para poder formalizar el proceso de diseño de almacenes en obras de construcción, es necesario estandarizarlo mediante una serie de pasos en los que se evalúen las condiciones de abastecimiento y se agilice la función de trazado temporal. De acuerdo con investigaciones desarrolladas desde los años setenta a la actualidad, en el diseño de almacenes se integran factores de ubicación y dimensionamiento así como la distribución de materiales dentro del mismo, derivándose de estos elementos condicionantes como el tamaño de las unidades de carga, las tendencias de demanda, las tasas de rotación, entre otros [3]. Por otra parte la estructura y diseño interno del almacén, la selección de equipos de manipulación de material y la selección de estrategias operacionales también son considerados factores para el diseño del almacén [4].

El diseño de almacenes ha sido objeto de estudio en diversas investigaciones en las que se han desarrollado modelos específicos de dimensionamiento. Los métodos más utilizados son la programación lineal [5], el diseño basado en costos de inventario [6], la programación estocástica en la que se integran variables de costo de reposición, así como el índice cúbico de pedido [7] [8]. Es de resaltar que desde la década de los noventa, se evidencia mayor utilización de la simulación en el dimensionamiento de almacenes. Es así que mediante la combinación de modelos matemáticos y computacionales se desarrollan estudios para evaluar niveles de automatización y la capacidad de almacenaje [9] [10]. La aleatoriedad de la demanda ha sido otra característica de estudio. Mediante la formulación de esta variable se puede obtener el tamaño óptimo de un almacén [11] [12]. De la misma manera la disposición interna de materiales y los métodos de enrutamiento para el procesamiento de pedidos han sido considerados factores de dimensionamiento [13].

El diseño de almacenes también ha tenido desarrollo mediante la aplicación de algoritmos que buscan solución a problemas de distribución, orientación de estanterías de almacenamien-

to, asignación de espacios entre otros, generando soluciones con múltiples objetivos [14]. Por ejemplo el algoritmo Branch and Bound ha sido aplicado en el dimensionamiento de almacenes, fundamentado en los costos de manejo de materiales. [15]. Los resultados del algoritmo demuestran ser más eficientes que las soluciones mediante programación dinámica o lineal. De la misma manera se ha desarrollado modelos de dimensionamiento aplicando el algoritmo de búsqueda tabú, en el que mediante una formulación de programación entera se genera una solución inicial y posteriormente se refina con el algoritmo [16]. Otro parámetro integrado en el desarrollo de algoritmos es la asignación de materiales en instalaciones disponibles, en el que se comparan soluciones obtenidas entre un modelo matemático lineal y un algoritmo de búsqueda local iterativa [17]. El objetivo es reducir tiempos de entrega, niveles de inventario, costos de almacenamiento e incrementar el nivel de servicio, demostrando así que el uso de algoritmos genera soluciones en menor tiempo y esfuerzo computacional de cálculo.

Existe un amplio desarrollo de técnicas aplicadas en el diseño de almacenes, en el que se asocian variables dimensionales de las unidades de carga y tasas de rotación de material [18]. También la configuración del almacén y la secuencia de programación de alistamiento de pedidos [19]. Sin embargo este desarrollo ha tenido impacto en sectores diferentes al sector de la construcción, estableciendo la necesidad de formalizar protocolos y/o pasos ordenados para sistemas de abastecimiento y almacenamiento dinámico.

El objeto de este artículo es presentar un algoritmo de dimensionamiento de almacenes compatible con las características de abastecimiento de una obra de construcción, para facilitar la estandarización del proceso de diseño de este tipo de almacenes temporales.

2. Materiales y métodos

Los resultados presentados en este artículo fueron desarrollados mediante una investigación proyectiva en la que se propone un algoritmo como solución a un problema o necesidad de tipo práctico en el sector de la construcción. Los lineamientos metodológicos desarrollados parten de la identificación de características, factores y procedimientos que permiten definir variables de diseño de instalaciones de almacenamiento. A partir de esto se propone una descripción sistemática diseñada en tres fases: análisis del problema, diseño del algoritmo y resolución del problema con computadora. Esta metodología es acogida de acuerdo a los estudios recientes en las ciencias de la computación, en la que expertos tienen la noción de convertir la solución de un problema en un conjunto de instrucciones o pasos ordenados que convergen a una solución eficiente. Sin embargo este estudio puede ser complejo según las características del problema, generando la necesidad de tener varias opciones de tratamiento y/o solución [20]. El desarrollo metodológico del diseño del algoritmo se presenta en este artículo.

2.1. Materiales y métodos

La asignación de espacios de almacenamiento en obras de construcción es un proceso que con frecuencia se desarrolla por la experiencia e intuición de las personas encargadas de planificar el trazado de áreas. Para esta práctica son desconocidos los indicadores de cumplimiento

de pedidos y utilización de espacios disponibles que se generan en la medida que avanza la obra, lo cual hace considerar que no sean constantes debido a las características de almacenamiento temporal y dinámico de materiales. En este orden de ideas inicialmente se realizó un experimento con un grupo de diez personas encargadas de planificar y programar el almacenamiento de materiales en tres obras de construcción en la ciudad de Bogotá (programadores en la Tabla I), quienes generaron registros en un instrumento de recolección de datos, estableciendo las siguientes condiciones:

- Asignación estándar del almacén para pallets como unidad de carga experimental con dimensiones de 1 por 1,2 metros, con disponibilidad de estanterías convencionales para almacenamiento de pallet con tres niveles de altura.
- Tres cantidades de pedido: 180 pallet, 300 pallet y 720 pallet integrados por diferentes materiales para construcción que totalizan a estos niveles. Según previo cálculo de área y volumen se identifica que para cada nivel de pedido se debe asignar 207 m^2 , $362,5 \text{ m}^2$ y 738 m^2 de área real de almacenamiento respectivamente. Los cálculos de área se realizan inicialmente de manera manual a partir de la ocupación de pallet en estanterías de tres niveles. La distribución de almacén y dimensiones en el eje X e Y para cada pedido se presenta en la figura 1.

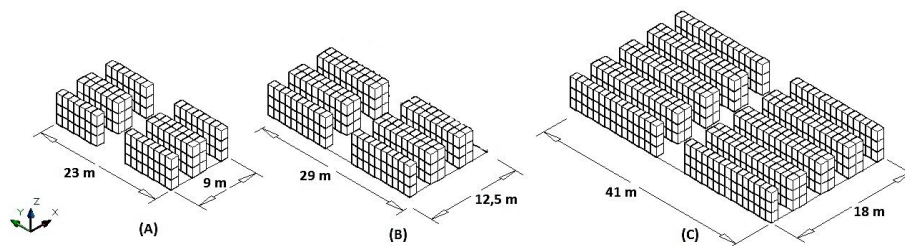


Figura 1. Distribución de almacén y área realmente necesaria para cada pedido.

Estos resultados se justifican de la siguiente manera: Para el pedido de 180 pallet se determina una distribución en el almacén de 4 slot sobre el eje X, 15 slot sobre el eje Y y 3 slot sobre el eje Z. La longitud en el eje X e Y para este almacén es de 9 y 23 metros, obteniendo un área total de 207 m^2 . En los pasillos laterales y central se tiene un ancho de 2,5 metros y 5 metros respectivamente. Para el pedido de 300 y 720 pallet se determina una distribución de 5 y 8 slot sobre el eje X y 20 y 30 slot sobre el eje Y respectivamente.

- Calculo de porcentaje de utilización de capacidad según el cociente entre el área asignada y el área real de almacenamiento.
- Se Identifica “pedido completo” cuando en la obra se recibe la totalidad del material solicitado porque se encontraba disponible en el almacén. Por lo contrario existe la posibilidad de no tener disponible todo el material solicitado debido a que no se tenía suficiente capacidad de almacenamiento, generando “pedido incompleto”.

Según estas condiciones se obtienen los datos de asignación de área por cada uno de los programadores y los indicadores de utilización de capacidad de almacenamiento con cumplimiento de pedidos (Fill Rate). Estos resultados son presentados en la Tabla I.

Tabla I. Indicadores de eficiencia en el proceso de asignación de áreas de almacenamiento.

	Cantidad de unidades de carga a almacenar 180 pallet			Cantidad de unidades de carga a almacenar 300 pallet			Cantidad de unidades de carga a almacenar 720 pallet		
	Área real necesaria para almacenar 207 m ²			Área real necesaria para almacenar 362,5 m ²			Área real necesaria para almacenar 738 m ²		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Programador 1	311	67 %	Completo	489	67 %	Completo	738	100 %	Completo
Programador 2	228	91 %	Completo	293	100 %	Incompleto	959	77 %	Completo
Programador 3	228	91 %	Completo	261	100 %	Incompleto	1033	71 %	Completo
Programador 4	228	91 %	Completo	456	71 %	Completo	517	100 %	Incompleto
Programador 5	124	100 %	Incompleto	391	83 %	Completo	1033	71 %	Completo
Programador 6	248	83 %	Completo	424	77 %	Completo	959	77 %	Completo
Programador 7	186	100 %	Incompleto	370	100 %	Completo	664	100 %	Incompleto
Programador 8	228	91 %	Completo	424	77 %	Completo	959	77 %	Completo
Programador 9	186	100 %	Incompleto	385	91 %	Completo	517	100 %	Incompleto
Programador 10	124	100 %	Incompleto	228	100 %	Incompleto	1107	67 %	Completo
		91 %	60 %		86 %	70 %		84 %	70 %
		% Promedio Utilización de capacidad de almacén	% Entregas Completas		% Promedio Utilización de capacidad de almacén	% Entregas Completas		% Promedio Utilización de capacidad de almacén	% Entregas Completas
Nomenclatura A: Área asignada para almacenamiento por parte del programador. (m ²) B: Porcentaje de utilización de la capacidad de almacenamiento. (%) C: Cumplimiento de pedidos (Fill Rate)						% Promedio de utilización de capacidad de Almacenamiento % Entregas completas		87 % 67 %	

Según los resultados obtenidos, se establece que de acuerdo al grado de informalidad y/o subjetividad de las personas encargadas del trazado para asignación de áreas de almacenamiento, en promedio se está generando un 87 % de utilización de capacidad de almacenamiento y tan sólo un 67 % de entrega de pedidos de manera completa. En otros términos existe una variabilidad de dimensionamiento al asignar áreas del almacén que reflejan desabastecimiento interno por diversos factores. Como se define inicialmente, el objeto de este artículo es presentar un algoritmo de dimensionamiento de almacenes compatible con las características de abastecimiento de una obra de construcción, para facilitar la estandarización del proceso de diseño temporal de este tipo de almacenes. Para el caso específico del diseño del algoritmo de dimensionamiento de almacenes, es necesario determinar las características de planeación en el proceso de trazado (dimensionamiento de áreas), así como las variables, parámetros y criterios relacionados con el abastecimiento de materiales en el sector de la construcción. A continuación se presentan estas características.

2.2. Variables y parámetros de abastecimiento

Como fue mencionado previamente, en el análisis del problema para el diseño del algoritmo de dimensionamiento es necesario identificar variables y parámetros de abastecimiento del sector de la construcción. Para esto se diseñó un estudio diagnóstico en el que participaron em-

presas constructoras a las que se consultó las características de abastecimiento de materiales. Los resultados iniciales de este estudio permitieron identificar que existen diversos factores, entre ellos las etapas de construcción que pueden clasificarse en tres: estructural, mecánica y estética y/o refinamiento. De la misma manera el tipo de material clasificado en siete categorías generales y 22 subcategorías, las consideraciones de protección diferenciadas en cuatro niveles y siete unidades de carga principalmente sujetas a tres técnicas de almacenamiento. La relación de estos factores se presenta en la Tabla II.

Tabla II. Características de abastecimiento de materiales en el sector de la construcción

Características específicas		Condiciones de almacenamiento		
Material	Clasificación	Protección	Unidades de carga	Técnica de Almacenamiento
Pétreos	Rocas	P4	SNDQ	AP
	Granulados	P4	SNDQ – CNF	AP
Cerámicos	Productos porosos	P3	PLLT – SNDQ	EST – AP
	Productos semicompactos	P3	CJ-PLLT	EST – AP
	Productos compactos	P3	CJ-PLLT	EST – AP
	Productos vitrificados	P3	CJ-PLLT	EST – AP
Aglomerantes	Aéreos	P3	CNF - PLLT	EST – AP
	Hidráulicos	P3	CNF - PLLT	EST – AP
	Hidrocarbonados	P3	ENV – CJ	EST
Metálicos	Hierro, acero, plomo, cobre, zinc, aluminio	P1	TUB – SNDQ	EST – CANT
Materiales Orgánicos y Artificiales	Madera	P3	TUB – LAM – SNDQ	EST – CANT
	Productos bituminosos	P2	ENV – CJ	EST
	Plásticos	P4	TUB – SNDQ	EST – CANT
	Fibras naturales de origen vegetal	P4	SNDQ	EST
	Caucho	P4	SNDQ	AP – CANT
	Otro productos	P4	TUB – SNDQ	EST – CANT
Pinturas	De uso general	P2	ENV – CJ	EST
	Tipo industrial	P2	ENV – CJ	EST
Herramientas y equipos	Herramientas menores	P3	CJ	EST
	Equipos	P1	SNDQ	EST

Nomenclatura

Protección: Este ítem se refiere al tipo de protección necesario para el material. (P1). Materiales valiosos que deben ser protegidos. (P2). Materiales peligrosos que deben ser protegidos. (P3). Materiales que requieren de protección. (P4). Materiales que no requieren de protección.

Compatibilidad: Este ítem se refiere a la compatibilidad del material con las diferentes unidades de carga utilizadas en el sector de la construcción dependiendo de su forma comercial. (PLLT) Pallet. (CJ) Cajas o cajones. (ENV) Envases. (CNF) Contenedor flexible. (TUB) Tubular. (LAM) Lámina. (SNDQ) Sin unidad de carga.

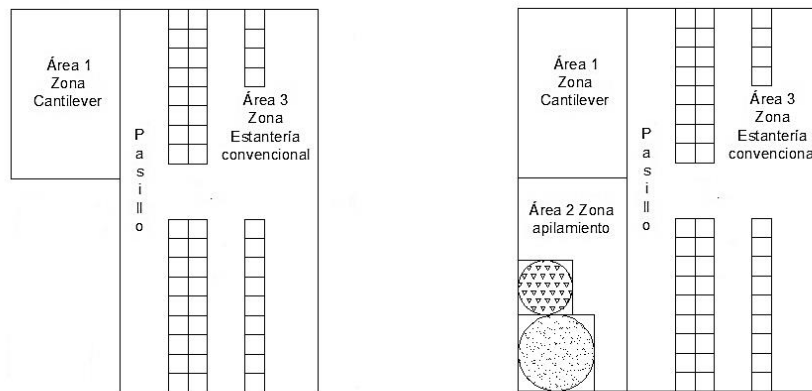
Técnica De Almacenamiento: Este ítem clasifica las técnicas de almacenamiento del material dependiendo de sus características de volumetría y unidad de carga. (EST) Estantería. (CANT) Cantiléver. (AP) Apilamiento.

De acuerdo con las características de abastecimiento en el sector de la construcción, el tipo y cantidad de material está condicionado a la manera en que evoluciona cada una de sus etapas, porque los materiales utilizados en una etapa no son necesariamente los mismos que se utilizan en otras. Otro resultado importante del estudio es que todas las unidades de carga son utilizadas en cada una de las etapas de construcción, a excepción de la etapa estética y refinamiento debido a que en su generalidad no aplica metros cúbicos como unidad de carga. A partir de esto se definen en la Tabla III los parámetros iniciales para el diseño del algoritmo:

Tabla III. Parámetros iniciales de diseño del algoritmo.

Etapa de construcción	Parámetro de diseño del algoritmo
Estructural o mecánica	El almacén debe estar diseñado mediante una distribución global de tres áreas ajustadas para estantería convencional, estantería cantiléver y áreas de apilamiento.
Estética y/o refinamiento	El almacén debe estar diseñado mediante una distribución global de dos áreas ajustadas para estantería convencional y estantería cantiléver. El área de apilamiento se excluye en esta etapa debido a que en el diagnóstico se identifica que no se utilizan materiales sujetos a unidades de carga dadas en metros cúbicos.
Estructural, mecánica, estética y/o refinamiento (etapas simultáneas)	El almacén debe estar diseñado mediante una distribución global de tres (3) áreas ajustadas para estantería convencional, estantería cantiléver y áreas de apilamiento. Lo anterior debido a que de una u otra forma las etapas Estructural y/o mecánica estarán involucradas en esta combinación.

A partir de lo anterior, los parámetros para diseño del algoritmo establecen instalaciones estándar de almacenamiento en una obra de construcción. En la Figura 2 se presentan dos tipos de instalaciones necesarias para cada una de las etapas de construcción en la que se puede visualizar dos o tres áreas genéricas de acuerdo a la técnica de almacenamiento.

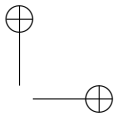
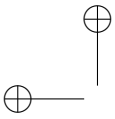


(A) Layout de almacén para obras de construcción en etapa estética y refinamiento.

(B) Layout de almacén para obras de construcción en etapa estructural, mecánica o múltiples etapas.

Figura 2. Instalación estándar de almacén de materiales para cada etapa de construcción.

Las dimensiones en términos de área para cada una de las zonas presentadas en la Figura 2, dependerán de la cantidad de material necesario en cada etapa de construcción,



es decir, la zona de apilamiento tendrá un área en m^2 dependiendo de la cantidad de m^3 a almacenar. Esta área se caracteriza por concentrar en un mismo lugar los materiales apilables, cuando generalmente son ubicados en diferentes lugares de la obra generando reproceso por desplazamientos de material. Por otra parte la zona de estantería convencional tendrá un área en m^2 dependiendo de la cantidad de unidades de carga compatibles con pallet. La zona cantiléver tendrá un área sujeta a las dimensiones de este tipo de estanterías. Finalmente el área del almacén se obtiene mediante la sumatoria de áreas de estas tres zonas.

3. Modelos de dimensionamiento

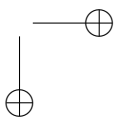
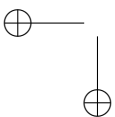
De acuerdo con las variables y parámetros definidos, es necesario identificar modelos de dimensionamiento relacionados con estos, para integrarlas a un algoritmo. Para ello es necesario tener en cuenta la zona cantiléver, apilamiento y estantería convencional. A continuación se presentan las características de cada uno de estos modelos de dimensionamiento.

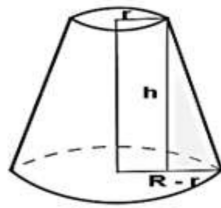
3.1. Modelo dimensionamiento zona cantiléver

La técnica de almacenamiento por estantería cantiléver se caracteriza por ser un sistema de almacenaje de unidades de carga largas y/o pesadas, perfiles, tuberías, tableros, láminas, listones, molduras, etc, ya que ningún elemento de la estructura dificulta el manejo de la carga por muy larga que esta sea. De acuerdo con la estructura de este tipo de estantería, su instalación requiere un área disponible de $6 m^2$ aproximadamente. Sin embargo para casos en los que la capacidad no supere el almacenamiento de más de 4 tipos de materiales con unidades de carga larga, se recomienda la utilización de una sola cara de la estantería eliminando así espacio. En este segundo caso el área necesaria se reduciría a $3 m^2$.

3.2. Modelo dimensionamiento zona de apilamiento

La técnica de apilamiento se caracteriza por ser un sistema de almacenaje para materiales que no tienen unidad de carga definida. Este es el caso de materiales pétreos, granulares, cerámicos, entre otros. De acuerdo a las condiciones definidas en la guía de almacenamiento de materiales GA-14, los materiales sin unidad de carga deben almacenarse en cajones de madera que ocupan un área de $2 m^2$ y están condicionados a almacenar cantidades que no superen $2.4 m^3$ de material aproximadamente. Para los casos en que la cantidad sea mucho mayor a esta capacidad de almacenamiento se recomienda confinar el material sobre suelo, el cual debe estar cubierto de polietileno o cualquier otro material impermeable para evitar la erosión del mismo. Debido a que este sistema mantiene una forma irregular al acumular granel sólido sobre un plano, se propone ajustar su proporción a la forma de un cono truncado como se presenta en la Figura 3.





$$V = \frac{1}{3}\pi h (R^2 + r^2 + (Rr)) \quad (1)$$

$$R^2 + Rr - \left[\frac{V}{\frac{1}{3}\pi h} - r^2 \right] = 0 \quad (2)$$

En donde:

r = Radio menor

g = Generatriz

h = Altura

R = Radio mayor

V = Volumen

Figura 3. Características de un cono truncado propuestas para apilamiento de material sin unidad de carga.

Para establecer un nuevo parámetro de diseño del algoritmo es necesario asignar un área para materiales sin unidad de carga. En este caso el área dependerá del diámetro de la base del cono, es decir dos veces el radio mayor (R). Para despejar el valor de radio mayor de la ecuación 1, es necesario convertir la ecuación de volumen en una polinómica. A partir de lo anterior se obtiene la ecuación 2 de la forma $aX^2 + bX + C = 0$ donde $a = 1$, $X = R$, $b = r$ y c es la parte fraccional. En este caso para calcular el área necesaria, se requiere identificar que valores están disponibles. En principio el volumen (V) se conoce ya que es un valor que depende de la cantidad de material que se almacenará temporalmente. La altura (h) puede establecerse a través del ángulo de reposo formado entre la generatriz del cono y su base. Para las aplicaciones en materiales de construcción como arena seca, grava, piedra, yeso, entre otros, se mantiene un ángulo de reposo entre 25° a 40° aproximadamente según la humedad del material. En este caso la altura es determinada como el producto entre la tangente de a y el radio mayor, donde a es el ángulo de reposo. Sin embargo esta ecuación no es aplicable en el modelo debido a que el radio mayor es una variable desconocida. Por esta razón se realiza una simplificación del cálculo de la altura, atendiendo las condiciones definidas en la guía de almacenamiento de materiales GA-14, en la que se establece que los agregados pétreos y/o granulares serán apilados a una altura no mayor a 2 metros. Por tanto $h = 2$ como valor constante. El radio menor (r) es un valor que puede estimarse bajo la condición que sea menor que el radio mayor ($r < R$). Como parámetro para el diseño del algoritmo, se identifica que para calcular el área necesaria de almacenamiento de materiales sin unidad de carga se puede utilizar finalmente la ecuación 3.

$$\text{Área} = 2 \sqrt{r^2 - 4 \left[\frac{-V}{\frac{1}{3}\pi h} - r^2 \right]} - r \quad (3)$$

3.3. Modelo dimensionamiento zona estantería convencional

De acuerdo con los modelos de dimensionamiento desarrollados en diversas investigaciones se puede destacar la propuesta presentada por Ghiani, Laporte y Musmano en el año 2004, en los que se determina mediante un sistema ecuaciones, la variable distancia del almacén sobre el eje X e Y [22]. Estas ecuaciones son compatibles con las condiciones geométricas definidas en la Figura 2, debido a que proporcionan el área necesaria de almacenamiento. En la Tabla IV se presenta el conjunto de ecuaciones útiles para el cálculo de las dimensiones de un almacén.

Tabla IV. Ecuaciones del modelo de dimensionamiento

Ecuaciones del modelo seleccionado	Notación
$nx = \sqrt{\frac{m \alpha y}{2nz (\alpha x + \frac{1}{2}\omega x)}} \quad (4)$	En donde: <i>m</i> = Número de unidades de carga máximo αx ; αy = Ocupación de área de la unidad de carga en el eje <i>x</i> e <i>y</i> nz = Número de espacios de almacenamiento en el eje <i>z</i> nx = Número de espacios de almacenamiento en el eje <i>x</i> ny = Número de espacios de almacenamiento en el eje <i>y</i> Wx = Anchura de la nave lateral Wy = Anchura de la nave central Lx = Distancia del almacén sobre el eje <i>x</i> (ancho) Ly = Distancia del almacén sobre el eje <i>y</i> (largo)
$ny = \sqrt{\frac{2m (\alpha x + \frac{1}{2}\omega x)}{\alpha y nz}} \quad (5)$	
$Lx = \left(\alpha x + \frac{1}{2}\omega x \right) nx \quad (6)$	
$Ly = (\alpha y ny) \omega y \quad (7)$	

Específicamente las ecuaciones 4 y 5 integran variables y parámetros fijos de entrada que calculan el número de slots o espacios de almacenamiento necesarios en el eje X e Y. La variable de entrada “m” está sujeta a la cantidad de material que se proyecta almacenar en un periodo de planeación y que determina la capacidad necesaria de almacenamiento. Los parámetros fijos de entrada están sujetos a las dimensiones de la unidad de carga a almacenar, los niveles de altura sujetos a las características de los racks o estanterías y el ancho de los pasillos de circulación, cuya longitud depende de los equipos de alistamiento de pedidos. Finalmente las ecuaciones 6 y 7 establecen la longitud necesaria para acondicionar una instalación de almacenamiento teniendo en cuenta los parámetros definidos anteriormente. Las variables dimensionales del almacén dependerán del eje X – Y definidos inicialmente para el layout del almacén, ya que la posición de las unidades de carga, los pasillos centrales, laterales y sus respectivas dimensiones pueden variar. Las dimensiones de la unidad de carga dependen de las características de manipulación y almacenamiento de los materiales. Estos pueden almacenarse en contenedor, pallet, cajas, bultos, etc. Las dimensiones de los pasillos dependerán de las dimensiones y grado de maniobrabilidad del equipo de apoyo para la manipulación del material. Finalmente las distancias en el eje X-Y del almacén determinaran el área en m^2 necesaria para su construcción.

3.4. Integración de variables y parámetros para el diseño del algoritmo de dimensionamiento de almacenes

Para el diseño del algoritmo es necesario integrar variables y parámetros de entrada y salida. Para ello en la caracterización del abastecimiento en el sector de la construcción se identificó que está sujeto a tres etapas de construcción, cinco unidades de carga compatibles con tres técnicas de almacenamiento, de las cuales son aplicables tres modelos de dimensionamiento. De estos modelos se generan parámetros como la longitud de la unidad de carga, la longitud de los pasillos del almacén, el número de slots en el eje Z que dependen de la altura de la estantería a utilizar y la altura y radio permitido para el material apilado. Finalmente se obtienen variables de salida como la longitud y área necesaria para cada técnica de almacenamiento generando así el área total de un almacén en función de un pedido específico. Por lo anterior

el algoritmo de dimensionamiento puede aplicarse tantas veces como pedidos se realicen. La integración de variables y parámetros se presentan en la Figura 4.

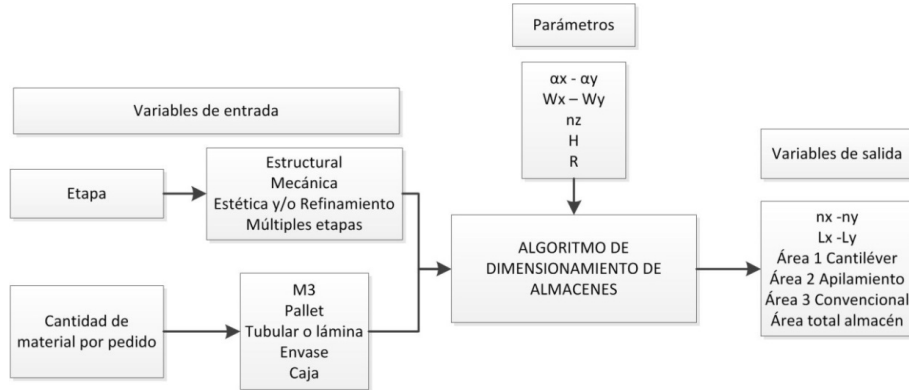


Figura 4. Integración de variables y parámetros.

4. Resultados

En el desarrollo del algoritmo es necesario establecer un modelo general de dimensionamiento debido a que el proceso de almacenamiento está supeditado a diversas combinaciones de variables y parámetros para obtener el área total del almacén. Esto quiere decir que la solución debe ser integrada mediante el dimensionamiento de tres áreas dedicadas para unidades de carga compatibles con instalaciones cantiléver, apilamiento y estantería convencional. Específicamente el Área 1 está dedicada para ubicación de materiales con unidades de carga tubular y/o laminar que son compatibles con estantería cantiléver en la que su capacidad es de 6 slots y área aproximada de $6 m^2$, debido a que las dimensiones de este tipo de estantería es de $2,7 m$ y $2 m$ como se presenta en la figura 5(A). Por otra parte el Área 2 está dedicada para ubicación de materiales sin unidad de carga definida como lo son los pétreos y/o granulares y que son almacenados mediante técnica de apilamiento. El dimensionamiento de ésta área se obtiene mediante la relación del volumen de pedido para cada material, generando así un área específica de apilamiento para cada uno de ellos. En la figura 5(B) se presenta esta relación en la que se obtiene el área total para la zona de apilamiento.

De acuerdo con la figura 5(B), el lado “a” de la zona de apilamiento dependerá del pedido que tenga mayor volumen y el lado “d” de la sumatoria de las áreas necesarias para cada material de este tipo. Finalmente el Área 3 está dedicada para materiales con unidades de carga como lo son, cajas, envases y/o pallet, unificando todas a esta última para lograr compatibilidad con estantería de tipo convencional. En la Tabla V se presenta el modelo integral de dimensionamiento con sus respectivas ecuaciones de cálculo.

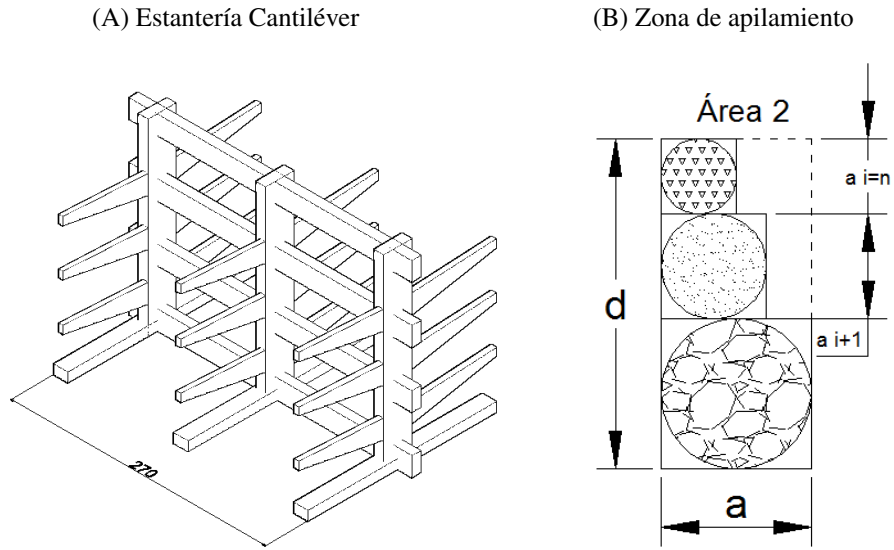


Figura 5. Características técnicas estantería Cantiléver y zona apilamiento.

Tabla V. Modelo integral de dimensionamiento.

Modelo de dimensionamiento	Ecuación de cálculo
	$\text{Área 1} \simeq 6 m^2 \quad (8)$
	$\text{Utilización Área 1} = \left(\frac{\text{Slot cantiléver}}{6} \right) * 100 \quad (9)$
	$a = \sqrt{r^2 + 4 \left(\frac{V}{\frac{1}{3}\pi h} - r^2 \right)} - r \quad (10)$
	$d = a_i + a_{i+1} + \dots + a_{i=n}; a_i > a_{i+1} > a_{i=n} \quad (11)$
	$\text{Área 2} = a_{i\text{mayor}} \cdot d \quad (12)$
	$\text{Utilización Área 2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=n} a_i^2}{\text{Área 2}} \right) * 100 \quad (13)$
	$b = Lx = \left(\alpha x + \frac{1}{2} \omega x \right) nx$
	$c = Ly = (\alpha y ny) \omega y$
	$\text{Área 3} = b \cdot c \quad (14)$
	$\text{Utilización Área 3} = \left(\frac{m}{nx \cdot ny \cdot nz} \right) * 100 \quad (15)$

De acuerdo con la Tabla V la ecuación 10 se obtiene a partir de la ecuación 3, calculando únicamente un lado del área necesaria para almacenar materiales sin unidad de carga (apilamiento). El lado “b” y “c” de la zona de estantería convencional, están asociadas a la ecuación 6 y 7 de la tabla 4. Finalmente el área total del almacén se obtiene mediante la sumatoria de todas las áreas que la integran, agregando en esta sumatoria el área necesaria para pasillo central que estará intermedio al área 1, 2 y 3. Finalmente las ecuaciones 16 y 17 calculan el área total necesaria y utilización promedio para el almacenamiento de materiales respectivamente.

$$\text{Área total} = \text{Área 1} + \text{Área 2} + \text{Área 3} + (wx \cdot C) \quad (16)$$

$$\text{Utilización promedio Almacén} = \frac{\text{Utilización área 1+2+3}}{3} \quad (17)$$

4.1. Algoritmo de dimensionamiento

De acuerdo con la definición de parámetros, variables de entrada y salida del modelo integral de dimensionamiento de almacenes en el sector de la construcción, se presenta a continuación los pasos propuestos para el algoritmo.

1. **Inicio.**

2. ¿Obra de construcción etapas simultáneas?

3. Sí.

4. Determinar la combinación de etapas de construcción que intervienen en el diseño del almacén.

5. Establecer cantidad y/o volumen de pedido por tipo de material m^3 , pallet (m) y/o cantiléver.

6. Definir parámetros h y r

7. Calcular $a = \sqrt{r^2 + 4 \left(\frac{V}{\frac{1}{3}\pi h} - r^2 \right)} - r$

8. Calcular $d = a_i + a_{i+1} + \dots + a_{i=n}$

9. Calcular $\text{Área 2} = a_{i\text{mayor}} \cdot d$

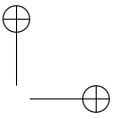
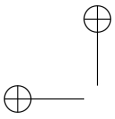
10. Calcular $\text{Utilización Área 2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=n} a_i^2}{\text{Área 2}} \right) * 100$

11. Definir parámetros $\alpha x, \alpha y, W x, W y, n z,$

12. Definir $\text{Área 1} = 6 m^2$

13. Calcular $\text{Utilización Área 1} = \left(\frac{\text{Slot cantiléver}}{6} \right) * 100$

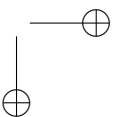
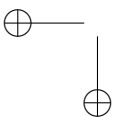
14. Calcular $n x = \sqrt{\frac{m \alpha y}{2 n z (\alpha x + \frac{1}{2} \omega x)}} \quad \text{y} \quad n y = \sqrt{\frac{2 m (\alpha x + \frac{1}{2} \omega x)}{\alpha y n z}}$



15. Calcular $b = (\alpha x + \frac{1}{2}\omega x) nx$ y $c = (\alpha y ny) + \omega y$
16. Calcular $\text{Área } 3 = b * c$
17. Calcular $\text{Utilización Área } 3 = \left(\frac{m}{nx \cdot ny \cdot nz}\right) * 100$
18. Calcular $\text{Área total} = \text{Área } 1 + \text{Área } 2 + \text{Área } 3 + (wx \cdot c)$
19. Calcular $\text{Utilización promedio almacén} = \frac{\text{Utilización Área } 1+2+3}{3}$
20. Si no.
21. ¿Etapa de construcción Estructural o Mecánica?
22. Sí.
23. Repetir paso 5 al 19
24. Si no Etapa Estética y Refinamiento
25. Repetir paso 11 al 19
26. Generar Layout con dimensiones calculadas
27. Fin.

4.2. Diagrama de flujo del algoritmo de dimensionamiento

El diagrama de flujo anterior representa la secuencia de pasos del algoritmo para dimensionar almacenes en obras de construcción. Inicialmente se genera un elemento condicional para clasificar la(s) etapa(s) en que se encuentra la obra. Para este caso puede aplicar la combinación de etapas simultáneas o sólo alguna de ellas. A partir de esto se determinan los valores de entrada, entre ellos los metros cúbicos de material de apilamiento, la cantidad de unidades compatibles con estantería cantiléver y convencional, entre otros. De la misma manera se definen los parámetros de unidad de carga y ancho de pasillos de acuerdo a las restricciones de espacio y condiciones de maniobrabilidad de los equipos de manipulación. Finalmente el algoritmo genera el cálculo de área necesaria para cada una de las unidades de carga, así como el área general del almacén con su respectiva utilización promedio proyectada. Con esto se obtienen los parámetros de diseño del layout para realizar el trazado de áreas de almacenamiento en la obra de construcción. Cabe resaltar que para el caso de etapas únicas se tiene los mismos pasos, con la diferencia que en la etapa estética y refinamiento aplica únicamente área cantiléver y convencional, de acuerdo a la configuración obtenida en la definición de variables y parámetros de abastecimiento. La secuencia presentada en este algoritmo genera el diseño procedimental para el desarrollo de una aplicación en lenguaje de programación visual basic, con la que se realiza el proceso de aplicación y validación del mismo.



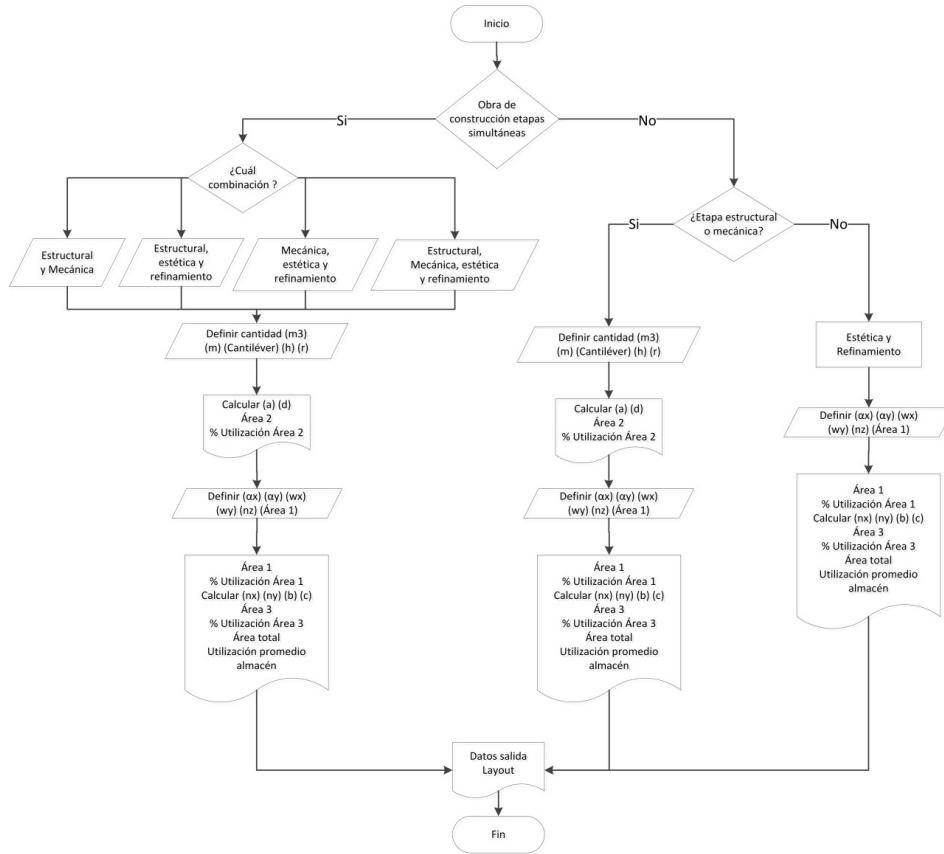


Figura 6. Algoritmo de dimensionamiento de almacenes en el sector de la construcción.

4.3. Validación del algoritmo

Una vez diseñado el algoritmo se procede a validar su aplicabilidad en el proceso de dimensionamiento dinámico de almacenes. Para esto se obtienen datos de abastecimiento de una obra de construcción residencial. Las características de pedido de la obra se presentan en la Tabla VI.

Tabla VI. Datos de abastecimiento para un pedido en una obra de construcción.

Material	Cantidad	Especificación	Material	Cantidad	Especificación	Material	Cantidad	Especificación
Rocas (Piedra)	6	m^3	Malla Electro soldada	7	Unidades	Cerámico (Ladrillo)	300	Ladrillos
Granulado (afirmado)	12	m^3	Acero figu-rado	250	250 kg	Aglomerante (Cemento)	96	Bultos
Granulado (Agregado)	12	m^3	Alambre	50	Kg	Hierro (Varilla)	200	Varillas
Granulado (Arena)	4	m^3	Madera (Tabla)	40	Unidades	Poli estireno expandido	20	Pliegos
Cerámico (Bloque)	800	Bloques	Tubería	30	Unidades	Vibro Compactadora	1	Unidad
Cerámico (Bloque)	600	Bloques	Polímero Impermeable	80	Metros	Accesorios Tubería	1	Unidad

La obra está proyectada para construir un edificio multifamiliar de tres niveles. Para la aplicación del algoritmo se tomará como muestra un total de cuatro pedidos de material realizados en diferentes etapas de construcción. Cabe resaltar que el primer pedido se caracteriza por ser etapa única “Estructural”, los dos siguientes pedidos son etapas simultáneas “Estructural y Mecánica” y el último estética y refinamiento. Los datos de los pedidos y los resultados obtenidos con la aplicación computacional del algoritmo son los siguientes:

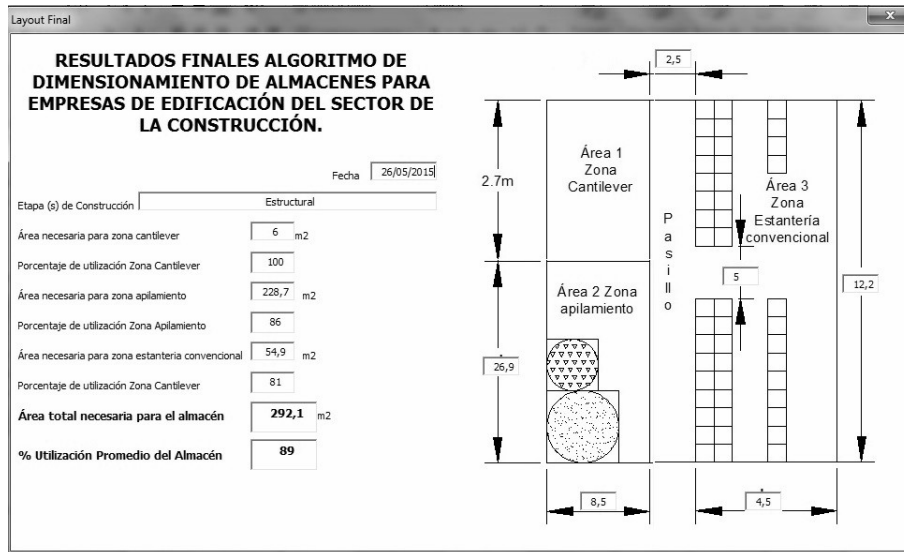


Figura 7. Resultados obtenidos con el algoritmo al pedido número 1 mediante la aplicación en Visual Basic.

- Los resultados obtenidos para el primer pedido aplican para tres áreas de almacenamiento con un total de $292 m^2$. La proyección de utilización del almacén es del 89%. De acuerdo con el layout obtenido, la zona cantiléver debe tener una asignación mínima de $6 m^2$ obtenida a partir de 2 y 2,7 metros en los ejes $X - Y$ respectivamente. Por otra parte la zona de apilamiento debe tener una asignación de $228,7 m^2$ obtenida a partir de 8,5 y 26,9 metros en los ejes $X - Y$ respectivamente, proyectando una utilización

del 86 %. Finalmente la zona de estantería convencional debe tener una asignación de $54,9 m^2$ obtenida a partir de 4,5 y 12,2 metros en los ejes $X - Y$ respectivamente, proyectando una utilización del 81 %.

- Los resultados obtenidos para el segundo pedido aplican para tres áreas de almacenamiento con un total de $183,8 m^2$. La proyección de utilización del almacén es del 93 %.
- Los resultados obtenidos para el tercer pedido aplican para tres áreas de almacenamiento con un total de $198,4 m^2$. La proyección de utilización del almacén es del 92 %.
- Los resultados obtenidos para el cuarto pedido aplican para tres áreas de almacenamiento con un total de $52 m^2$. La proyección de utilización del almacén es del 94 %.

5. Discusión de los resultados

El presente estudio identifica el avance investigativo en el proceso de abastecimiento y almacenamiento de materiales, en el que técnicas matemáticas, heurísticas y de algoritmos comprenden el principal desarrollo de métodos y/o modelos aplicados a la gestión de almacenes. Entre ellos se enmarca un modelo geométrico de dimensionamiento de almacenes que de acuerdo a sus características, es compatible con las condiciones del sector de la construcción, siendo necesario hacer ajustes para poderlo adaptar a procesos de construcción de vivienda. Por otra parte, en la caracterización del sector de la construcción se identifican siete categorías y veintidós subcategorías de material, cuatro categorías de protección, tres técnicas de almacenamiento, siete unidades de carga y tres etapas de construcción, estableciendo así variables y parámetros para el diseño del algoritmo.

De acuerdo con la necesidad de ejercer mayores acciones de almacenamiento debido al creciente abastecimiento de materiales en obras de construcción, se desarrolla un algoritmo de dimensionamiento que combina tres zonas de almacenamiento que varían de acuerdo a la unidad de carga a utilizar. Según los resultados, estas zonas son compatibles con las siete unidades de carga previamente identificadas, definiendo como estándar la integración de zonas cantiléver, apilamiento y estantería convencional (paletizada).

A diferencia de la aplicación de otros algoritmos que buscan generar soluciones a problemas de distribución para reducir tiempos de entrega, niveles de inventario, entre otros, el algoritmo de dimensionamiento propuesto busca mejorar el nivel de servicio garantizando la entrega de pedidos completos al tener suficiente material disponible en diferentes unidades de carga en el almacén. Según los resultados obtenidos en la aplicación del algoritmo para cuatro pedidos en una obra de construcción, se identifica que el trazado para asignación de áreas de almacenamiento tendrá proyectado una utilización promedio del 92 %. La entrega de pedidos completos tendrá un rendimiento del 100 % debido a que las áreas asignadas disponen de capacidad suficiente para almacenar los materiales solicitados. Los resultados específicos de estos indicadores para cada pedido se presentan en la Tabla VII.

Tabla VII. Resultados del algoritmo de dimensionamiento de almacenes para cuatro pedidos.

	Área asignada por el algoritmo (m^2)	Área real necesaria para almacenar 207 m^2	% Utilización de la capacidad de almacenamiento	FILL RATE
Pedido 1	292	260	89 %	Completo
Pedido 2	184	171	93 %	Completo
Pedido 3	198	183	92 %	Completo
Pedido 4	52	49	94 %	Completo
			92 %	100 %
			% Promedio de Utilización de capacidad de Almacenamiento	% Entregas completas

En la Tabla VII se registra pedido entregado “completo” cuando la capacidad necesaria es inferior a la capacidad asignada o en otras palabras se recibe la totalidad del material solicitado porque se encontraba disponible en el almacén, generando un porcentaje de utilización inferior al 100 %. De acuerdo con los resultados, se presenta incremento promedio del 5 % en la utilización de la capacidad de almacenamiento, lo cual relativamente es bajo. En el análisis del problema se identifica que por medio de la experiencia de personas encargadas de planificar áreas de almacenamiento, la utilización de capacidad promedio es del 87 % lo cual es un indicador inicial muy bueno. Esto hace deducir que el algoritmo de dimensionamiento mantiene en sus resultados una asignación sin mayor variabilidad comparada con la obtenida por la experiencia de los programadores. Contrario a esto, los resultados obtenidos con el algoritmo para el segundo indicador presentan un incremento del 23 %, generando una variabilidad positiva en la entrega de pedidos.

El aporte del algoritmo de dimensionamiento propuesto establece bondades de aplicación en procesos de gestión de abastecimiento de obras de construcción, ya que no sólo se puede destinar a reducir el grado de informalidad y subjetividad en el momento de realizar asignación de espacios de almacenamiento, sino garantizar la entrega de pedidos completos apoyando el proceso de planeación de obras y facilitando la estandarización de almacenes en un sistema dinámico y temporal.

6. Conclusiones

El diseño del algoritmo de dimensionamiento integra variables de entrada, parámetros y variables de salida que se adaptan a la opción de una o múltiples etapas de construcción, constituyendo así un total de 27 pasos. En estos pasos se involucra adicionalmente el cálculo de utilización de capacidad como indicador primario para validar la viabilidad del algoritmo.

Con la aplicación del algoritmo de dimensionamiento se obtiene una mejora en el nivel de servicio incrementando de un 67 % a un 100 % en la entrega de pedidos. Este incremento se logró ya que el algoritmo garantiza la asignación de capacidad superior a la necesaria. Sin

embargo los resultados de utilización de esta capacidad no presentan incremento representativo ya que mantiene la misma utilización generada en el experimento. Lo anterior hace que el algoritmo con múltiples criterios de evaluación aplicado en la solución de problemas de dimensionamiento de espacios de almacenamiento en empresas de edificación sea viable únicamente para garantizar la entrega completa de pedidos.

Se recomienda para futuras investigaciones la integración de parámetros de ubicación del almacén en obra al algoritmo, es decir definir una secuencia de pasos que permitan realizar ubicación dinámica de almacenamiento en la medida que avanza la obra. También la distribución interna materiales acondicionando métodos en los que se garantice disminución de tiempos de alistamiento de pedidos, con el objeto de generar una solución completa a los problemas comunes que se presentan en el abastecimiento de materiales en el sector de la construcción. También es necesario adaptar los resultados del algoritmo a un lenguaje gráfico (autocad, soliedge, entre otros), para generar informes más detallados y comprensibles por parte de programadores de obra. Para el caso de querer aplicar el algoritmo en otro tipo de obras de construcción, es necesario repetir el proceso de validación sin necesidad de modificar variables y parámetros de entrada ya que estos son genéricos para el sector de la construcción.

Referencias

- [1] DANE. Comunicado de prensa. 19 de Junio de 2014, Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bol_PIB_Itrime14.pdf
- [2] Santiago, Manrique. (2010) Identificación de los principales problemas en la logística de abastecimiento de las empresas constructoras Bogotanas y propuestas de mejoras, Consultado 15 de Mayo de 2014, disponible en: <http://javeriana.edu.co/biblos/tesis/economia/tesis189.pdf>
- [3] Andrés Hualpa, Carolina Suarez (2013) Ubicación y dimensionamiento como parámetros en el diseño de almacenes: revisión del estado del arte, Revista de Ingeniería, Volumen 18-1, (ISSN 0121-750X) 65-83
- [4] Jinxiang Gu, Marc Goetschalckx, Leon F. McGinnis, (2007) Research on warehouse operation: A comprehensive review, European Journal of Operational Research, Volume 177, Issue 1, (ISSN 0377-2217) 1-21
- [5] M.S. Hung, John C. Fisk, (1984) Economic sizing of warehouses: A linear programming approach, Computers & Operations Research, Volume 11, Issue 1, (ISSN 0305-0548) 13-18.
- [6] Charles J. Malmborg, Swaminathan Balachandran, Daniel M. Kyle, (1986) A model based evaluation of a commonly used rule of thumb for warehouse layout, Applied Mathematical Modelling, Volume 10, Issue 2, (ISSN 0307-904X) 133-139
- [7] Kumar Bhaskaran, Charles J. Malmborg, (1990) Economic tradeoffs in sizing warehouse reserve storage area, Applied Mathematical Modelling, Volume 14, Issue 7, (ISSN 0307-904X) 381-385
- [8] Charles J. Malmborg, Krishnakumar Bhaskaran, (1990) A revised proof of optimality for the cube-per-order index rule for stored item location, Applied Mathematical Modelling, Volume 14, Issue 2, (ISSN 0307-904X) 87-95.
- [9] O. Hounkonnou, (1990) Modelling and simulation of an automated warehouse in activity, Mathematical and Computer Modelling, Volume 14, (ISSN 0895-7177) 1100-1102.
- [10] Gilles Cormier, Eldon A. Gunn, (1992) A review of warehouse models, European Journal of Operational Research, Volume 58, Issue 1, (ISSN 0377-2217) 3-13
- [11] Charles J. Malmborg, (1996) An integrated storage system evaluation model, Applied Mathematical Modelling, Volume 20, Issue 5, (ISSN 0307-904X) 359-370.
- [12] A.K. Rao, M.R. Rao, (1998) Solution procedures for sizing of warehouses, European Journal of Operational Research, Volume 108, Issue 1, (ISSN 0377-2217) , 16-25

- [13] René de Koster, Tho Le-Duc, Kees Jan Roodbergen, (2007) Design and control of warehouse order picking: A literature review, *European Journal of Operational Research*, Volume 182, Issue 2, (ISSN 0377-2217) 481-501.
- [14] Semih Önüt, Umut R. Tuzkaya, Bilgehan Doğaç, (2008) A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 54, Issue 4, (ISSN 0360-8352) 783-799.
- [15] Venkata Reddy Muppani (Muppant), Gajendra Kumar Adil, (2008) A branch and bound algorithm for class based storage location assignment, *European Journal of Operational Research*, Volume 189, Issue 2, (ISSN 0377-2217) 492-507.
- [16] Lu Chen, André Langevin, Diane Riopel, (2011) A tabu search algorithm for the relocation problem in a warehousing system, *International Journal of Production Economics*, Volume 129, Issue 1, (ISSN 0925-5273) 147-156.
- [17] F. Guerriero, R. Musmanno, O. Pisacane, F. Rende, (2012) A mathematical model for the Multi-Levels Product Allocation Problem in a warehouse with compatibility constraints, *Applied Mathematical Modelling*, (ISSN 0307-904X)
- [18] Felix T.S. Chan, H.K. Chan, (2011) Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage, *Expert Systems with Applications*, Volume 38, Issue 3, (ISSN 0957-4174) 2686-2700
- [19] Klaus Moeller, (2011) Increasing warehouse order picking performance by sequence optimization, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 20, (ISSN 1877-0428) 177-185.
- [20] Luis, Joyanes, Concepción Fernandez y Ignacio, Zahonero. (2005) Programación en C: Metodología, algoritmos y estructura de datos. Mc Graw Hill. Ed 2.
- [21] Instituto de Desarrollo Urbano, (2008) Procedimiento para el almacenamiento de materiales en campamentos, centros de acopio y frentes de obra, Disponible en:
<http://webidu.idu.gov.co:9090/jspui/bitstream/123456789/32643/23/60014765-12.pdf>
- [22] Gianpaolo Ghiani, Gilbert, Laporte y Roberto, Musmanno. (2004) Introduction to logistics systems: Planning and control. Editorial John Wiley & Sons. 193-199

Andrés Mauricio Hualpa Zúñiga

Magister en Ingeniería industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero Industrial de la Universidad Cooperativa de Colombia. Docente Investigador grupo Ingenio INDUSPYMES de la Universidad Cooperativa de Colombia.

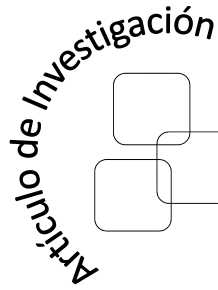
e-mail: andres.hualpa@campusucc.edu.co

Cesar Amílcar López Bello

Magister en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes. Especialista en Ingeniería de Producción, Universidad Distrital. Ingeniero Industrial Universidad Distrital. Profesor investigador grupo sistemas logísticos de la Universidad de la Sabana. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería Universidad Distrital. Investigador grupo MMAI de la Universidad Distrital.

e-mail: clopezb@udistrital.edu.do

Citación: Franco, C., Méndez, G. A. y Espitia, J. (2015). Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D.C. mediante Dinámica de Sistemas. En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 209–231
© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a03>



Evaluación de escenarios de descongestión vehicular en Bogotá D.C. mediante Dinámica de Sistemas

Assessment of scenarios of vehicular decongestion in Bogotá D.C., using system dynamics

Carlos Franco Franco
Universidad Católica de Colombia
cafranco@ucatolica.edu.co

Germán Andrés Méndez Giraldo
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
gmendez@udistrital.edu.co

John Espitia
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
jaerjr@gmail.com



Resumen

Este trabajo propone el desarrollo de un modelo basado en Dinámica de Sistemas en el cual se caracteriza el sistema de transporte de Bogotá D.C. Para realizar lo anterior se modelan las principales variables que intervienen en el sistema de transporte, a fin de lograr un análisis global de la problemática de transporte y evaluar posibles soluciones propuestas por diferentes expertos.

El modelo es desarrollado mediante el software Stella, donde se incluyen los diferentes actores que intervienen en la problemática global. Previo al desarrollo del modelo computacional, se lleva a cabo la recolección de información a través de expertos en el tema, que permite realizar una caracterización inicial, para poder así comprender la relación entre variables. Adicionalmente se evalúan sobre el modelo seis diferentes alternativas de solución a la problemática, con el propósito de observar el impacto que estas tendrían sobre el sistema de transporte.

Palabras claves: Dinámica de Sistemas, pensamiento sistémico, transporte urbano

Abstract

This paper proposes the development of a model based on system dynamics in which the transportation system in Bogotá D.C. is characterized. To do this the main variables involved in the transport system are modeled in order to achieve a global analysis of the problems of transportation and evaluate possible solutions proposed by different experts.

The model is developed using the software Stella, and the different actors involved in global issues are included. Prior to the development of computational model is carried out data collection by experts on the subject, which shall provide an initial characterization, in order to understand the relationship between variables. Additionally six different alternative solutions to the problem are evaluated, to observe the impact that they would have on the transportation system.

Key words: systems dynamics, systems thinking, urban transportation

Recibido: 16-04-2015
Modificado: 16-07-2015
Aceptado: 09-08-2015

1. Introducción

Las temáticas de movilidad urbana y transporte colectivo son de vital importancia para las ciudades, ya que cuando se logra un progreso apropiado en estos temas se alcanza un buen desarrollo colectivo de la ciudad; es tal la relevancia que tiene la movilidad, que se reconoce como la primera necesidad colectiva de cualquier tipo de ciudad [1]. Para el Distrito Capital la movilidad urbana y el transporte colectivo no son una problemática ajena, puesto que diariamente la ciudad se ve inmersa en los problemas que trae el no tener una buena planificación en estas áreas, ya que se presenta una ineficiencia de los diferentes actores involucrados en el sistema de transporte de la ciudad.

Con el propósito de afrontar esta problemática, las diferentes administraciones han implementado medidas para tratar de mitigar los efectos adversos que traen los problemas de movilidad en la ciudad. La primera solución que se planteó para este problema fue la implementación de sistema Transmilenio, que ha contribuido a solucionar en parte la problemática de movilidad en las zonas donde presta su servicio [2]. La siguiente solución que se implementó es la del pico y placa, con lo cual se restringe la circulación de una cantidad de vehículos en ciertas franjas horarias, con el fin disminuir el uso del espacio por vehículos privados y de servicio público; esta medida fue adoptada desde el año 1998 con la administración del alcalde Enrique Peñalosa. Finalmente, aunque no está implementado en su totalidad, la última estrategia que se adoptó consiste en utilizar un sistema integrado de transporte público que conecte los diferentes actores del transporte colectivo, dicha estrategia surge como decreto desde el año 2009 y hoy en día se encuentra en la fase de implementación.

En el presente artículo se aborda la problemática a través de Dinámica de Sistemas, pues, como lo mencionó Jay Forrester en su libro [3], los sistemas sociales, que son de gran complejidad, se pueden abordar mediante modelos computacionales para lograr un mejor entendimiento, ya que la manera que se tiene para abordar este tipo de problemáticas es mediante modelos o patrones de pensamiento y estos pueden tener perjuicios o alteraciones.

A fin de hacer frente al problema de movilidad del Distrito capital se siguieron los lineamientos de la metodología propuesta por los docentes Lindsay Álvarez y Germán Méndez [4], que consiste en la consulta bibliográfica de la situación problemática de autores tanto nacionales como internacionales, después se construye un diagrama de afinidad en donde se agrupan las características consideradas por los expertos para la problemática; el siguiente paso consiste en la elaboración de un diagrama de Pareto en donde se muestran las características provenientes del diagrama de afinidad, y posteriormente diseñar un diagrama causa-efecto que contemple las variables principales que intervienen en la problemática de transporte. Siguiendo con la metodología se diseña un diagrama causal en donde se muestran las diferentes variables que intervienen en la situación problema y, además, se muestra la interacción entre ellas, a continuación se consultan diferentes fuentes de datos para así determinar modelos de regresión que representen el sistema, por último se usa un software diagramático que para este caso es STELLA, el cual permite mostrar las interrelaciones entre variables con su respectivo modelo matemático.

Después de desarrollar el modelo computacional se evalúan seis alternativas propuestas por diferentes autores para solucionar la problemática de movilidad. Sobre cada uno de estos escenarios se observará el impacto que tendrían sobre indicadores de movilidad y se hará énfasis

en el indicador de velocidad promedio, el cual es uno de los indicadores más utilizados para evaluar un sistema de movilidad.

2. Estudios relacionados

De otro lado, se han realizado diversos estudios relacionados con la movilidad en distintas partes del mundo utilizando Dinámica de Sistemas, inclusive podemos encontrar varios estudios dentro de Colombia que se han presentado para estudiar la problemática local. A continuación se enunciarán algunos de estos, tanto internacionales como locales, para así poder encontrar las diferencias con el trabajo propuesto en el presente artículo.

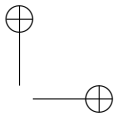
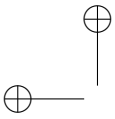
Dentro de los primeros trabajos que se han realizado se pueden encontrar diferentes modelaciones para abordar la problemática, uno de ellos en Delhi [5]; en este trabajo se elaboran experimentos para medir los efectos en la congestión vial, la distribución del modo de transporte, el consumo de transporte y la contaminación generada por el tráfico. Para hacer esta modelación los autores tienen en cuenta cuatro sectores principales: socio-económico, transporte de pasajeros, medio ambiente y energía. Las políticas que se evalúan sobre el modelo de simulación hacen referencia al costo del combustible, el incremento de los impuestos sobre vehículos particulares y la disminución de los costos de viaje en trenes. El propósito del artículo es evaluar dichas políticas a fin de reconocer si efectivamente disminuyen la congestión y la contaminación ambiental.

Otra de las primeras aproximaciones al modelamiento de transporte mediante Dinámica de Sistemas fue la modelación de sistemas de transporte con respecto a nuevas ciudades en Egipto [6]. Al final del artículo se hace una descripción rigurosa de cómo la Dinámica de Sistemas contribuye a la modelación de los sistemas de transporte.

Estudios recientes que se han presentado incluyen nuevas variables. Es así que en [7], se presenta una modelación del sistema de transporte en Dalian China, en donde se modelan siete submodelos que interactúan entre sí para representar el sistema global, estos submodelos son: desarrollo económico, población, número de vehículos, influencia ambiental, demanda de viajes, congestión de tráfico y planeación de transporte. La conclusión a la cual llegan con el modelo es que se debe restringir el número de vehículos con el fin de lograr una sostenibilidad y eficiencia en el sistema de transporte.

Finalmente, existen otras aproximaciones basadas en Dinámica de Sistemas, que no estudian casos particulares de ciudades, sino que realizan análisis de políticas de sostenibilidad de transporte [8], aproximaciones a viajes entre ciudades [9], y evaluaciones del impacto de trenes sobre regiones metropolitanas [10].

No solo existen aproximaciones en ciudades fuera de Colombia, también hay trabajos que hacen aproximaciones a la problemática con Dinámica de Sistemas dentro de nuestra ciudad, entre estos trabajos se encuentran [11] [12] y [13]. En los tres trabajos hay una alta concentración en la modelación de los sistemas de transporte en ciudades de Colombia, en este caso Bogotá D.C. y Cali, para saber cuál es el impacto sobre el transporte urbano.



Con estos análisis de trabajos desarrollados en la temática se muestra la novedad del trabajo presentado en este artículo, ya que en él se desarrolla una modelación global de todos los componentes que hacen parte del sistema de movilidad en la ciudad de Bogotá D.C., además de utilizar una metodología nueva para el análisis de sistemas.

3. Conceptos previos de Dinámica de Sistemas

A partir del año 1950 se desarrolló una metodología para estudiar comportamientos de sistemas complejos en donde se buscaba principalmente elaborar políticas para sistemas complejos mediante el uso de herramientas computacionales, estos sistemas compartían una característica esencial: su comportamiento estaba regido por un componente básico denominado los bucles de retroalimentación.

Los elementos principales de la Dinámica de Sistemas son los siguientes [20]:

- Diagramas causales
- Ciclos de realimentación
- Retrasos
- Estructuras genéricas

El diagrama causal es aquel que muestra la relación entre cada par de variables y da su sentido de relación. Para obtener un diagrama causal se realiza para cada par de variables una flecha en la cual se utiliza un signo para indicar si la relación es positiva o negativa, figura 1.

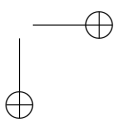
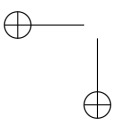


Figura 1. Ejemplo diagrama causal.

En la figura 1 se muestra la relación de las variables 1(V_1) y 2(V_2), y el signo positivo de la relación, lo que indica que a cualquier aumento de la variable 1, existe un crecimiento de la variable 2 (no tiene que ser en la misma proporción), y ocurre lo mismo en el caso de que la variable 1 decrezca. Una relación negativa indica que a un aumento de la variable 1 generará un decrecimiento de la variable 2.

Los ciclos de realimentación son aquellos que muestran la información del estado del sistema en un momento dado, cuando este sistema ha sido sometido a una alteración. Los ciclos pueden ser positivos o negativos, un ciclo positivo indica que todas las conexiones entre variables son positivas, lo que quiere decir que siempre hay un refuerzo positivo en el comportamiento; por otro lado, un bucle negativo representa las situaciones en las cuales se quiere alcanzar una meta o lograr un objetivo.

Cuando existen unas relaciones entre dos variables, la influencia de una variable sobre otra puede no ser en el mismo momento de tiempo, es decir que la influencia de esta variable tarda



en manifestarse, esto es lo que se denomina un retraso o una demora. Estos retrasos pueden determinar las posibles decisiones que se tomen sobre un sistema. Finalmente las estructuras genéricas hacen referencia a aquellos comportamientos en los cuales existen sistemas de realimentación positiva y negativa a la vez, que guardan ciertos comportamientos que pueden caracterizar situaciones cotidianas.

El último componente hace referencia al traspaso del modelo causal al modelo computacional, en este paso se crean los diagramas de Forrester [20]. Los componentes del diagrama de Forrester son los siguientes:

- Niveles: son aquellos que acumulan los valores de las variables de interés y muestran la situación o estado del sistema en cada instante del modelo. Los elementos que hacen que aumenten o disminuyen los valores de los niveles son los flujos.
- Flujos: son aquellos que modifican los niveles y toman los valores respectivos de las acciones o decisiones que son implementadas en el modelo.
- Variables auxiliares: son parámetros que sirven como elementos de entrada para los flujos.

4. Desarrollo de la metodología

A continuación se muestran la metodología utilizada, junto con los resultados y el análisis de cada uno de los pasos. Dentro de los pasos utilizados se encuentran los siguientes:

- Consulta de expertos
- Diagrama de Pareto
- Diagrama causa-efecto
- Modelo de simulación
- Análisis de políticas

4.1. Consulta de expertos

En total se consultaron 50 expertos entre nacionales e internacionales, de los cuales se tomó la problemática planteada para la movilidad en Bogotá D.C, o para otra ciudad en particular, de estos autores se obtuvieron 350 causas, el resumen de los autores consultados se muestra en la tabla I; las principales características a la problemática señalada por los expertos se muestran en la tabla II, estas se agruparon en 14 causas mediante afinidad, en donde se agrupan aquellas que tienen objetivos o enunciados similares.

Tabla I. Características de los autores consultados

Característica	Valor	Porcentaje
Autor (es) colombianos	31	62 %
Autor (es) extranjeros	19	38 %
Problemática de Bogotá	35	70 %
Problemática internacional	15	30 %
Fuentes de hasta cinco años	31	62 %
Fuentes de más de cinco años	19	38 %

Como se observa en la tabla I, la mayor parte de expertos consultados son de nacionalidad colombiana, pues representan un 62 % del total de autores consultados, además la mayoría de ellos hace referencia en sus artículos a la problemática local, teniendo un 70 % de autores que hablan sobre la movilidad en Bogotá; asimismo la mayor parte de ellos son fuentes recientes, pues el 62 % no superan los cinco años.

Tabla II. Características señaladas por los autores

Causa de la problemática	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia acumulada	Porcentaje Acumulado
Gestión deficiente en la planeación de la movilidad	51	14,6 %	51	14,6 %
Uso indiscriminado del automóvil	38	10,9 %	89	25,4 %
Modelo empresarial en el sector transporte	36	10,3 %	125	35,7 %
Infraestructura vial	33	9,4 %	158	45,1 %
Incremento del parque automotor	27	7,7 %	185	52,9 %
Ordenamiento territorial	27	7,7 %	212	60,6 %
Calidad del transporte público y masivo	25	7,1 %	237	67,7 %
Debilidades institucionales	23	6,6 %	260	74,3 %
Sobreoferta de transporte	22	6,3 %	282	80,6 %
Desintegración de sistemas de transporte público	18	5,1 %	300	85,7 %
Congestión vial	16	4,6 %	316	90,3 %
Tasa de accidentalidad	12	3,4 %	328	93,7 %
Cultura ciudadana	11	3,1 %	339	96,9 %
Ilegalidad	11	3,1 %	350	100 %

En la tabla II se muestra al detalle cuáles son las causas señaladas por los expertos consultados, existe una causa de la problemática que se denomina Administración Distrital, que según la consulta realizada se puede representar mediante tres causas diferentes: ordenamiento territorial, debilidades institucionales y gestión deficiente de planeación de la movilidad. Además de las causas señaladas se muestra la frecuencia de cada una de ellas, el porcentaje, la frecuencia acumulada y el porcentaje acumulado, esto con el fin de tener un insumo de entrada para el siguiente paso de la metodología y lograr obtener el diagrama de Pareto.

4.2. Diagrama de Pareto

Utilizando las características mostradas en la tabla II y el porcentaje acumulado se elabora el diagrama de Pareto [14], que se muestra en la figura 2; para elaborarlo se asigna un valor numérico a cada característica, tabla III.

Tabla III. Identificación de las características

Identificación	Causa de la problemática
3,3	Gestión deficiente en la planeacion de la movilidad
2	Uso indiscriminado del automóvil
4	Modelo empresarial en el sector transporte
11	Infraestructura vial
1	Incremento del parque automotor
3,1	Ordenamiento territorial
8	Calidad del transporte público y masivo
3,2	Debilidades institucionales
5	Sobreoferta de transporte
9	Desintegración de sistemas de transporte público
12	Congestión vial
6	Tasa de accidentalidad
7	Cultura ciudadana
10	Ilegalidad

La enumeración mostrada en la tabla III va de unidad en unidad, pero las características 3,1, 3,2 y 3,3 como hacen parte de Administración Distrital, tienen una enumeración diferente a las demás, esto para enmarcarlos dentro del mismo conjunto.

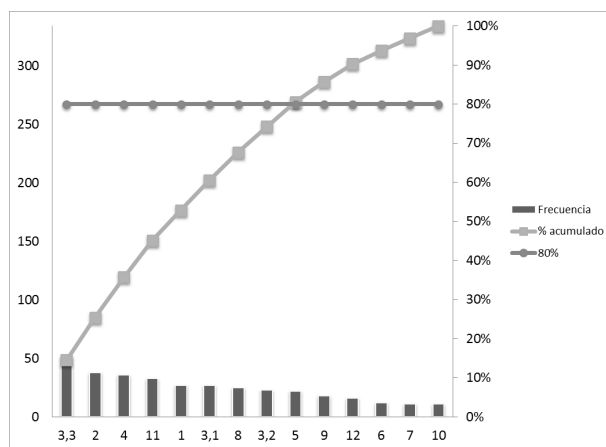
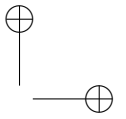
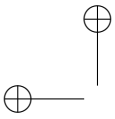


Figura 2. Diagrama de Pareto.

De los resultados ilustrados en la figura 2 se infiere que no se cumple la proporción del 80-20, lo que se traduce en que todas las problemáticas encontradas tienen igual importancia y por tanto no deben ser tratadas por separado, de allí se deduce la primera conclusión parcial y distinción con los trabajos realizados sobre la problemática de transporte en Bogotá D.C., ya que en dichos trabajos se encuentran priorizadas algunas características del sistema, pero nunca se han tenido en cuenta en su totalidad para obtener un análisis global de esta.

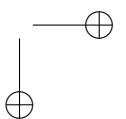
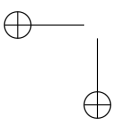


4.3. Diagrama causa–efecto

El desarrollo del diagrama causa efecto y el diagrama causal se basó en las características mostradas en la tabla 2. Se realizaron dos diagramas, uno general y uno específico que se muestran en las figuras 2 y 3 respectivamente; en estos diagramas se evidencian las relaciones existentes entre las diferentes variables consideradas en la investigación, en su construcción se tomó como base el pensamiento sistémico para evaluar las interacciones entre las variables [15].

Las variables que se identificaron para el diagrama causa-efecto son las siguientes:

- Planeación de movilidad: son todos aquellos modelos de planeación de movilidad que son usados por el Distrito para integrar el sistema de transporte en el sistema territorial, con el propósito de garantizar la accesibilidad física y financiera a todos los actores de la ciudad.
- Semaforización y señalización: hace referencia al aumento de semáforos y señales viales en la ciudad.
- Construcciones viales: es todo crecimiento de la red vial del sistema de transporte de Bogotá D.C.
- Mantenimiento: incluye los arreglos preventivos y correctivos a la maya vial de la ciudad.
- Infraestructura vial: la malla vial de Bogotá D.C. se encuentra constituida por dos subsistemas principales, el subsistema vial, conformado por la malla vial arterial, intermedia y local, y el subsistema de transporte que lo componen las troncales y Transmilenio. A fin de hacer referencia a las condiciones de las vías se usa un índice de condición de pavimento, el cual permite calificar la condición superficial de su estructura; este índice es conocido como el IPC, el cual clasifica el estado de la malla vial en vías en mal estado, regular estado y buen estado.
- Ilegalidad: hace referencia a la prestación del servicio de transporte, tanto colectivo como individual, por medios de transporte no autorizados por el Distrito.
- Parque automotor: hace referencia a la cantidad del parque automotor en la ciudad de Bogotá D.C.
- Congestión: está enlazado con el espacio ocupado por la cantidad de vehículos circundantes en la ciudad.
- Velocidad promedio: indica la media de velocidad con la que se transportan los bogotanos en la ciudad.
- Cultura ciudadana: existe una cultura ciudadana relacionada con aquellos comportamientos, tanto de conductores como de peatones que generan un espacio en donde se mantiene la eficiencia del transporte y la seguridad vial.
- Accidentalidad: se refiere a la cantidad de accidentes viales en la ciudad.



- Tiempo entre viajes: está relacionada con la velocidad promedio e indica el tiempo promedio que toma en realizar un desplazamiento en la ciudad.
- Tasa de ocupación vial: es la cantidad de vehículos que ocupan un área determinada de vías.
- Edad parque automotor: hace referencia a cuál es la edad promedio del parque automotor que influye directamente en la contaminación y en la renovación de la flota vehicular.
- Contaminación: es la cantidad de contaminación que aportan los carros y transporte público al ambiente.
- Calidad del transporte: hace referencia a los niveles de servicio en la prestación del servicio de transporte público y colectivo.

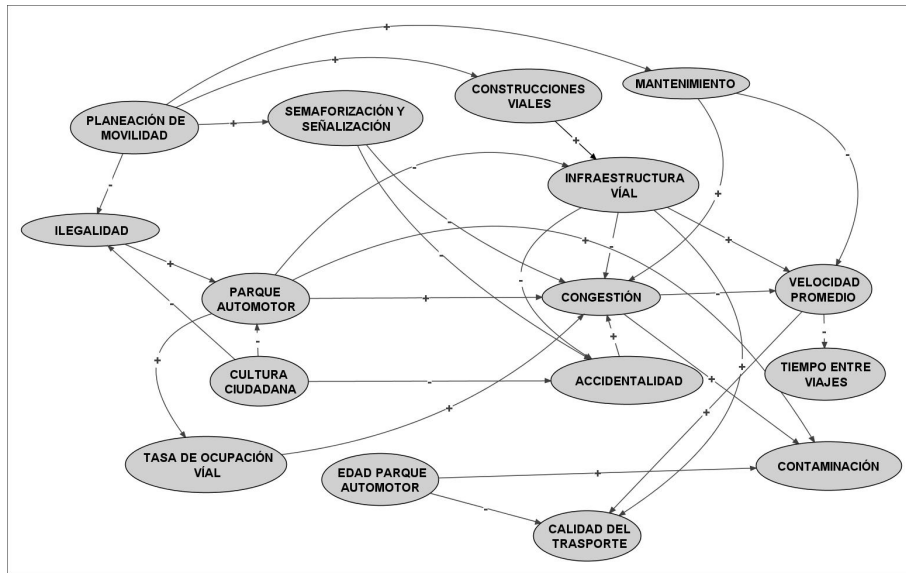


Figura 3. Diagrama general.

Como se puede observar en la figura 3, existen diferentes interacciones; así, podemos definir que el comportamiento de la planeación de movilidad influye directamente sobre cuatro variables: ilegalidad, semaforización y señalización, construcciones viales y por último el mantenimiento. El aumento de planeación de movilidad ocasiona un aumento en la semaforización y señalización ya que se estudian y analizan las intersecciones de la ciudad en donde se requieren estos elementos.

A su vez la semaforización está relacionada con dos variables, congestión y accidentalidad, a un aumento de la semaforización y señalización se obtiene una disminución de la congestión en tanto que la función de estos es solucionar problemas de espera en la malla vial y de flujo vehicular dentro de la misma, un aumento en la congestión genera un aumento en la contaminación a causa de que las emisiones de monóxido de carbono se producen en mayor nivel antes de los 30 km/h [16]; por su parte, un aumento en la congestión conduce a una disminución de la velocidad promedio provocada por la condición de saturación que sufren

los automóviles por un exceso de demanda de vías, lo que lleva finalmente a que por aumentos de velocidad promedio se generen reducciones en los tiempos de viaje, ya que representan el tiempo que tarda un sujeto entre su origen y destino, y al tener aumentos de la velocidad promedio estos tiempos disminuyen.

Por otra parte, un aumento en la señalización y semaforización contribuye a una disminución en las tasas de accidentalidad, ya que como se mencionó anteriormente la semaforización se encarga de regular los flujos de vehículos, al ser estos flujos controlados se reduce la probabilidad de accidente. Finalmente, al presentarse un aumento de las tasas de accidentalidad producen un aumento en la congestión a causa de que los accidentes en las vías de tránsito conducen a una utilización de espacio, por lo que se reduce la capacidad de la vía [17].

El aumento en la planeación de movilidad crea un aumento en las construcciones de malla vial y un aumento también de su mantenimiento, lo cual sucede porque al tener una buena planeación se analizan los requerimientos de espacio y necesidades específicas de mantenimiento de la infraestructura vial en la ciudad. A su vez, cuando aumentan las construcciones y los mantenimientos se presenta una mayor y adecuada infraestructura que se adecúa a los requerimientos de la demanda de transporte, además de esto al haber aumentos en la infraestructura vial se disminuyen los accidentes, pues una de sus causas es el estado de la malla vial [18]. Un aumento de los mantenimientos viales genera aumento en la congestión vial debido al proceso que se le hace a la vía, mientras se encuentra en mantenimiento el tramo está fuera de operación, reduciéndose la capacidad de la vía, es por ende que la velocidad promedio se disminuye.

La última relación que se puede encontrar con la planeación de la movilidad es la ilegalidad, un aumento en la planeación lleva a la disminución de la ilegalidad, a causa de que si se tiene una buena planeación se puede llegar a la totalidad de la población para que esta no se vea desamparada por el sistema de movilidad. Por su parte y como es lógico, el transporte ilegal hace que el parque automotor aumente debido a que dicho transporte rueda por las vías de la ciudad, a su vez el parque automotor tiene influencia sobre cuatro variables: contaminación, tasa de ocupación vial, infraestructura vial y congestión; en la primera de ella con el aumento del parque automotor se presenta aumento en las emisiones que se realizan al ambiente y por ende a la contaminación.

Cuando se incrementa el parque automotor aumenta la tasa de ocupación vial, puesto que la capacidad de las vías se mantiene y a su vez los vehículos aumentan, lo que provoca un aumento en la tasa de ocupación vial. Finalmente se puede concluir que un aumento de la tasa de ocupación vial genera un aumento en la congestión por que la cantidad de carros circulante aumenta, además el aumento de la congestión también se ve expresado por el aumento del parque automotor, debido a que las capacidades viales se utilizan en mayor porcentaje. Por último, al aumento del parque automotor se presenta una reducción en la infraestructura vial, ya que esta sufre mayor deterioro por el paso de mayor cantidad de vehículos.

Por su parte, existe la cultura ciudadana que influencia tres variables más: ilegalidad, parque automotor y accidentalidad. A un aumento de la cultura ciudadana se obtiene una disminución de las tasas de accidentalidad, pues estas se presentan en mayor medida por imprudencias de los conductores y peatones. Además de lo anterior, el aumento de la cultura ciudadana ocasiona una disminución en la ilegalidad ya que la gente usa los sistemas legales y permitidos

para transportarse. Por último, el aumento en la cultura ciudadana disminuye el parque automotor circulante en tanto se tienen hechos culturales, como compartir el carro para que se transporten más personas en un solo vehículo.

El aumento en la edad del parque automotor origina mayor contaminación a causa de los procesos de quema de combustible que sufren los carros con años de antigüedad, además a mayor edad del parque automotor se produce una reducción en la calidad del transporte ocasionado por factores de percepción de las personas transportadas y a la vida útil de los automóviles de servicio de transporte público; a su vez, la calidad del transporte público es influenciada por la velocidad promedio, un aumento en la velocidad promedio genera aumento en la calidad del transporte público, puesto que la velocidad es el factor primordial en las necesidades de movilización de pasajeros.

En la construcción del diagrama causal mostrado en la figura 4, se tuvieron en cuenta los siguientes subsistemas:

- Compra de automóviles
- Parque automotor
- Motocicletas
- Taxis
- Transporte público colectivo
- Calidad del transporte
- Ordenamiento territorial
- Accidentalidad
- Estructura institucional
- Congestión vial
- Modelo empresarial
- Ilegalidad
- Tasa de ocupación vial
- Desintegración del sistema
- Sobreoferta
- Integración vial

De los anteriores diagramas se puede concluir que las relaciones entre variables no son lineales, por lo que la simulación con Dinámica de Sistemas se convierte en una herramienta adecuada para abordar esta problemática; aunado a lo anterior, el sistema presenta un gran nivel de complejidad a causa de la alta interacción entre variables.

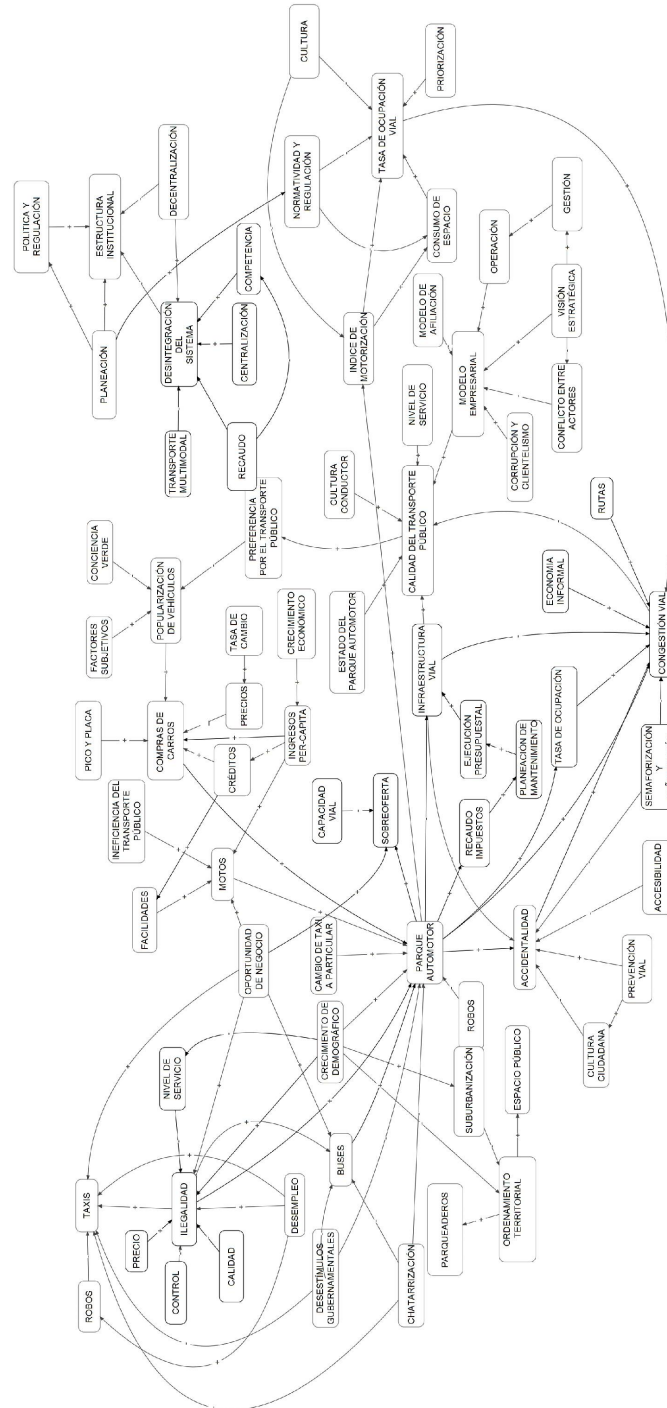


Figura 4. Diagrama específico.

4.4. Modelo de simulación

Para el desarrollo del modelo de simulación se utilizaron trece sectores que representan la simulación dinámica del sistema de transporte de Bogotá D.C., el modelo de simulación se construyó con base en el software I-Think, el cual permite realizar las relaciones existentes entre las variables. Los sectores que se utilizaron para la simulación son:

- Porcentajes de ocupación por modo
- Indicadores de consumo por modo
- Velocidad promedio
- Congestión vial
- Velocidad promedio Transmilenio
- Accidentalidad
- Calidad Transmilenio
- Calidad transporte público colectivo
- Subsistema vial
- Parque automotor motocicletas
- Parque automotor privado
- Parque automotor transporte público individual
- Parque automotor transporte público colectivo

Los datos utilizados para la simulación provienen de la Secretaria de Movilidad, por tanto tienen un alto nivel de confianza para el análisis respectivo. En la figura 5 se muestra uno de los sectores de la simulación construida (para conocer el modelo completo se recomienda revisar la tesis de pregrado Evaluación de la problemática de transporte en Bogotá D.C., utilizando Dinámica de Sistemas, Universidad Distrital Francisco José de caldas); en este diagrama se ilustra el sector usando un diagrama de Forrester [19], representando así las variables: flujos, tasas y las interacciones entre las distintas variables.

Para el desarrollo del modelo del parque automotor del transporte público colectivo urbano se tuvieron en cuenta una serie de características que determinaron su estructura, las características tenidas en cuenta se mencionan a continuación:

- Los procesos de chatarrización y reinsertión
- Edad promedio del parque automotor
- Ilegalidad
- Pico Placa, normal y ambiental

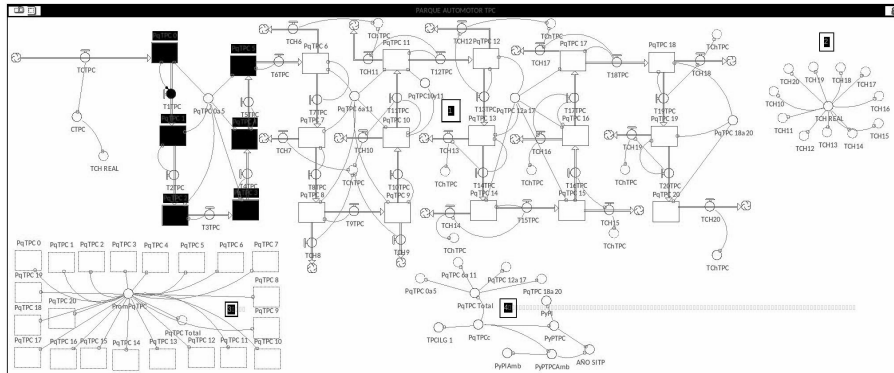


Figura 5. Diagrama de Forrester parque automotor del transporte público.

Sobre la base de lo anterior, el parque automotor se considera como un nivel que se drena por el número de buses que se chatarrizan y que aumenta con el número de buses que son reintegrados. Es importante mencionar que este gran nivel que contiene a todos los buses, busetas y colectivos se desagregó en varios niveles con el fin de conocer el número de vehículos por rango de edad, lo que implicó realizar un modelo de transición de años.

Los buses transitan de un nivel a otro, en otras palabras, incrementen un año por cada paso de la simulación, esta representación se realizó porque era necesario conocer la edad promedio de los vehículos y la cantidad de vehículos candidatos a ser chatarrizados (veinte años o mayores).

En la representación se establece cuatro secciones, la primera y más grande corresponde a los niveles del parque automotor; la segunda que encierra una serie de variables auxiliares en donde se calcula la tasa de chatarrización real; la tercera que se halla representada por todos los niveles y sirve para el cálculo de la edad promedio del parque automotor; y la cuarta en la que se calcula la tasa de vehículos circulantes. En la primera se relacionan cuatro tipos de elementos. Los niveles son la cantidad de vehículos por rango de edad y están identificados por PqTPC #, donde # señala la edad; las tasas de transición de un año a otro, representadas por T#TPC, donde # es el año en el cual transitan los vehículos.

A fin de realizar los análisis de la información suministrada se tuvieron en cuenta las relaciones entre las variables, para así tener en cuenta la dinámica del sistema de transporte junto con técnicas estadísticas, con el propósito de obtener relaciones entre variables.

4.5. Análisis de políticas

Una vez realizados los análisis correspondientes y el modelo de simulación de los puntos anteriores, se procede a evaluar sobre este modelo diferentes políticas que han sido señaladas por los expertos consultados como la solución a la problemática de transportes, las políticas evaluadas son las siguientes:

- Escenario tendencial: consiste en analizar las condiciones del sistema actual de transporte si no se realiza ningún cambio en el mismo.

- Sistema integrado de transporte: representa la implementación total del sistema integrado de transporte sin metro.
- Sistema integrado de transporte con metro: consiste en la implementación del sistema integrado de transporte con metro.
- Malla vial: evalúa la recuperación de la malla vial y el crecimiento de esta.
- Escenario utópico: es la reunión de todas las soluciones anteriormente mencionadas.

Los supuestos utilizados en la simulación son los siguientes:

- La cantidad de vehículos circundantes por reglamentación distrital son 12300.
- En los escenarios del sistema integrado y sistema integrado con metro existe un cambio modal del 20 % y 30 % respectivamente, lo cual representa la cantidad de personas que dejan de utilizar transporte individual para usar el transporte colectivo.
- El escenario de malla vial contempla mejoras del 10 %, 20 %, 30 % y 40 % para evaluar el impacto en la velocidad promedio, estas mejoras indican que las vías que se hallan en mal estado, pasan a ser buenas a una tasa diferente a la regular.

Para analizar los resultados de las políticas se tomó como medida de desempeño la velocidad promedio, ya que es la medida directamente relacionada con el tiempo de los viajes y desplazamientos en el sistema de transporte de la ciudad. En las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se muestran los resultados arrojados por el software con respecto al desempeño de la velocidad promedio con el paso del tiempo; junto a estas figuras, en las tablas IV, V, VI, VII y VIII se muestran los resultados arrojados por cada escenario, en las tablas se expone una simulación realizada hacia el año 2030 en donde se contrastan los resultados del indicador en el año 2010 versus el mismo indicador en el año 2030. Los indicadores que se contrastan son: velocidad promedio, parque automotor circulante, porcentaje de pasajeros transportados por modo de transporte y el aporte a congestión por modo de transporte. En el escenario de malla vial se presenta el resultado de la mejora de la malla vial junto con el resultado de la velocidad promedio en el año 2030.

Tabla IV. Resultados escenario tendencial

Media	Valor
Velocidad promedio 2010	20,70 Km/h
Velocidad promedio 2030	19,52 Km/h
Parque automotor circulante 2010	722,952
Parque automotor circulante 2030	890,686
% transportado por motos 2010	5,43
% transportado por motos 2030	7,92
% transportado por carros 2010	30,16
% transportado por carros 2030	20,87

% transportado por transmilenio 2010	14,34
% transportado por transmilenio 2030	28,2
% transportado por buses 2010	46,19
% transportado por buses 2030	41,19
% transportado por taxis 2010	3,87
% transportado por taxis 2030	1,84
% aporte a congestión carros 2030	79,73
% aporte a congestión motos 2030	14,36
% aporte a congestión buses 2030	2,58
% aporte a congestión taxis 2030	3,34

Tabla V. Resultados escenario sistema integrado sin metro

Media	Valor
Velocidad promedio 2010	20,82 Km/h
Velocidad promedio 2030	17,95 Km/h
Parque automotor circulante 2010	722,952
Parque automotor circulante 2030	1,047,866
% transportado por motos 2010	5,77
% transportado por motos 2030	7,59
% transportado por carros 2010	32,04
% transportado por carros 2030	23,53
% transportado por transmilenio 2010	15,23
% transportado por transmilenio 2030	27,02
% transportado por buses 2010	42,84
% transportado por buses 2030	40,11
% transportado por taxis 2010	4,11
% transportado por taxis 2030	1,76
% aporte a congestión carros 2030	82,23
% aporte a congestión motos 2030	12,59
% aporte a congestión buses 2030	2,26
% aporte a congestión taxis 2030	2,93

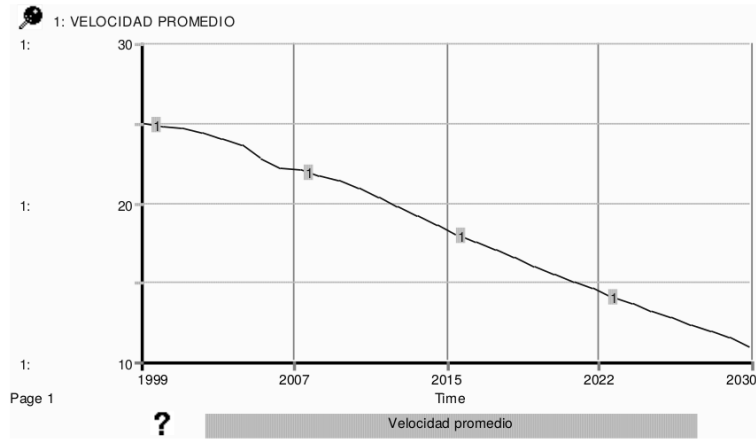


Figura 6. Velocidad promedio escenario tendencial.

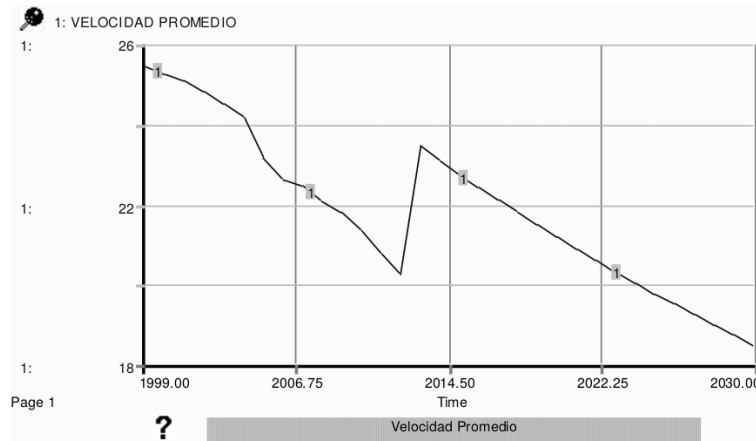


Figura 7. Velocidad promedio sistema integrado de transporte sin metro.

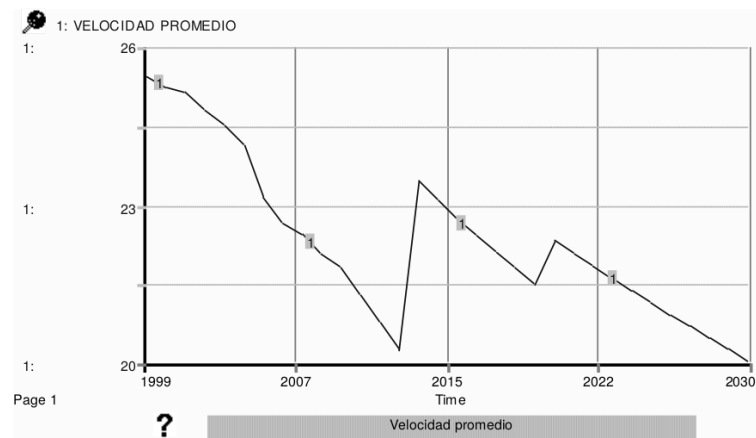


Figura 8. Velocidad promedio sistema integrado de transporte con metro.

Tabla VI. Resultados escenario sistema integrado con metro

Media	Valor
Velocidad promedio 2010	20,77 Km/h
Velocidad promedio 2030	19,52 Km/h
Parque automotor circulante 2010	722,952
Parque automotor circulante 2030	890,686
% transportado por motos 2010	5,43
% transportado por motos 2030	7,92
% transportado por carros 2010	30,16
% transportado por carros 2030	20,87
% transportado por transmilenio 2010	14,34
% transportado por transmilenio 2030	28,2
% transportado por buses 2010	46,19
% transportado por buses 2030	41,19
% transportado por taxis 2010	3,87
% transportado por taxis 2030	1,84
% aporte a congestión carros 2030	79,73
% aporte a congestión motos 2030	14,36
% aporte a congestión buses 2030	2,58
% aporte a congestión taxis 2030	3,34

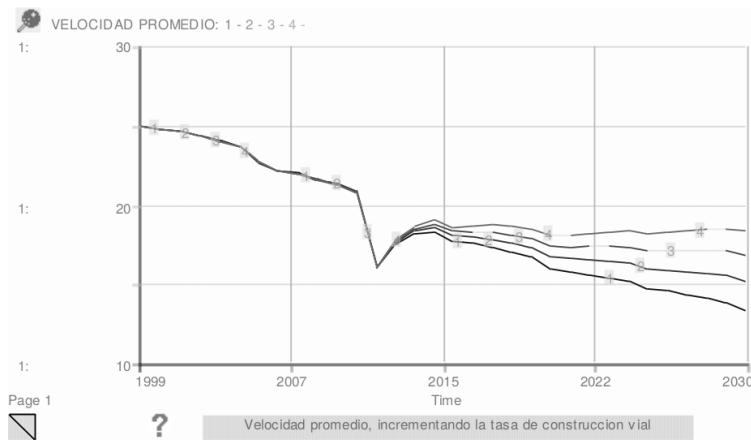


Figura 9. Velocidad promedio mejoramiento de la malla vial.

Tabla VII. Resultados escenario mejoramiento de la malla vial

Media	Valor
Velocidad promedio 2030 incremento 10 % malla vial	13 km/h
Velocidad promedio 2030 incremento 20 % malla vial	15 km/h
Velocidad promedio 2030 incremento 30 % malla vial	17 km/h
Velocidad promedio 2030 incremento 40 % malla vial	18 km/h
Malla vial buena 2010	5237 km
Malla vial buena 2030	18463 km
Malla vial regular 2010	3364 km
Malla vial regular 2030	2281 km
Malla vial mala 2010	6322 km
Malla vial mala 2030	1105 km

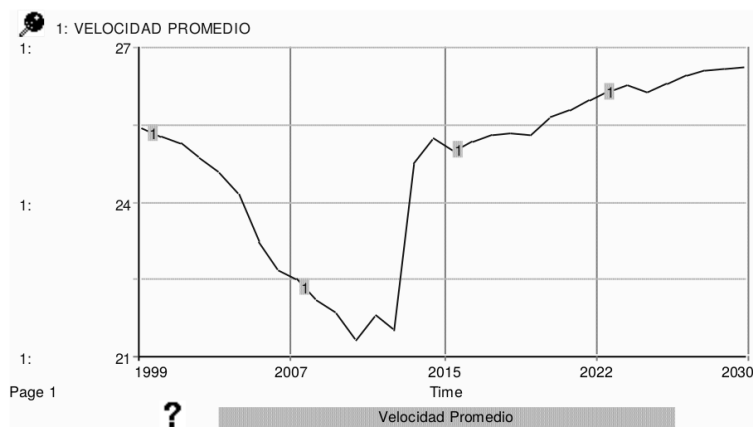


Figura 10. Velocidad promedio escenario utópico.

Tabla VIII. Resultados escenario utópico

Media	Valor
Velocidad promedio 2030 incremento 10 % malla vial	20,78 km/h
Velocidad promedio 2030 incremento 20 % malla vial	26,11 km/h
Velocidad promedio 2030 incremento 30 % malla vial	722,952
Velocidad promedio 2030 incremento 40 % malla vial	556,678
Malla vial buena 2010	5,5
Malla vial buena 2030	6,51
Malla vial regular 2010	30,51
Malla vial regular 2030	28,62

Malla vial mala 2010	14,5
Malla vial mala 2030	32,2
% transportado por buses 2010	45,58
% transportado por buses 2030	40,16
% transportado por taxis 2010	3,92
% transportado por taxis 2030	1,51
% aporte a congestión carros 2030	71,08
% aporte a congestión motos 2030	20,48
% aporte a congestión buses 2030	3,67
% aporte a congestión taxis 2030	4,77

Teniendo en cuenta los resultados ilustrados en las figuras 6 a 9 se puede concluir que ninguna de las medidas implementadas tiene una influencia sobre la velocidad promedio continua en el tiempo, mostrando así que ninguna medida ejecutada por separado soluciona el problema de manera definitiva.

En la figura 6 se observa cómo disminuye la velocidad con el paso del tiempo ya que no existe ningún tipo de intervención para la regulación del uso del transporte público y para el cambio modal hacia el sistema integrado, se puede observar en los resultados mostrados en la tabla IV que el mayor aporte a la congestión se produce por el uso del automóvil al tener un valor cercano al 90

En las figuras 7 y 8 se observa la implementación del sistema integrado de transporte público sin y con metro respectivamente, lo que se puede evidenciar es que se presentan unos incrementos o mejoras sustanciales pero no perduran en el tiempo, lo cual se debe a la implementación de las medidas que tienen un impacto en la percepción y el uso modal, pero con el paso del tiempo no es suficiente y el sistema tiende a bajar nuevamente; como se puede observar en las tablas V y VI, existe una mejora en el indicador de velocidad promedio en comparación con el escenario anterior, también hay un cambio del modo vial, es decir, el porcentaje de pasajeros transportados en automóvil es menor, sin embargo este cambio no es significativo para el sistema y el porcentaje de personas que usan vehículo privado es mayor.

En la figura 9 se puede ver el mejoramiento en la velocidad promedio dependiendo de las mejoras en la malla vial, si estas aumentan en un 10 %, 20 %, 30 % y 40 % respectivamente; pero al igual que las medidas anteriores estas mejoras no perduran en el tiempo, de la misma forma que se muestra en la tabla VII ya que se observa cómo se dan las mejoras de la maya vial en el tiempo pero las velocidades no perduran.

De manera contraria en la figura 10, se muestra cómo en el escenario utópico la velocidad promedio mejora con el paso del tiempo, lo que demuestra que para solucionar una problemática social es necesario tener en cuenta todos los factores y no realizar un análisis separado de los mismos; así, se puede ver en la tabla VIII que el indicador de velocidad promedio al final de la simulación tiene una tendencia de crecimiento y el porcentaje de aporte

a la congestión por parte de los carros es cercano al 70 %, que es el mayor valor de todas los escenarios que se tuvieron en cuenta.

5. Conclusiones

Con el desarrollo de la presente investigación se puede mostrar la aplicación de un modelo dinámico para la estudio y evaluación de un fenómeno social, para este caso específico se abordó la temática de transporte en la ciudad de Bogotá D.C., con la obtención del modelo se pueden analizar las condiciones del sistema de transporte, además este modelo permite tener medidas cuantitativas, las cuales no son usadas frecuentemente en los sistemas sociales. El uso de este tipo de metodología para la caracterización de sistemas involucra una serie de dificultades inmersas en el comportamiento de los sistemas sociales, que se reflejan en el número de variables, el número de relaciones y el tipo de relaciones que crean. Con respecto a la metodología utilizada se puede concluir lo siguiente:

- En el proceso de recolección de información de expertos se pueden encontrar contradicciones respecto a temáticas específicas, y al no contar con modelos matemáticos que ayuden a su interpretación, no se puede dar acierto a alguna de dichas opiniones, es por tanto que con este tipo de investigaciones es viable proporcionar medidas numéricas que ayuden a resolver dichas discrepancias.
- Al realizar el diagrama de Pareto se encontró que no se podía demostrar el 80-20 planteado por este principio, por lo que se concluye que todas las características planteadas que describen la problemática tienen igual grado de impacto sobre el sistema de movilidad.
- Se puede concluir que es imposible tener una visión lineal de las causas de la problemática referente a esta investigación, debido a que al realizar el diagrama de causa-efecto se encontraron algunas causas principales, que a su vez eran causas que explicaban otras causas principales.
- El diagrama causal permite la búsqueda de las relaciones de las diferentes variables. Es importante señalar que la complejidad de un sistema no se mide exclusivamente por el número de variables, sino por el número de interrelaciones que tiene dicho sistema, razón por la cual es indispensable utilizar este acercamiento con fin de entender el sistema.

La implementación de un modelo matemático de simulación continua permite diagnosticar las situaciones futuras y se constituye en una herramienta que sirve para la toma de decisiones, además en este modelo se simuló seis diferentes escenarios para verificar el impacto en las políticas sobre el sistema; en estos escenarios se muestra la evolución de las condiciones del transporte en Bogotá D.C. a través del tiempo.

Con el análisis de escenarios se puede concluir lo siguiente:

- En todos los escenarios se muestra una mejora en el indicador principal (velocidad promedio), esto demuestra que el problema del transporte público en Bogotá D.C. es un problema de capacidades, el cual debe ser analizado desde la capacidad requerida, las personas transportadas y la capacidad disponible.
- La solución que se implante al sistema de movilidad tiene que contemplarse dentro de los campos de capacidad requerida y capacidad disponible.
- Por último se puede señalar que el escenario utópico, que reúne todas las políticas, es el único que trae mejoras al sistema perdurables en el tiempo, es por tanto que no se pueden dar veredictos sobre las demás políticas puesto que estas solo traen beneficios en periodos cortos de tiempo, por lo que se hace indispensable establecer estrategias que involucren a todo el sistema sin centrarse demasiado en cosas específicas.

Por último cabe resaltar que existen factores socioculturales, económicos y políticos que deben resolverse con el fin de promover medidas que impacten positivamente en el transporte, y algo aún más importante, que los beneficios que traigan se mantengan en el tiempo.

Como trabajos de investigación futuros existen escenarios que no se tuvieron en cuenta en el modelo de simulación como el uso de medios de transporte alternativos (bicicletas y otros medios alternos), ampliaciones viales, comportamientos de los peatones en el uso de medios de transporte y el creciente fenómeno del aumento de las motocicletas. También se pudieron observar comportamientos de los resultados de la malla vial que podrían ser simulados mediante cadenas de Markov.

Referencias

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, informe sobre Desarrollo Humano, Superando barreras: Movilidad y desarrollo humano, 2009, disponible en <http://hdr.undp.org>
- [2] Germán Lleras, "Transmilenio y el transporte colectivo tradicional, una relación incierta". Revista de Ingeniería, 21, junio 2005, pp. 84-93.
- [3] Jay Forrester, World Dynamics. Wright-Allen Press, Massachusetts, Estados Unidos, 1971, 15.
- [4] Germán Méndez y Lindsay Álvarez, Diseño de prototipo diagnóstico para la pequeña y mediana empresa, pyme. Nomos, Bogotá D.C., Colombia, 2004, pp. 21-32.
- [5] Indra Khanna, N. Singh y Prem Vatt, "System dynamics in urban transportation planning and policy analysis". Proceedings Keystone CO USA, 1986, pp. 453-462.
- [6] Khaled Abbas, "The use of system dynamics in modelling transportation systems with respect to new cities in Egypt". 8th International conference of the Systems Dynamics Society, Chesnut Hill, Massachusetts, Estados Unidos, 1990, pp. 16-30
- [7] Jifeng Wang, Huapu Lu y Hu Peng, "System Dynamics model of urban transportation system and its applications". Journal of Transportation Systems engineering and information technology, 8, 3, junio 2008, pp. 83-89.
- [8] Hossein Haghshenas, Manouchehr Vaziri y Ashkan Gholamialam, "Evaluation of sustainable policy in urban transportation using system dynamics and world cities data: A case study in Isfahan". Cities, in Press, noviembre 2014.

- [9] J.-H. Lew, L. F. Hivin y D.N. Mavris, "A multi-paradigm approach to system dynamics modeling of intercity transportation". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, noviembre 2014, pp. 188-202.
- [10] Yang Yang, Peitong Zhang y Shaoquan Ni, "Assessment of the impacts of urban rail transit on metropolitan regions using systems dynamics model". *Transportation Research Proceedings*, 4, mayo 2014, pp. 521-534.
- [11] Edgar Duarte, "El transporte público colectivo en Bogotá D.C.: una mirada desde la Dinámica de Sistemas". *Ingeniería*, 16, 2, noviembre 2011, pp. 18-34.
- [12] J. Orozco, F. Arenas, "Aproximación al desarrollo de un sistema de transporte masivo a través de la Dinámica de Sistemas". *Revista S&T*, 11, 24, mayo 2013, pp. 91-106.
- [13] Martin Schaffernicht, *Aplicación del análisis de sistemas a las ciudades y al transporte público urbano, innovación ambiental de servicios urbanos y de infraestructura: hacia una economía baja en carbono*. Comisión económica para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile, Chile, 2012, pp. 9-102.
- [14] Diagrama de Pareto, Dirección nacional de servicios académicos virtuales, Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2010, disponible en <http://www.virtual.unal.edu.co>
- [15] G. Levaggi, *La teoría general de los sistemas*. 2, Ugerman, Tucumán México, 2007, pp. 20-171.
- [16] J. Arango, "Calidad de los combustibles en Colombia". *Revista de Ingeniería*, 29, mayo 2009, pp. 100-108.
- [17] Ian Thomson, Alberto Bull, "La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales". *Revista de la CEPAL*, 16, abril 2002, 109-121.
- [18] Observatorio de Movilidad, *Boletín de accidentalidad vial*, Boletín No 2, 2004, disponible en http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/audio_y_video/boletin%20de%20cifras%2011-07-2012.pdf
- [19] Jay Forrester, *Industrial dynamics*. Wright-Allen Press, Massachusetts Estados Unidos, 1961, pp. 40-52.
- [20] Javier Aracil, *Dinámica de sistemas*. Isdefe, Madrid España, 1995, pp. 21-49.

Carlos Franco Franco

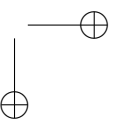
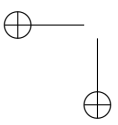
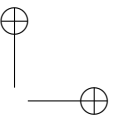
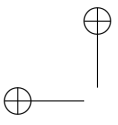
Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como profesor en el área de investigación de operaciones y logística en la Universidad Distrital Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, y pertenece como investigador al grupo Grupo de Investigación en Gestión Industrial (GEGI).
e-mail: cafranco@ucatolica.edu.co

Germán Andrés Méndez Giraldo

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad de los Andes de Bogotá, Colombia, 1998. Obtuvo su Doctorado en Ciencias Técnicas en la Universidad de las Villas, Santa Clara, Cuba, 1999. Se desempeñó como Jefe de Producción en industrias nacionales y multinacionales, Gerente y Coordinador de proyectos. Consultor y asesor empresarial. Es profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital desde 1995 y se ha desempeñado en diversos cargos dentro de la Institución como coordinador de la Especialización en Ingeniería de Producción, de la Maestría en Ingeniería Industrial, fue Jefe de la Oficina de Relaciones Interinstitucionales y Vicerrector Administrativo y financiero de la Universidad Distrital. Actualmente se desempeña como profesor en el área de investigación de operaciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, y pertenece como investigador y director del grupo Sistemas Expertos y Simulación donde realiza estudios sobre sistemas expertos, dinámica de sistemas y optimización.
e-mail: gmendez@udistrital.edu.co

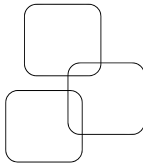
John Espitia

Es Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Actualmente se desempeña como consultor independiente.
e-mail: jaerjr@gmail.com



Citación: J. S. Patiño-Callejas, K. J. Espinosa-Ayala y J. C. Figueroa-García. (2015). An approach for solving Goal Programming problems using Interval Type-2 Fuzzy goals. En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 233–244
© Los autores. Titular de los derechos de reproducción: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.2.a04>

Artículo de Investigación



Juan Sebastian Patiño-Callejas
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
juansebastianpatinoc@gmail.com

Krisna Yoel Espinosa-Ayala
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
joespinosa1018@gmail.com

Juan Carlos Figueroa-García
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jcfigueroag@udistrital.edu.co



An approach for solving Goal Programming problems using Interval Type-2 Fuzzy goals

Un enfoque para resolver problemas de programación por metas utilizando metas difusas de intervalo tipo 2

Abstract

This paper presents a proposal for solving goal problems involving multiple experts opinions and perceptions. In goal programming problems where no statistical data about their goals exist, the use of information coming from experts becomes the last reliable source. This way, we propose an approach to model this kind of goals using Interval Type-2 fuzzy sets, and a simple method for finding an optimal solution based on previous methods that have been proposed for classical fuzzy sets.

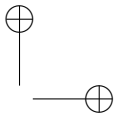
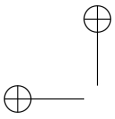
Key words: Fuzzy linear programming, Interval Type-2 Fuzzy sets, Goal programming.

Resumen

Este trabajo presenta un acercamiento a la solución de problemas de programación por metas que incluyen la opinión y percepción de múltiples expertos. En problemas de metas que no tienen información estadística adecuada para definir los valores meta, el uso de información proveniente de expertos se convierte en la última fuente confiable de información. Así pues, proponemos una aproximación al modelado de este tipo de problemas utilizando conjuntos difusos de Intervalo Tipo-2, y un método sencillo para encontrar soluciones usando métodos propuestos por otros autores para conjuntos difusos clásicos.

Palabras claves: Programación lineal difusa, Conjuntos difusos Tipo-2 de intervalo, Programación por metas.

Recibido: 24-03-2015
Modificado: 17-06-2015
Aceptado: 08-08-2015



1 Introduction

Decision making in practical applications faces multiple issues, including human being interaction and social behavior. Some problems are built over the base of having multiple goals involving multiple experts that try to solve the same problem with different objectives. To solve this kind of situations, goal programming provides a first tool to find crisp solutions.

To handle the problem of having both multiple experts and uncertainty around the exact value of a desired goal, fuzzy sets appear as a useful tool for handling numerical uncertainty coming from experts. Fuzzy goal programming has been proposed by Narasimhan [15], and later developed by Yang [20], Turgay & Taşkın [18], Li & Gang [12], Hu, Zhang & Wang [9], Khalili-Damghani & Sadi-Nezhad [10], in both theoretical and practical situations.

In decision making, Qin & Liu [17], Zhang & Zhang [21], and Chen & Ting [4] have already used Type-2 fuzzy systems to handle uncertainty coming from multiple experts, so its use in goal programming seems to be feasible.

Based on the model of Narasimhan [15], Yang [20] has proposed a model with fewer variables which obtains the same solution, so what we propose in this paper is to extend their results to a case where multiple experts deal with multiple goals by using Interval Type-2 fuzzy sets to handle linguistic/numerical uncertainty coming from experts and Linear Programming (LP) methods for handling goal programming.

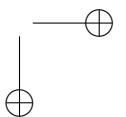
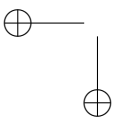
The paper is organized as follows: Section 1 introduces the main problem. Section 2 presents some basics on fuzzy sets. In Section 3, goal programming LP model is referred. Section 4 presents the Yang [20] proposal for fuzzy goal programming. Section 5 contains the proposal; Section 6 shows an application example; and finally Section 7 presents the concluding remarks of the study.

2 Basic on Fuzzy sets

According to Klir & Yuan [11], the membership function of a fuzzy set A is denoted by $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$. \mathcal{P} is the class of all crisp sets, \mathcal{F}_1 is the class of all fuzzy sets, and \mathcal{F}_2 is the class of all Type-2 fuzzy sets.

2.1 Interval Type-2 Fuzzy Sets (IT2FS)

In general, a Type-2 fuzzy set is simply a function that transforms a set A into the set of fuzzy sets defined over $[0, 1]$, this is $\tilde{A} : X \rightarrow \mathbf{F}[0, 1]$, where $\mathbf{F}[0, 1]$ is also known as the secondary membership function of \tilde{A} . An Interval Type-2 Fuzzy set (see Mendel [13]) is an ordered pair $\{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X\}$, where A is a linguistic label \tilde{A} that represents uncertainty about the



word A . Its mathematical definition is:

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= (x, \mu_{\tilde{A}}(x)) : x \in X \\ \tilde{A} &= \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u), J_x \subseteq [0, 1] \end{aligned} \tag{1}$$

where $u \in J_x \subseteq [0, 1]$ is the domain of uncertainty around A .

Alternatively, an IT2FS can be fully characterized using two primary membership functions: *Lower Membership function (LMF)* and *Upper Membership Function (UMF)* in which are contained all embedded fuzzy sets A_e which composes the *Footprint of Uncertainty (FOU)*. Although there are other notations to refer to IT2FSs (see Mendel [14], Türksen [19], and Pagola et al. [16]) who recognize equivalences between Mendel and mathematical standard set notations, we use Mendel notations (see Mendel [13]) due to its interpretability and completeness.

2.2 Why Fuzzy Sets?

The main reason for using fuzzy sets is its ability to handle uncertainty coming from human perceptions, which is a common issue in decision making. On the other hand (numerical uncertainty), fuzzy sets can handle imprecision about X which commonly appears when no historical/statistical data is available, so the estimation of the parameters of the problem is based on approximate information coming from the experts of the problem.

3 Goal programming

The basic goal programming model proposed by Charnes, Cooper & Wagner [1], [2] tries to minimize deviations from different goals (desired objectives) through minimizing the absolute deviations d_k of the constraints of the problem $A_k x$ regarding its desired value (a.k.a goal) B_k in the format $\min\{D = \sum_{k=1}^n |A_k x - B_k|\}$. This model is equivalent to the following LP model (see Charnes, Cooper & Wagner [1], [2]):

$$\begin{aligned} \min D &= \sum_{k=1}^n d_{k1} + d_{k2} \\ &s.t. \\ A_k x + d_{k1} - d_{k2} &= B_k, \\ A'_k x &\leq B'_k \\ x, d_{k1}, d_{k2} &\geq 0; \forall k \in \mathbb{N}, \end{aligned} \tag{2}$$

where $B_k \in \mathbb{R}$ is the aspiration level, $d_{k1}, d_{k2} \in \mathbb{R}$ are negative and positive deviations from the goal B_k , A_k is the set of n constraints related to goals, A'_k is a set of crisp constraints of the problem, B'_k is its set of boundaries, and $x \in \mathbb{R}^m$ is the set of decision variables of the problem. A negative deviation quantifies a lack of satisfaction of the desired aspiration level, and a positive deviation quantifies an excess over the desired aspiration level.

4 Fuzzy Goal Programming

Although the first fuzzy goal programming has been proposed by Narasimhan [15], Narasimhan & Hanna [7], Yang [20] has proposed a model with fewer variables which obtains the same solution of [7], [15]. Yang's proposal starts by defining the membership function of the fuzzy goal B_k namely μ_{B_k} , as follows:

$$\mu_{B_k} = \begin{cases} 1 - \frac{G_k(x) - b_k}{b_{k2}}, & \text{if } b_k \leq G_k(x) \leq b_k + b_{k2}, \\ 1, & \text{if } G_k(x) = b_k, \\ 1 - \frac{b_k - G_k(x)}{b_{k1}}, & \text{if } b_k - b_{k1} \leq G_k(x) \leq b_k, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

where $k \in \mathbb{N}$ denotes the k_{th} goal, $G_k(x)$ is the k_{th} constraint to be fulfilled, $b_k \in \mathbb{R}$ is the aspiration level of the k_{th} goal, and d_{k1} and d_{k2} are the maximum negative and positive deviations from b_k , respectively. Its LP model is

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{k=1}^n d_{k1} + d_{k2} \\ \text{s.t.} \quad & A_k x + d_{k1} - d_{k2} \cong \tilde{B}_k, \\ & A'_k x \leq B'_k \\ & x, d_{k1}, d_{k2} \geq 0; \forall k \in \mathbb{N}, \end{aligned} \quad (4)$$

where $\tilde{B}_k \in \mathcal{F}_1$ the fuzzy aspiration level, $d_{k1}, d_{k2} \in \mathbb{R}$ are negative and positive deviations from the goal b_k , A_k is the set of n constraints related to fuzzy goals, A'_k is a set of crisp constraints of the problem, B'_k is its set of boundaries, and $x \in \mathbb{R}^m$ is the set of decision variables of the problem.

Finally, the proposal of Yang [20] is based on a simpler LP model in which $G(x) \equiv A_k x$, as follows:

$$\begin{aligned} \max \quad & \lambda \\ \text{s.t.} \quad & \lambda \leq 1 - \frac{A_k x - b_k}{b_{k2}}, \quad \forall k \in \mathbb{N} \\ & \lambda \leq 1 - \frac{b_k - A_k x}{b_{k1}}, \quad \forall k \in \mathbb{N} \\ & A'_k x \leq B'_k \\ & \lambda \in [0, 1], x \geq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

where $\lambda \in [0, 1]$ is the global satisfaction degree of all goals.

This approach uses λ as a global variable that represents the satisfaction of every fuzzy goal μ_{B_k} . The first constraint represents the satisfaction degree for $b_k \leq G_k(x) \leq b_k + b_{k2}$ (see Eq.

(3)), and the second constraint represents the satisfaction degree for $b_k - b_{k1} \leq G_k(x) \leq b_k$ (see Eq. (3)). As x is a free variable in this model, it operates over A_kx and finally moves λ to its maximum value.

5 Goal programming with Interval Type-2 fuzzy aspiration levels

Disagreement among people who are involved into decision making is a common issue in real scenarios. Some people is *pessimistic* while others are *optimistic* about different goals. This leads to have different perceptions coming from different experts, so we handle those perceptions using two functions *LMF* and *UMF* which are defined as follows:

$$UMF \equiv \bar{\mu}_{\bar{b}_k} = \begin{cases} 1 - \frac{G_k(x) - b_k}{\bar{b}_{k2}}, & \text{if } b_k \leq G_k(x) \leq b_k + \bar{b}_{k2}, \\ 1 & \text{if } G_k(x) = b_k, \\ 1 - \frac{b_k - G_k(x)}{\bar{b}_{k1}}, & \text{if } b_k - \bar{b}_{k1} \leq G_k(x) \leq b_k, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

$$LMF \equiv \underline{\mu}_{\underline{b}_k} = \begin{cases} 1 - \frac{G_k(x) - b_k}{\underline{b}_{k2}}, & \text{if } b_k \leq G_k(x) \leq b_k + \underline{b}_{k2}, \\ 1 & \text{if } G_k(x) = b_k, \\ 1 - \frac{b_k - G_k(x)}{\underline{b}_{k1}}, & \text{if } b_k - \underline{b}_{k1} \leq G_k(x) \leq b_k, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

where $\bar{\mu}_{\bar{b}_k}$ defines the UMF of the k_{th} goal, and $\underline{\mu}_{\underline{b}_k}$ defines the LMF of the k_{th} goal. A graphical display of a Interval Type-2 fuzzy goal is shown in Figure 1.

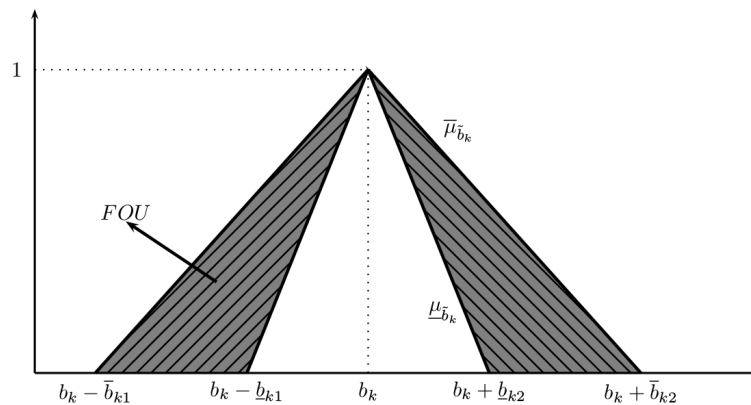


Figure 1. Interval Type-2 Fuzzy goal

Based on (3) and (5), we extend its results to a Interval Type-2 fuzzy environment. Thus, we define the Interval Type-2 fuzzy aspiration level as \tilde{b}_k which leads to the following LP model:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{k=1}^n d_{k1} + d_{k2} \\ \text{s.t.} \quad & \\ & A_k x + d_{k1} - d_{k2} \approx \tilde{b}_k, \\ & A'_k x \leq b'_k \\ & x, d_{k1}, d_{k2} \geq 0; \forall k \in \mathbb{N}, \end{aligned} \tag{8}$$

where $\tilde{b}_k \in \mathcal{F}_2$ is the Interval Type-2 fuzzy aspiration level, $d_{k1}, d_{k2} \in \mathbb{R}$ are negative and positive deviations from the goal B_k , A_k is the set of n constraints, and $x \in \mathbb{R}^m$ is the set of decision variables of the problem.

Therefore, we extend the proposal of Yang [20] to a Interval Type-2 fuzzy model using a two-step method that finds two different λ values, one for $\bar{\mu}_{\tilde{b}}$ and one for $\underline{\mu}_{\tilde{b}}$. To do so, we have to solve the following two LPs:

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{\lambda} \\ \text{s.t.} \quad & \\ & \bar{\lambda} \leq 1 - \frac{A_k x - b_k}{\bar{b}_{k2}}, \\ & \bar{\lambda} \leq 1 - \frac{b_k - A_k x}{\bar{b}_{k1}}, \\ & \bar{\lambda} \in [0, 1], x \geq 0; \forall k \in \mathbb{N}, \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \max \quad & \underline{\lambda} \\ \text{s.t.} \quad & \\ & \underline{\lambda} \leq 1 - \frac{A_k x - b_k}{\underline{b}_{k2}}, \\ & \underline{\lambda} \leq 1 - \frac{b_k - A_k x}{\underline{b}_{k1}}, \\ & \underline{\lambda} \in [0, 1], x \geq 0; \forall k \in \mathbb{N} \end{aligned} \tag{10}$$

where $\bar{\lambda}$ is the overall upper satisfaction degree of the goals, and $\underline{\lambda}$ is the overall lower satisfaction degree of the goals. $A_k x$ is the k_{th} technological constraint, and $\bar{b}_{k1}, \underline{b}_{k1}, \bar{b}_{k2}, \underline{b}_{k2}$ are the admissible deviations from b_k .

Our approach finds two values: $\min \{\underline{\lambda}\} = \underline{\lambda}^*$ and $\max \{\bar{\lambda}\} = \bar{\lambda}^*$ that represent pessimistic and optimistic perceptions about b_k , and also compose the interval $[\underline{\lambda}^*, \bar{\lambda}^*] = \{\lambda^* \in [0, 1] \mid \underline{\lambda}^* \leq \lambda^* \leq \bar{\lambda}^*\}$ of satisfaction of all experts.

6 Experimentation and Results

6.1 Interval Type-2 Fuzzy Goals

As application example we use the proposed by Narasimhan [15] and extended by Chen & Tsai [3] which is composed by three fuzzy goals, as shown as follows:

$$\begin{aligned} G_1 : 80x_1 + 40x_2 &\cong 630, \\ G_2 : x_1 &\cong 7, \\ G_3 : x_2 &\cong 4, \end{aligned} \tag{11}$$

where x_1 and x_2 are the manufacturing quantities of two products which regard to three goals: G_1 is a profitability goal, and G_2, G_3 are the expected selling quantities per product. The maximum deviations from $G_k = \{630, 7, 4\}$ are symmetrically handled where $b_{k1} = b_{k2} = \{10, 2, 2\}$.

We use those values as the LMF of an extended problem e.g $\underline{b}_{k1} = \underline{b}_{k2} = \{10, 2, 2\}$, and the UMF is defined using $\bar{b}_{k1} = \bar{b}_{k2} = \{15, 3, 3\}$. Now, their LPs are based on Eqs. (9) and (10):

$$\begin{aligned} &\max \bar{\lambda} \\ & \text{s.t.} \\ \bar{\lambda} &\leq -\frac{16}{3}x_1 - \frac{8}{3}x_2 + 43, \\ \bar{\lambda} &\leq \frac{16}{3}x_1 + \frac{8}{3}x_2 - 41, \\ \bar{\lambda} &\leq -\frac{x_1}{3} + \frac{10}{3}, \\ \bar{\lambda} &\leq \frac{x_1}{3} - \frac{4}{3}, \\ \bar{\lambda} &\leq -\frac{x_2}{3} + \frac{7}{3}, \\ \bar{\lambda} &\leq \frac{x_2}{3} - \frac{1}{3}, \\ \bar{\lambda}, x_1, x_2 &\geq 0, \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} &\max \underline{\lambda} \\ & \text{s.t.} \\ \underline{\lambda} &\leq -8x_1 - 4x_2 + 64, \\ \underline{\lambda} &\leq 8x_1 + 4x_2 - 62, \\ \underline{\lambda} &\leq -0.5x_1 + 4.5, \\ \underline{\lambda} &\leq 0.5x_1 - 2.5, \\ \underline{\lambda} &\leq -0.5x_2 + 3, \\ \underline{\lambda} &\leq 0.5x_2 - 1, \\ \underline{\lambda}, x_1, x_2 &\geq 0, \end{aligned} \tag{13}$$

The solution of the model (12) is $\bar{\lambda}^* = 0.76$ reached by $(x_1, x_2) = (6.28, 3.28)$ and the solution of (13) is $\underline{\lambda}^* = 0.64$ with $(x_1, x_2) = (6.28, 3.28)$. A graphical description of the results can be seen in Figures 3, 4 and 5 respectively (see Appendix 1). The optimal value of the goals 1, 2 and 3 are 633.6, 6.28 and 3.28 respectively for both $\bar{\lambda}^*$ and $\underline{\lambda}^*$.

Both models reach the same values of the decision variables x_1 and x_2 which is a logical solution since all deviations are defined as L_1 distances using $\bar{\lambda}$ and $\underline{\lambda}$ as linear functions of d_{k1} and d_{k2} . The optimal values $\bar{\lambda}^* = 0.76$ and $\underline{\lambda}^* = 0.64$ are global satisfaction degrees, which means that all three goals are satisfied at the same level.

6.2 Type-1 embedded goals

Now, we solve another example to illustrate how an embedded Type-1 fuzzy set (B_e) into $FOU(\tilde{b}_k)$ works. To do so, we have selected the deviations for goals 1, 2 and 3 as 12.5, 2.5, 2.5 which corresponds to the middle point of the support of $FOU(\tilde{b}_k)$ as shown in Figure 2:

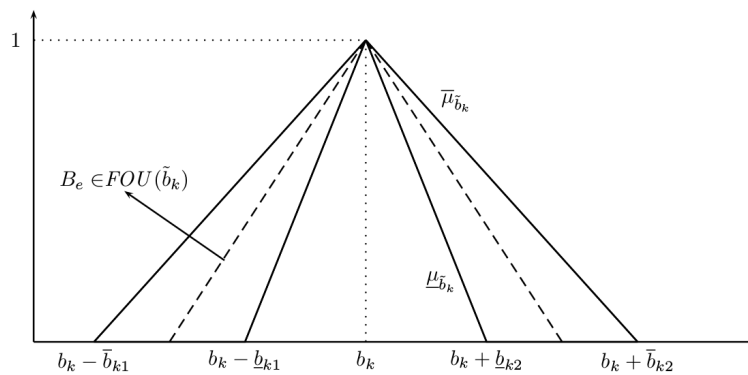


Figure 2. Type-1 embedded set B_e

The LP formulation based on Eq. (5) is:

$$\begin{aligned}
 & \max \lambda \\
 & \text{s.t.} \\
 & \lambda \leq -6.4x_1 - 3.2x_2 + 51.4, \\
 & \lambda \leq 6.4x_1 + 3.2x_2 - 49.4, \\
 & \lambda \leq -0.4x_1 + 3.8, \\
 & \lambda \leq 0.4x_1 - 1.8, \\
 & \lambda \leq -0.4x_2 + 2.6, \\
 & \lambda \leq 0.4x_2 - 0.6, \\
 & \lambda, x_1, x_2 \geq 0,
 \end{aligned} \tag{14}$$

The crisp solution to the problem (14) given Type-1 fuzzy goals is $\lambda^*=0.712$ which fits into the obtained range $[\underline{\lambda}^* = 0.64, \bar{\lambda}^* = 0.76]$ obtained through (9) and (10). Also note that any

$B_e \in \mathcal{F}_1$ embedded into $\text{supp}(\tilde{b}_k)$ leads to an optimal satisfaction degree λ^* that fits into the range $[\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]$ as described in the Appendix 2. By continuity of LP models (see Dantzig [5], Hladík [8], and Fiedler et al [6]), if $\tilde{b}_k \in \mathcal{F}_2$ is continuous then its UMF leads to an optimal solution namely $\bar{\lambda}^*$ and every $B_e \in \text{FOU}(\tilde{b}_k)$ leads to an optimal satisfaction degree, namely $\lambda_e^* \in [\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]$.

7 Concluding Remarks

We have presented and solved an extension of the fuzzy goal programming basic model proposed by Narasimhan [15], Yang [20], and Chen & Tsai [3] to a Interval Type-2 fuzzy environment, which includes linguistic uncertainty and numerical imprecision coming from multiple experts opinions and perceptions.

Our approach gives the model flexibility to find other kind of solutions in cases where the system has no the ability to fulfill all goals. As higher λ^* as closer to the goal the model is. $\bar{\lambda}$ and $\underline{\lambda}$ describe overall optimistic and pessimistic satisfaction degrees regarding different experts of the system.

There is a relationship among λ^* , d_{k1} and d_{k2} since as wider \tilde{b}_k as higher λ^* is, which means higher satisfaction values. In the first example if d_{k1} and d_{k2} are increased in a 50% then λ^* is increased only in 12%, and if d_{k1} and d_{k2} are decreased in a 50% then α^* is decreased in 36% (LP formulations for 50% decreased d_{k1} , d_{k2} , $\bar{\lambda}$ and $\underline{\lambda}$ are shown in Appendix 2). Finally, all experts are satisfied into the range $[\underline{\lambda} = 0.64, \bar{\lambda} = 0.76]$.

The second example shows an embedded set A_e into $\text{FOU}(\tilde{b}_k)$ whose optimal satisfaction degree λ^* fits into the range $[\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]$ as described in the Appendix 2. This helps decision making when having multiple experts and helps to see how different selections of A_e affect the problem.

References

- [1] A. Charnes and W. W. Cooper. Management models and industrial applications of linear programming, vol. i, 1961.
- [2] Abraham Charnes and William Wagner Cooper. Goal programming and multiple objective optimizations: Part 1. *European Journal of Operational Research*, 1(1):39–54, 1977.
- [3] Liang-Hsuan Chen and Feng-Chou Tsai. Fuzzy goal programming with different importance and priorities. *European Journal of Operational Research*, 133(3):548–556, 2001.
- [4] Ting-Yu Chen. An electre-based outranking method for multiple criteria group decision making using interval type-2 fuzzy sets. *Information Sciences*, 263:1–21, 2014.
- [5] George Dantzig. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, 1963.
- [6] M. Fiedler, J. Nedoma, J. Ramík, J. Rohn, and K. Zimmermann. *Linear Optimization Problems with Inexact Data*. Springer-Verlag, 2006.
- [7] Edward L Hannan. On fuzzy goal programming*. *Decision Sciences*, 12(3):522–531, 1981.

- [8] Milan Hladík. Weak and strong solvability of interval linear systems of equations and inequalities. *Linear Algebra and its Applications*, 438(11):4156–4165, 2013.
- [9] Chaofang Hu, Shaokang Zhang, and Na Wang. Enhanced interactive satisficing method via alternative tolerance for fuzzy goal programming with progressive preference. *Applied Mathematical Modelling*, 38(19):4673–4685, 2014.
- [10] Kaveh Khalili-Damghani, Soheil Sadi-Nezhad, and Madjid Tavana. Solving multi-period project selection problems with fuzzy goal programming based on topsis and a fuzzy preference relation. *Information Sciences*, 252:42–61, 2013.
- [11] George Klir and Bo Yuan. *Fuzzy sets and fuzzy logic*, volume 4. Prentice Hall New Jersey, 1995.
- [12] Gang Li. Fuzzy goal programming—a parametric approach. *Information Sciences*, 195:287–295, 2012.
- [13] Jerry M Mendel. *Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions*. Prentice Hall PTR, 2001.
- [14] Jerry M. Mendel. On centroid computations for Type-2 fuzzy sets. *Appl. Comput. Math.*, 10(1):88–96, 2011.
- [15] Ram Narasimhan. Goal programming in a fuzzy environment. *Decision sciences*, 11(2):325–336, 1980.
- [16] M. Pagola, C. Lopez-Molina, J. Fernandez, E. Barrenechea, and H. Bustince. Interval type-2 fuzzy sets constructed from several membership functions. application to the fuzzy thresholding algorithm. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21(2):230–244, 2013.
- [17] Jindong Qin and Xinwang Liu. Multi-attribute group decision making using combined ranking value under interval type-2 fuzzy environment. *Information Sciences*, 297:293–315, 2015.
- [18] Turgay Safiye and Taşkın Harun. Fuzzy goal programming for health-care organization. *Comp. & Ind. Eng.*, 2014.
- [19] I.B. Türksen. Interval valued fuzzy sets based on normal forms. *Fuzzy Sets and Systems*, 20(2):191–210, 1986.
- [20] Taeyong Yang, James P Ignizio, and Hyun-Joon Kim. Fuzzy programming with nonlinear membership functions: piecewise linear approximation. *Fuzzy sets and systems*, 41(1):39–53, 1991.
- [21] Zhiming Zhang and Shouhua Zhang. A novel approach to multi attribute group decision making based on trapezoidal interval type-2 fuzzy soft sets. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7):4948–4971, 2013.

A Appendix 1

This appendix contains the results of the optimization process for the first Interval Type-2 fuzzy goals example.

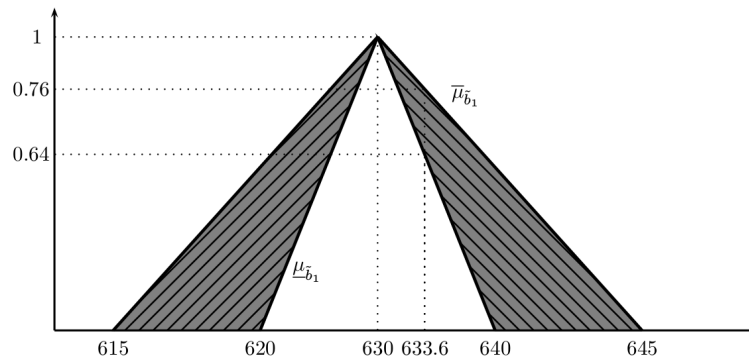


Figure 3. Interval Type-2 Fuzzy Goal 1

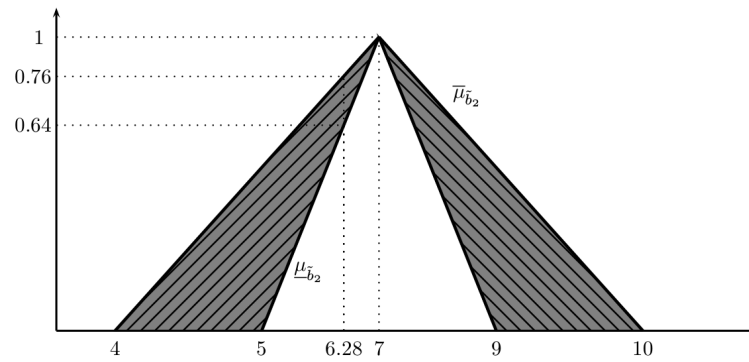


Figure 4. Interval Type-2 Fuzzy Goal 2

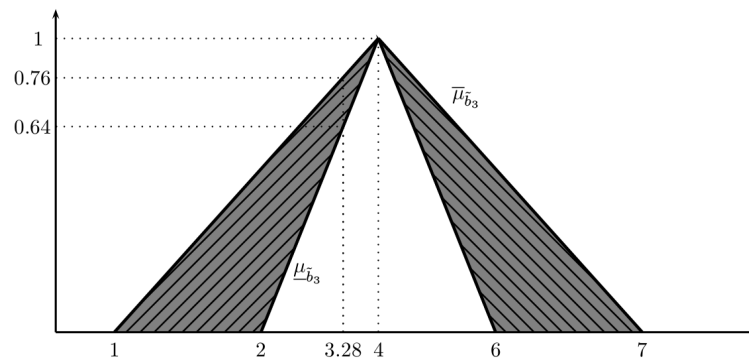


Figure 5. Interval Type-2 Fuzzy Goal 3

B Appendix 2

This appendix shows the model of the Type-1 example shown in Section 6 where $\underline{b}_{k1} = \underline{b}_{k2} = \{5, 1, 1\}$ and $\bar{b}_{k1} = \bar{b}_{k2} = \{10, 2, 2\}$:

$$\begin{aligned}
 & \max \underline{\lambda} \\
 & \text{s.t.} \\
 & \underline{\lambda} \leq -16x_1 - 8x_2 + 127, \\
 & \underline{\lambda} \leq 16x_1 + 8x_2 - 125, \\
 & \underline{\lambda} \leq -x_1 + 8, \\
 & \underline{\lambda} \leq x_1 - 6, \\
 & \underline{\lambda} \leq -x_2 + 5, \\
 & \underline{\lambda} \leq x_2 - 3, \\
 & \underline{\lambda}, x_1, x_2 \geq 0,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \max \bar{\lambda} \\
 & \text{s.t.} \\
 & \bar{\lambda} \leq -8x_1 - 4x_2 + 64, \\
 & \bar{\lambda} \leq 8x_1 + 4x_2 - 62, \\
 & \bar{\lambda} \leq -0.5x_1 + 4.5, \\
 & \bar{\lambda} \leq 0.5x_1 - 2.5, \\
 & \bar{\lambda} \leq -0.5x_2 + 3, \\
 & \bar{\lambda} \leq 0.5x_2 - 1, \\
 & \bar{\lambda}, x_1, x_2 \geq 0,
 \end{aligned}$$

Juan Sebastian Patiño-Callejas

He performs Industrial Engineering studies at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá, Colombia.
e-mail: juansebastianpatinoc@gmail.com

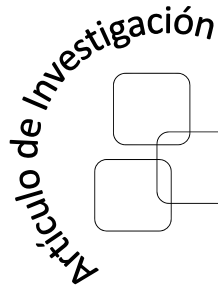
Krisna Yoel Espinosa-Ayala

He performs Industrial Engineering studies at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá, Colombia.
e-mail: joespinosa1018@gmail.com

Juan Carlos Figueroa-García

He is an Assistant Professor at the Engineering Faculty of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Bogotá, Colombia. He obtained his bachelor degree on Industrial Engineering at the same university in 2002, a Master degree on Industrial Engineering at the same university in 2010, and a Ph.D. degree on Industry and Organizations at the Universidad Nacional de Colombia in 2014. His main interests are: fuzzy sets, fuzzy optimization, time series analysis and evolutionary optimization. e-mail: jcfigueroag@udistrital.edu.co

Citación: Rodríguez, C. D. y Melgarejo, M. A.(2015). Arquitectura FPGA para simulación de aprovisionamiento de alimentos en colonias de hormigas artificiales. En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 245–260
© Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a05>



Cristian David Rodríguez Rodríguez
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
crdrodriguezr@correo.udistrital.edu.co

Miguel Alberto Melgarejo Rey
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
mmelgarejo@ieee.org



Arquitectura FPGA para simulación de aprovisionamiento de alimentos en colonias de hormigas artificiales

A FPGA architecture for foraging behavior in simulation and colonies

Resumen

Se presentan algunos resultados en relación con el diseño y la implementación de una arquitectura que soporta una plataforma experimental para simular el proceso de alimentación de las colonias de hormigas. Los algoritmos Ant-system y Ant-Cycle modelan el comportamiento de las hormigas. La plataforma permite cambiar parámetros como la cantidad y la velocidad de las hormigas, la cantidad y ubicación de los alimentos y el radio y la frecuencia de difusión de la feromona de las hormigas. Dichos parámetros se visualizan a través de una interfaz VGA. La implementación de hardware se lleva a cabo sobre tecnología FPGA de Xilinx®. La teoría detrás de este diseño considera que los comportamientos complejos pueden surgir de sistemas con una estructura simple. Este trabajo se enfrenta a la pregunta por la complejidad global emergente de un sistema cuya complejidad estructural es mínima o inexistente.

Palabras claves: colonia, FPGA, hormigas, procesador, sistemas biológicos

Abstract

This paper presents some results regarding the design and implementation of an architecture that supports an experimental platform for simulating the foraging process of ant colonies. Both the Ant-System and the Ant-Cycle algorithms model the behavior of ants. The platform allows to change parameters like the quantity and speed of ants, the amount and location of food and the ratio and diffusion frequency of ant pheromone. These parameters are visualized through a VGA interface. The hardware implementation is carried out over FPGA Xilinx® technology. Theory behind this design considers that complex behaviors can emerge from systems with simple structure. This work confronts the question about global complexity emerging from a system whose structural complexity is minimal or inexistent.

Key words: ants, biological systems, colony, FPGA, processor

Recibido: 15-05-2015
Modificado: 28-07-2015
Aceptado: 24-08-2015

1. Introducción

Las colonias de hormigas son sistemas sociales inteligentes, su comportamiento emerge de la cooperación entre la especie, una sola hormiga no es inteligente [1]. Su sistema comportamental tiene como fin la recolección de alimento, para lo cual emplea un proceso de riego y detección de feromona que le permite crear y mejorar trayectos de recolección. Este fenómeno tiene su propia técnica de optimización en aplicaciones computacionales, el llamado ACO (Ant Colony Optimization) [2].

En la actualidad los algoritmos de colonias de hormigas se han orientado hacia la solución de problemas computacionales que pueden reducirse a encontrar la mejor ruta en un grafo [3]. Fueron inicialmente propuestos por Dorigo en 1992 [4] y motivo de diversas investigaciones en esta década [5], [6]. Dichos algoritmos han tenido un gran campo de aplicación sobre la tecnología de hardware configurable FPGA [7], [8] debido a factores como el paralelismo del hardware, los tiempos de respuesta y la facilidad de mantenimiento [9]. No obstante, las actuales investigaciones se alejan un poco del estudio de las colonias enfocándose en el marcado campo de la optimización de grafos.

El presente trabajo aborda una propuesta arquitectural de hardware y su correspondiente implementación, que permite retomar el estudio de las colonias de hormigas por medio de un entorno gráfico experimental basado en la interacción de hormigas artificiales. En el centro de la propuesta se encuentra que el comportamiento de una sola hormiga puede ser capturado por medio de una máquina de estados algorítmica a partir del algoritmo ACO Ant-Cycle System. La colonia de hormigas se concibe entonces como un conjunto de máquinas de estado que interactúan entre sí por medio de una memoria distribuida asociada al espacio de recolección de comida de las hormigas; en este sentido se estaría hablando de una arquitectura de procesamiento con capacidades de cómputo emergente, de ahí que sea denominado un procesador y no un emulador.

En esta línea de investigación existe un modelo para emular colonias de hormigas diseñada sobre el software Netlogo [10]; sin embargo, aunque presenta varios beneficios que serán punto de partida en el diseño propuesto en el artículo, no permite redefinir factores como la posición o cantidad de alimento, lo cual es un gran problema en el momento de formular experimentos. El hecho de proponer una implementación hardware sobre FPGA, en vez de una software, es una gran mejora en la medida que es posible supervisar cualquier señal (variable) del sistema, gracias a la herramienta Scope® incluida en la interfaz ISE® de Xilinx®. Agregando a esto las ventajas intrínsecas de la tecnología, mencionadas anteriormente.

En el campo de implementaciones ACO sobre FPGA se encuentran aplicaciones similares pero orientadas a grafos [6,7], la principal diferencia con respecto al desarrollo más reciente [7] es el modelo de feromona. La arquitectura propuesta en el presente artículo permite que el rastro de feromona sea depositado, tanto en los nodos de referencia para decisión de movimiento i y j como en el camino intermedio entre estos nodos, a diferencia de [7], en donde el rastro de feromona se deposita únicamente sobre los nodos i y j ; se inserta este modelo con el objetivo de replicar el comportamiento de la colonia de hormigas lo más cercano posible a la realidad [15]. La organización global del flujo de acciones en la ejecución del algoritmo y la variante de ACO implementada coinciden para ambos desarrollos.

El modelamiento de colonias de hormigas se incluye dentro de la rama inteligencia de enjambres la cual ha generado un especial interés en aplicaciones de ingeniería. A través de los métodos de cooperación, auto organización y control descentralizado abstraídos del comportamiento de las hormigas se han obtenido resultados y aportes en la mejora de la precisión en el diseño de sistemas difusos [11], búsqueda de rutas de bajo consumo energético para robots móviles [12], optimización en rutas de abastecimiento de agua para embalses de emergencia [13] y diseño de sistemas de recolección de basura multi-robótica [14].

En busca de soluciones a distintas aplicaciones, en el estudio de los algoritmos de hormigas se hace necesario realizar pruebas bajo un simulador. En la mayoría de casos estas pruebas se realizan sobre mapas de grafos, los cuales son una aproximación muy útil al comportamiento de las hormigas, pero distan en diferentes aspectos del comportamiento real [15]. El desarrollo que aquí se presenta se muestra como una primera posibilidad de acercarse a una solución para este problema.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en primer lugar se define un procesador basado en la interacción de ASM's que modela el flujo de decisiones y acciones de las hormigas y su entorno, luego se presenta el diseño de una unidad gráfica y sus correspondientes acondicionamientos para el procesador anterior. Con estos dos procesadores trabajando en paralelo se introduce el comportamiento basado en heurística ACO, adaptándolo a los recursos disponibles en hardware. Finalmente se analizan los resultados esperados y obtenidos haciendo énfasis en la discusión sobre la complejidad emergente en el sistema.

2. Modelo complejo basado en ASM's para la colonia de hormigas

2.1. Máquinas de estados algorítmicas

Una Algorithmic State Machine (ASM, por sus siglas en inglés) se define como el conjunto de estados, transiciones, entradas y salidas que permiten modelar la dinámica de un sistema de procesamiento digital [16]. La ASM permite especificar la secuencia de tareas y decisiones que contiene el algoritmo solución de determinado problema y se encarga de traducir el problema planteado a un diagrama de información secuencial sujeto a las condiciones de ejecución. Para lograr este propósito divide las tareas en un número finito de estados de acción y describe las condiciones para pasar de un estado a otro; cada estado, a excepción del estado inicial, debe tener un estado pasado y uno futuro, puede darse el caso en que el mismo estado sea su anterior o siguiente. En cada estado se guarda concurrencia en las operaciones realizadas, dado que contiene circuitos combinacionales y, además, se guarda memoria del estado anterior, pues contiene circuitos secuenciales.

2.2. Planteamiento del problema

En una colonia de hormigas se diferencian tres grupos: reina, obreras y zánganos. El grupo de interés son las obreras, específicamente su proceso de recolección de alimento. Las hormi-

gas buscan alimento estocásticamente, seleccionan su trayectoria con base en la información de feromona contenida en el espacio de búsqueda. Las trayectorias varían, puesto que cada una deposita feromona apoyada en su conocimiento específico del entorno, es decir, la información que haya adquirido. Como resultado de este proceso, indirectamente cada hormiga puede comunicarse con las demás, esta comunicación les permite a las hormigas ser atraídas hacia las mejores soluciones. La búsqueda eficiente se logra gracias a la intensificación del camino más corto por la realimentación positiva de la información de feromona por selección estocástica; la realimentación positiva se produce porque el camino solución se refuerza de feromona más rápido que los otros, al requerir un menor tiempo para ser completado. Este camino se convierte en el único, pasado determinado tiempo [1].

2.3. Modelo basado en ASM's

Para resolver el problema, se diseñan dos ASM. La primera modela una sola hormiga, la segunda usa la ASM anterior para cada una de las demás. Una ASM tipifica el cerebro de la hormiga y la otra reutiliza este cerebro para todas las hormigas de la colonia; esta propuesta requiere almacenar la información necesaria de cada hormiga, como su posición, dirección, actualización de feromona y objetivo actual en una memoria.

2.3.1. ASM para modelar el comportamiento de la hormiga obrera

En la figura 1 se muestra el diagrama de estados que especifica las acciones que debe realizar la hormiga obrera en el proceso de recolección de alimento.



Figura 1. Diagrama funcional de la hormiga obrera.

Dentro del flujo de estados se diferencian dos grupos importantes, que dependen básicamente de tener o no tener comida. Si la hormiga no tiene comida realiza todo el proceso de búsqueda de la misma (estados de borde rojo); en caso contrario, realiza todo el proceso de búsqueda del nido (estados de borde azul). Este dato indica qué secuencia de acciones debe realizar la hormiga. En la ASM número dos, se detallan las modificaciones realizadas para que las hormigas recolecten alimento al mismo tiempo usando una única máquina de estados.

2.3.2. ASM para reutilizar el comportamiento de la hormiga obrera

Para reutilizar el diagrama de la figura 1 en todas las hormigas, se modifica el flujo de acciones agrupando los estados de igual color, si la hormiga tiene comida realiza el flujo

de estados de color rojo únicamente y en caso contrario el flujo de estados de color azul. Se agregan estados que admiten que cada una de las hormigas obreras pueda realizar una única acción simultáneamente. Esto permite, dada la velocidad con que funciona el ASM, crear la sensación de que todas trabajan simultáneamente; el selector de hormigas hace que pase hormiga por hormiga y realice su correspondiente acción, cuando cada hormiga haya realizado alguno de los flujos de acciones, se procede a deteriorar el rastro de feromona, si es que existe, y se entra en un bucle de espera, en seguida se reinicia el proceso, actualizando la información almacenada de cada hormiga.

El diagrama propuesto para modelar la segunda ASM se presenta en la figura 2.

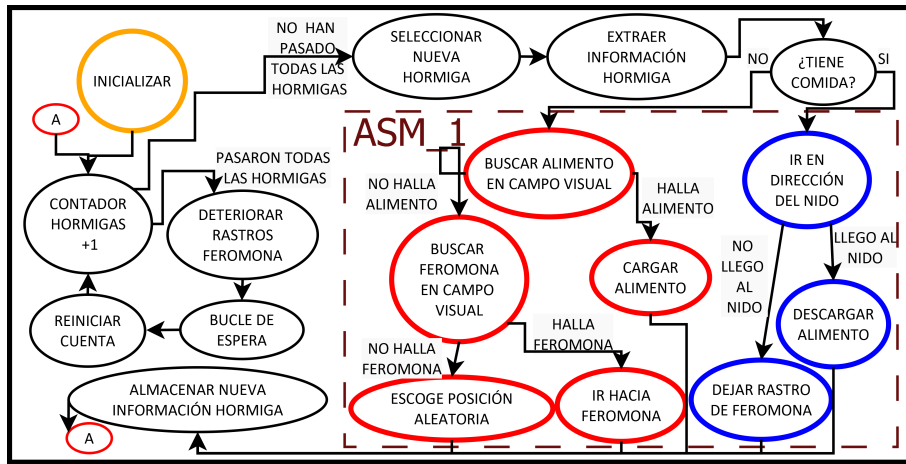


Figura 2. Diagrama funcional para la colonia de hormigas.

2.4. Acondicionamiento de las acciones básicas de la hormiga para la interfaz gráfica

A continuación se describen los diseños realizados para crear la interfaz gráfica de la hormiga, que se puede observar en [21 y 22].

A fin de generar la interfaz gráfica se crea una matriz 256 X 256 que se visualiza en pantalla y tiene dieciséis colores posibles por elemento de la matriz. La colonia se ubica en el centro del entorno, el lugar de la comida es aleatorio y se actualiza su cantidad a medida que se desabastece el entorno.

En la figura 3.a. se evidencia que toda hormiga dentro de esta matriz 256 X 256 tiene coordenada X, Y, que permite conocer su ubicación y una dirección de ocho posibles. La gráfica de la hormiga se forma por cuatro tonalidades de rojo.

En la figura 3.b. se pone de manifiesto que para realizar un movimiento la hormiga elige entre tomar la misma dirección, siguiente o anterior en la secuencia. Con el propósito de elegir la nueva coordenada se le suma a la actual el valor necesario para ir en la dirección seleccionada; por ejemplo, si su dirección es 0 puede tomar dirección 0, 1 o 7 afectando las coordenadas por la suma vectorial de la actual y (-6,0) para dirección 0 (-6, 3) para dirección 7 o (-6,-4) para dirección 1.

Al encontrar alimento inicia un proceso de regreso a la colonia. Conoce con cierto margen de error la posición de su colonia, se ubica en dirección a ella y toma caminos que le permitan llegar lo más rápido posible.

En la figura 3.c. se ve que en paralelo al proceso anterior la hormiga debe depositar el rastro de feromona. La feromona se forma por ocho tonalidades, que van desde el blanco hasta el negro, pasando por matices de verde. Para generar la gráfica, se reusa la forma de la hormiga, cambiando las cuatro tonalidades de rojo por las cuatro tonalidades más cercanas al blanco de la feromona. Para degradar el rastro, cada dos movimientos en la colonia de hormigas, se cambia la tonalidad de los pixeles con feromona al inferior en secuencia de blanco a negro, de tal manera que luego de doce movimientos de la hormiga desaparezca por completo el rastro dejado inicialmente en un movimiento.

En el proceso de detección de feromona, figura 3.d., se considera un campo de visión para la hormiga de aproximadamente el doble de su tamaño, en la dirección de su movimiento. La zona con mayor concentración de feromona se elige como nueva dirección actualizando la coordenada de ubicación, como se detalló anteriormente.

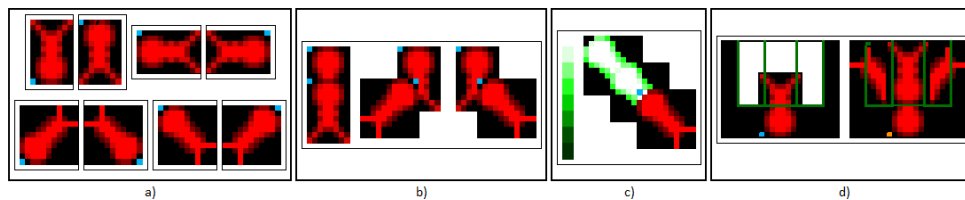


Figura 3. a) Direcciones posibles para la hormiga obrera. b) Direcciones que puede elegir la hormiga para su siguiente movimiento. Solo puede escoger nuevas direcciones con diferencia de 45° o 0° con respecto a la actual. c) Rastro de feromona depositado por la hormiga obrera. d) Campo de visión para detección de feromona. Se encuentra dividido en tres zonas delimitadas por los recuadros verdes.

2.5. Metaheurística ACO

La Metaheurística ACO está inspirada en la observación del comportamiento de hormigas reales considerándose un algoritmo de inteligencia colectiva, estos algoritmos se hallan compuestos de individuos simples que cooperan sin ninguna forma de control directo a través de la auto-organización [2].

El componente central de un algoritmo ACO es el modelo de feromona. Las hormigas artificiales construyen una solución para el problema de recolección en el entorno, llamado grafo de construcción; dicho grafo se encuentra formado por un conjunto de vértices y arcos, las hormigas se mueven de un vértice a otro a lo largo de los arcos del grafo construyendo incrementalmente una solución parcial. En estos desplazamientos depositan una cierta cantidad de feromona sobre los arcos y vértices que han visitado, la cantidad de feromona depositada puede depender de la calidad de la solución encontrada.

Entre los principales algoritmos ACO disponibles se encuentran Ant System, MAX-MIN Ant System y Ant Colony System. Se hace uso del modelo Ant System puesto que provee un mayor acercamiento al comportamiento de una colonia de hormigas que a la modelación de problemas de optimización combinatoria; Ant System presenta tres variantes que distan en

la manera de actualizar los rastros de feromona, se escoge Ant-Cycle porque a diferencia a los otros dos deposita feromona luego de encontrar una solución y no en la búsqueda de esta [17,18].

En AS k hormigas buscan una trayectoria solución concurrentemente. La hormiga k aplica una regla de elección de acción estocástica para decidir cuál debe ser su siguiente movimiento o vértice a visitar, la probabilidad con la cual dicha hormiga, estando en el vértice i , elige visitar el vértice j es:

$$P_{(i,j)}^k = \frac{[T_{i,j}]^\alpha * [\eta_{i,j}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [T_{i,l}]^\alpha * [\eta_{i,l}]^\beta} \quad (1)$$

Los parámetros α y β establecen la importancia relativa de los rastros de feromona y de la información heurística respectivamente. Los N_i^k corresponden a los vértices que puede visitar la hormiga.

Además, $\eta_{i,j}$ corresponde al inverso de la distancia entre i y j un valor heurístico disponible *a priori*.

$$\eta_{i,j} = \frac{1}{d_{i,j}} \quad (2)$$

La información de feromona se deposita una vez que todas las hormigas han hallado alguna fuente de alimento, el rastro de feromona global se evapora y se actualiza como sigue:

$$T(i,j) \leftarrow (1-p) * T(i,j) + \sum_{k=1}^m \Delta T_{i,j}^k \quad (3)$$

Donde p corresponde a la tasa de evaporación. La cantidad de feromona que la hormiga k deposita en su recorrido de regreso a la colonia desde la fuente de alimentación se define como:

$$\Delta T_{i,j}^k = \frac{Q}{L_k} \quad (4)$$

Donde Q es una constante y L_k es la longitud del recorrido realizado por dicha hormiga.

2.6. Modelo con acondicionamiento ACO (algoritmo ACO orientado a hardware)

El algoritmo ACO introducido debe ser acondicionado para los requerimientos de la implementación hardware.

Una hormiga solo puede escoger entre tres nuevas posiciones, si la nueva posición está en la misma dirección y se denota esta distancia como 1, las otras dos posiciones estarán a una distancia $\sqrt{2}$ de la actual, como se muestra en la figura 4.

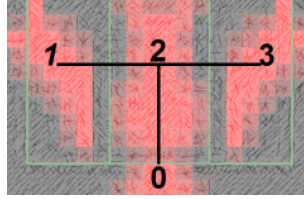


Figura 4. Distancias en los movimientos de la hormiga.

$$\eta_{i,j_1} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad \eta_{i,j_2} = 1, \quad \eta_{i,j_3} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Los valores típicos de α y β se encuentran entre 1 y 5, para este caso se escoge 1 para α y 4 para β . Estos son los valores que mejor se acomodan a las iteraciones experimentales, además, un valor par para β facilita la implementación en hardware. De esta manera la ecuación para escoger la nueva posición de la hormiga será.

$$P_{(0,1)}^k = \frac{\frac{T_{0,1} * 1}{4}}{\frac{T_{0,1} * 1}{4} + T_{0,2} + \frac{T_{0,3} * 1}{4}} \quad (6)$$

$$P_{(0,2)}^k = \frac{T_{0,2}}{\frac{T_{0,1} * 1}{4} + T_{0,2} + \frac{T_{0,3} * 1}{4}} \quad (7)$$

$$P_{(0,3)}^k = \frac{\frac{T_{0,3} * 1}{4}}{\frac{T_{0,1} * 1}{4} + T_{0,2} + \frac{T_{0,3} * 1}{4}} \quad (8)$$

Para poder almacenar estas probabilidades en registros se multiplica por cien al denominador de cada expresión, antes de realizar la división. Se almacena el valor entero. $P_{(0,1)}^k$ representa la probabilidad de que la hormiga k genere su movimiento en la dirección anterior en la secuencia a la que lleva actualmente, $P_{(0,2)}^k$ en la misma dirección y $P_{(0,3)}^k$ en la dirección siguiente en la secuencia. La información de feromona se recolecta sumando pixel a pixel la intensidad de los rastros contenidos en cada una de las zonas delimitadas por i y j .

Para depositar y deteriorar el rastro de feromona se debe tener en cuenta que esta operación se realiza pixel a pixel, no se evalúa la expresión del nodo i al nodo j sino puntualmente en cada coordenada (x, y) que se ve afectada en el proceso. En el caso puntual de depositar, las coordenadas (x, y) que se ven afectadas se encuentran entre los nodos i y j , para el caso de deteriorar se afecta a la matriz en general. Como se detalla en la sección 2.4 un rastro de feromona puede tener ocho niveles diferentes; las ecuaciones que rigen el cambio de estos niveles al depositar y deteriorar respectivamente, se enuncian a continuación.

$$N_{T_{x,y_1}} = N_{T_{x,y_0}} + \sum_{k=1}^m \Delta N_{T_{x,y_0}}^k \quad (9)$$

$$N_{T_{x,y_1}} = \begin{cases} N_{T_{x,y_0}} - 1, & N_{T_{x,y_0}} \neq 0 \\ 0, & N_{T_{x,y_0}} = 0 \end{cases}, \quad N_{T_{x,y}} \in \mathbb{Z}, 0 \leq N_{T_{x,y}} \leq 8 \quad (10)$$

$N_{T_{x,y}}$ representa el nivel de feromona contenido en el pixel con coordenada x, y . La hormiga k deposita inicialmente un rastro de feromona en el cual $N_{T_{x,y}} = 2$. Se considera un pixel

saturado si el nivel de intensidad en este llega a ocho, puesto que a partir de este nivel no se detecta el crecimiento en la información de feromona. En el ajuste que se realiza al algoritmo para su implementación hardware se debe sacrificar el crecimiento lineal o el decrecimiento exponencial de feromona por la limitación de recursos. Las iteraciones, demuestran que el decrecimiento lineal de feromona permite encontrar rutas óptimas, además de requerir un tamaño en los registros considerablemente inferior al de la segunda opción. Por tal razón, se considerará para efectos prácticos que la feromona crece y decrece linealmente. Además, para controlar la velocidad de decrecimiento de la feromona, se deteriora el rastro de feromona cada tres movimientos de las hormigas de la colonia.

3. Desarrollo en hardware

En esta sección se especifican las etapas mediante las cuales se implementa la ASM sobre el hardware. En la implementación se debe crear un entorno gráfico por medio del cual se evidencie el proceso de recolección de alimento. El diseño requiere un procesador gráfico y algunos circuitos auxiliares.

3.1. Descripción general

En la figura 5 se muestra la arquitectura del circuito que simula la colonia de hormigas, este permite la interacción entre el procesador de hormigas, el procesador gráfico y periféricos de entrada y salida. El circuito cuenta con tres memorias RAM; la RAM en bloque empotrada permite fraccionar el total de su capacidad en un considerable número de memorias de menor tamaño. Usar tres memorias facilita el flujo de información de una a otra (en menos ciclos de reloj que si fuera solo una memoria) y manejar tamaños diferentes para almacenar dicha información (según se requiera).

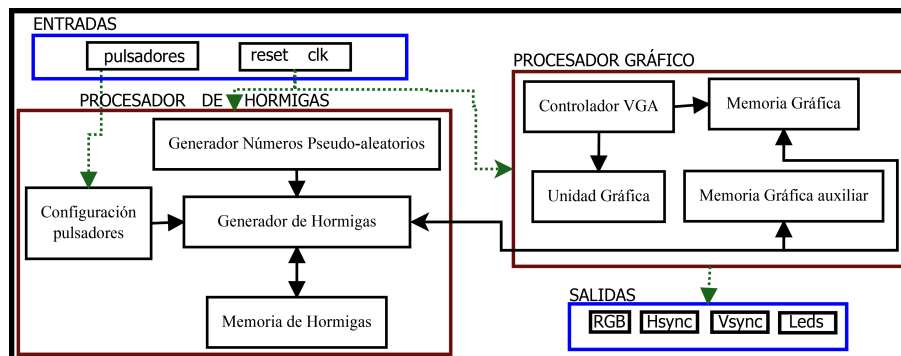


Figura 5. Diagrama de bloques de la especificación VHDL.

El procesador necesita un reloj (clk) externo ya que ha sido modelado con máquinas de estados, se agregan pulsadores para iniciar y resetear el circuito, el propósito general es controlar un display VGA. La señal RGB representa los colores mientras que Hsync y Vsync permiten la sincronización con el display VGA, los LED permiten supervisar la cantidad de alimento disponible en el entorno para ser recolectada por las hormigas.

3.2. Procesador de hormigas

El procesador de hormigas tiene como propósito escribir la memoria RAM gráfica utilizando dos memorias RAM auxiliares, valiéndose de un generador de números pseudo-aleatorios para tomar ciertas decisiones. La memoria gráfica auxiliar hace pequeños *backups* de la memoria gráfica, según se requiera, esta memoria cuenta con 128 posiciones con una longitud por posición de 4 bits, RAM 128X4. La memoria de hormigas permite guardar información característica de cada hormiga en 32 posiciones de una longitud por posición de 39 bits, RAM 32X39. Se abastece de alimento el entorno cuando la cantidad disponible de este es cero, se agregan componentes que permiten visualizar la colonia de hormigas y sus interacciones. El controlador de acciones decide el orden de operación del controlador de hormigas, selector de posición, generador de gráfica de la hormiga, controlador de alimento y controlador de feromona. El temporizador permite definir y ajustar el tiempo de duración de un movimiento de las hormigas mediante un bucle de espera. Si no se ajusta esta velocidad, el proceso sería imperceptible visualmente, todo el proceso es sincrónico.

La figura 6 muestra el diagrama de bloques del generador de hormigas.

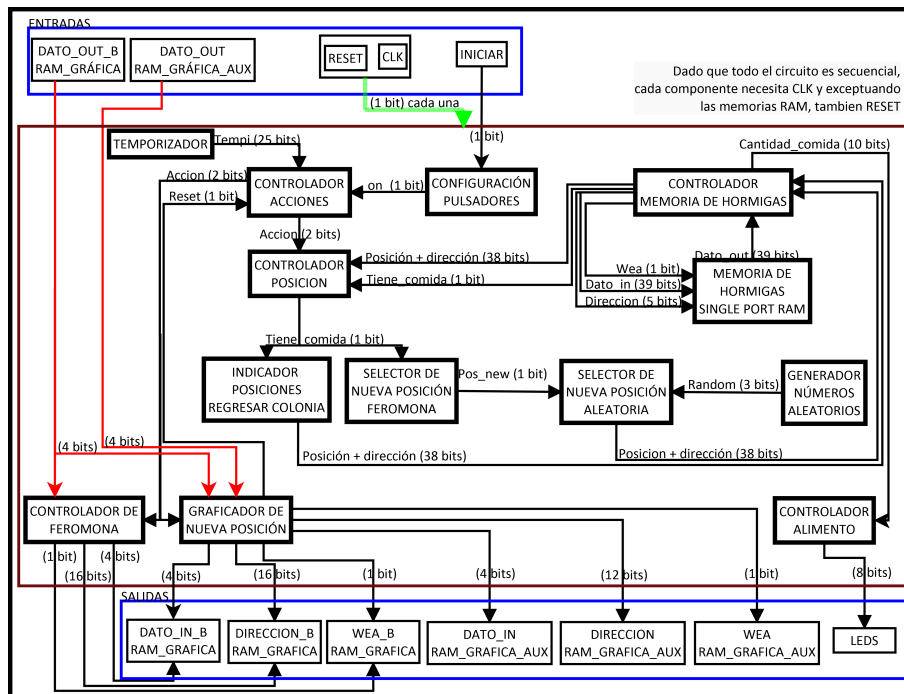


Figura 6. Diagrama de bloques del procesador de hormigas.

3.3. Circuitos auxiliares

Se diseña un procesador gráfico para controlar la pantalla VGA, se utiliza la técnica de visualización dinámica. El GPU está formado por tres componentes básicos: el controlador VGA, la unidad gráfica y la memoria RAM de doble puerto [12]. Permite visualizar dieciséis colores en pantalla. Adicionalmente se diseña un generador de números pseudoaleatorios, que

a diferencia de los aleatorios se repiten cada determinado periodo, este generador produce una secuencia de 256 números, el generador de hormigas los toma en orden diferente y aleatorio.

4. Resultados

4.1. Circuitales

Para validar la herramienta propuesta se configura la FPGA por medio del lenguaje de alto nivel definido por el IEEE, VHDL (Very-High-Speed Integrated Circuits Hardware Description Language). Se formula un experimento en el cual interactúan 32 hormigas en la búsqueda de fuentes de alimento con posición variable; implementar el circuito propuesto demanda los recursos presentados en la tabla I.

Tabla I. Recursos demandados por la implementación de la colonia de hormigas sobre la FPGA

Ítem	Usado	Disponible	Utilizado		
			GPU	P. Hormigas	Total
Slices	997	5888	1 %	15 %	16 %
Slice flip flops	486	11776	1 %	3 %	4 %
4 Input LUTs	1899	11776	2 %	14 %	16 %
IOBs (Input/Output block)	25	372	4 %	2 %	6 %
BRAMs	18 (82Kb)	20 (92Kb)	85 %	5 %	90 %
GCLKs	1	24	3 %	1 %	4 %

Como se puede observar en la tabla I el uso de recursos de la FPGA es mínimo, exceptuando la memoria RAM a causa del procesador gráfico (GPU), quien utiliza casi por completo este recurso. A pesar de la complejidad del circuito diseñado se logra implementar usando unidades básicas como Slices, Flip Flops, Luts, IOBs y memoria RAM; este hecho hace aún más evidente la gran ventaja que conlleva usar circuitos lógicos programables para diseñar procesadores. La implementación sobre FPGA tiene serias limitaciones de tamaño en memoria RAM, para solucionarlo se debe pensar en utilizar memorias externas incluidas en módulos de desarrollo o acopladas de forma manual cuando se requiera modelar colonias de mayor tamaño (escalar el sistema).

Los datos descritos en la tabla II son válidos bajo experimentos sobre una colonia conformada por 32 miembros, que realiza cinco movimientos por segundo. Considerando que el circuito realiza un movimiento de las hormigas y actualización del rastro de feromona en aproximadamente 1.7 mili segundos, el procesador de hormigas está inactivo el 99.15 % del tiempo de implementación para los experimentos propuestos.

Tabla II. Resultados de la implementación de la colonia de hormigas

Duración de Ítem	Mínimo [ms]	Máximo [ms]	Máximo escalamiento de Ítem	Valor
Un movimiento hormiga	0.0301	0.0332	Movimientos de la colonia por segundo (32 hormigas)	591
Actualización feromona global	5.2763	5.2763		
Promedio un movimiento colonia	1.6912	1.6974	Cantidad de hormigas (cinco movimientos por segundo)	6004
Procesador de hormigas activo	8.456	8.4870		

El tiempo de síntesis, implementación y generación del archivo de programación para la FPGA no supera los dos minutos, procesos que se llevan a cabo en el entorno de desarrollo ISE[®] Web Pack. La configuración del dispositivo de destino se realiza en la herramienta iMPACT[®] de Xilinx[©].

En la tabla III se presenta una comparación entre las principales características de la herramienta Netlogo y el procesador de hormigas. Una distinción inmediata de estos datos, es que el procesador es capaz de realizar modificaciones referentes a la posición y cantidad de alimento en el entorno.

Tabla III. Comparación herramienta Netlogo y procesador de hormigas

Ítem	Netlogo	Procesador hormigas
Máxima cantidad de hormigas	200	6004
Máxima cantidad movimientos colonia por segundo	321	591
Cambios de dirección	22.5°	45°
Modificar radio de difusión de feromona	Sí	Sí
Modificar frecuencia de evaporación de feromona	Sí	Sí
Modificar cantidad de comida en el entorno	No	Sí
Modificar posición de comida en el entorno	No	Sí
Habilitar auto-inserción de comida en el entorno	No	Sí
Supervisar cantidad de comida en el entorno	Sí	Sí
Supervisar variables características de las hormigas (posición, dirección, estado)	No	Sí
Variar parámetros del algoritmo de hormigas	Sí	Sí

Los valores asociados a la variación en la cantidad de hormigas y los movimientos por segundo de estas son inversamente proporcionales, es decir, si uno de los dos se configura en su máximo valor el otro se situará en el valor inicial de escalamiento; para el experimento propuesto, 32 hormigas y 5 movimientos por segundo, dicha dependencia se puede aproximar a la siguiente ecuación:

$$y_{max}[k] = \frac{1}{33,2 * 10^{-6} * k + 659,59 * 10^{-6}} \quad (11)$$

Donde k representa el número de hormigas en la colonia y y el máximo número de movimientos que las k hormigas pueden realizar en un segundo.

4.2. Cómputo emergente: una aproximación hacia la complejidad

Funcionalmente el procesador diseñado replica correctamente las características principales del proceso de recolección de alimento en una colonia de hormigas en una interfaz gráfica de resolución 256X256 [19]. En este sentido el procesador logra recrear la dinámica emergente de un sistema complejo sobre la base de una arquitectura computacional relativamente sencilla dados los costos de la implementación FPGA, podría entonces pensarse en escalar este sistema a la implementación de colonias más grandes. El crecimiento de recursos del procesador en la medida que la colonia se hace más grande solo afectaría el tamaño de las memorias RAM, especialmente la gráfica, tal crecimiento en la cantidad de recursos demandados obedecería una relación exponencial decreciente y para colonias más grandes casi que no sería notoria, así que la apreciación sobre la emergencia de comportamiento y simplicidad arquitectural no se ve limitada al caso particular aquí tratado.

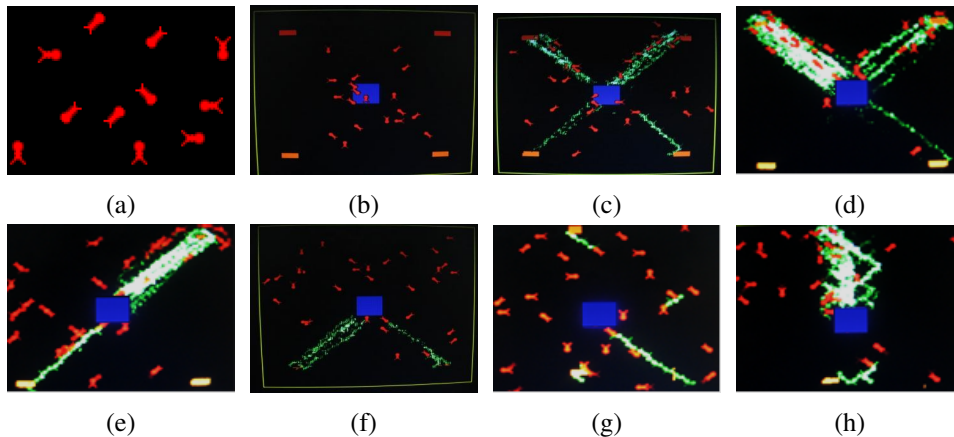
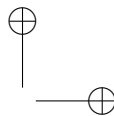
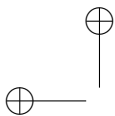


Figura 7. Resultados de la implementación hardware para simular una colonia de hormigas. a) Diseño gráfico de las hormigas. b) Hormigas abandonando la colonia en busca de alimento. c) Hormigas construyendo caminos de feromona. d) Rastro de feromona saturado. e) Desaparición del primer rastro de feromona saturado. f) Alimento recolectado por completo. g) Inserción de nuevo alimento en el entorno. h) Creación de nuevos caminos de feromona.

El procesador modela la sucesión de acciones para cada hormiga y el entorno en el cual estas se desarrollan. Como se analizaba en la sección 3, se espera que la interacción de estas acciones a través de la información de feromona, den lugar al proceso de recolección de alimento; el proceso demuestra auto-organización, como se evidencia en la figura 7, en un principio las hormigas vagan desorientadas y la primera fuente de alimento que hallan se desabastece exponencialmente, así con las otras tres, una a una, al acabarse la comida e introducirse una nueva fuente de esta, se repite el proceso de desabastecimiento exponencial. La aproximación al decrecimiento y actualización de la información de feromona no afecta la creación de caminos óptimos entre la colonia y las fuentes de alimento. La selección heurística de las



nuevas posiciones permite a las hormigas localizar rápidamente las fuentes de alimento encontradas por compañeras, en la implementación es posible variar el número de hormigas en la colonia desde 1 hasta 32. La cantidad de alimento recolectado en un tiempo determinado crece exponencialmente conforme a la cantidad de hormigas que estén involucradas en el proceso, tales fenómenos son totalmente emergentes y es comprobable experimentalmente con colonias reales [19].

5. Conclusiones y expectativas futuras

Se ha presentado un procesador de propósito específico que permite desarrollar experimentos sobre el proceso de recolección de alimento en una colonia de hormigas evidenciable gráficamente por medio de una pantalla VGA. El acondicionamiento aplicado al algoritmo Ant-Cycle System para su implementación sobre FPGA permitió describir correctamente el comportamiento de una colonia de hormigas, comprobando así el uso de la feromona para encontrar el camino más corto hacia los alimentos y la rapidez con la que se abastece la colonia luego de que una hormiga encuentra alimento por primera vez [19].

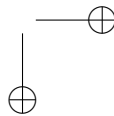
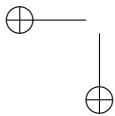
Se demuestra entonces que un sistema estructuralmente sencillo, dado los recursos necesarios para su implementación sobre FPGA (tabla I), es capaz de simular la complejidad del proceso de recolección de alimento de una colonia de hormigas. El hardware configurable facilita el diseño e implementación puesto que permite definir el tamaño de los registros y operadores.

Como se muestra en la tabla III, el procesador diseñado supone una mejora en el campo de simulaciones de colonias de hormigas con respecto a la herramienta de Netlogo [10], en la medida en que permite variar una cantidad superior de parámetros en la formulación de experimentos y supervisar una cantidad superior de variables en su implementación.

El desarrollo del trabajo utiliza dos procesadores en paralelo requiriendo así el uso de una memoria RAM de doble puerto. Para pensar en un escalamiento bajo el mismo kit de desarrollo una opción sería operar estos dos procesadores en serie. Un módulo adicional se encargaría de dar acceso a memoria al uno u otro y de esta manera poder utilizar una memoria RAM de puerto único, el kit de desarrollo utilizado incluye una memoria DDR2 SDRAM de 512Mbit (32M x 16) la cual sería usada para reemplazar la memoria distribuida interna de la FPGA. Lo anterior solucionaría la limitación en memoria RAM de la implementación realizada permitiendo escalar de una matriz gráfica 256x256 a 4096x4096 (un campo de experimentos 256 veces más grande que el actual) y de almacenar dieciséis datos posibles a 65536.

Un estudio interesante que podría desprenderse, sería realizar el proceso propuesto agregando un depredador en el entorno, puesto que las hormigas deberían encontrar una ruta a la comida evitando a dicho depredador. Esta variación en el entorno aumentaría la complejidad del proceso de recolección de alimento.

Otra idea podría orientarse a la competencia entre hormigas, más exactamente entre diversas especies (el presente artículo solo se trató el tema de cooperación). Existen especies de hormigas esclavistas, que en competencia con otras especies buscan no solo eliminar sino, si es posible, subyugar a otras para su colonia. En la lucha por abastecerse de alimento, cada es-

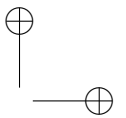
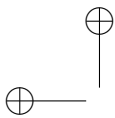


pecie desarrolla estrategias para sobrevivir, fenómeno que permite un análisis de las colonias en su rol de competencia.

Una vía de investigación alternativa puede referirse a la comparación entre algoritmos de colonias de hormigas y algoritmos genéticos. Si se trata a la colonia de hormigas como un problema de optimización combinatorial sería posible un eventual modelamiento bajo un algoritmo genético, de esta manera se avanzaría en la descripción del comportamiento de las hormigas. La aplicación es viable en la medida en que los algoritmos de hormigas aún tienen muchos vacíos en la descripción del comportamiento global. Por ejemplo, para este tipo de algoritmos aún no existe una directriz clara de cómo las hormigas vuelven a la colonia. Esta iniciativa tendría como soporte las investigaciones realizadas en [20].

Referencias

- [1] Patricia J. Folgarait y Alejandro G. Farji-brener, Un mundo de hormigas. 1ª edición, Buenos Aires, Argentina, 2005, pp. 15-18.
- [2] M. Dorigo, Marco Birattari and Thomas Stutzle, University Libre Bruxelles, Belgium, "Ant Colony Optimization, Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique", IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 1, No.4, November, 2006.
- [3] S. Das, S. Vaze, G.Singh and E., Buehler, University Libre Bruxelles, Belgium, "Ant Colony Optimization, Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique", IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 1, No.4, November, 2006, pp. 28-39.
- [4] M. Dorigo. Optimization, Learning and Natural Algorithms. PhD thesis, Dipartimento di Elettronica, Politecnico di Milano, Milan, 1992.
- [5] Xiang-yang Deng, Wen-long Yu and Li-min Zhang, A new ant colony optimization with global exploring capability and rapid convergence. Intelligent Control and Automation (WCICA), 2012, 10th World Congress on IEEE, July, 2012, pp. 2055-2057.
- [6] H.Y. Markid, B.Z. Dadaneh and M.E. Moghaddam, Bidirectional ant colony optimization for feature selection. Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP), 2015 International Symposium on. IEEE, March, 2015, pp. 53-58.
- [7] Li, Shih-An, Yang, Min-Hao, Weng, Chung-Wei, Chen Yi-Hong, Lo Chia-Hung and Wong Ching-Chang, Ant colony optimization algorithm design and its FPGA implementation. Intelligent Signal Processing and Communications Systems (ISPACS), 2012 International Symposium on. IEEE, November 2012, pp. 262-265.
- [8] Huang, Hsu-Chih and A Taguchi-Based, Heterogeneous Parallel Metaheuristic ACO-PSO and Its FPGA Realization to Optimal Polar-Space Locomotion Control of Four-Wheeled Redundant Mobile Robots. Industrial Informatics, IEEE Transactions on. 2015, pp. 1-8.
- [9] Clive Max Maxfield, FPGAs: Instant Access, Elsevier, 2008, 1-12.
- [10] U. Wilensky, NetLogo, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1999, disponible en: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- [11] Chia-Feng Juang, Chi-Wei Hung and Chia-Hung Hsu, Rule-Based Cooperative Continuous Ant Colony Optimization to Improve the Accuracy of Fuzzy System Design. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on. IEEE,, Volumen, 22, Edición 4, August, 2014, pp. 723-735.
- [12] O. Wongwirat and A. Anuntachai, Searching energy-efficient route for mobile robot with ant algorithm. Control, Automation and Systems (ICCAS), 2011, 11th International Conference on. IEEE, August, 2011, pp. 1071-1075.
- [13] Du Xiang-run, Zhang Jian-long and Feng Min-quan, Water supply route optimization for reservoir emergency based on improved ant colony algorithm, Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese. IEEE. June, 2014, pp. 1354-1359.



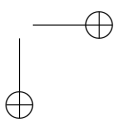
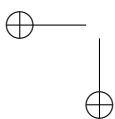
- [14] D.O. Sales, M. A. Dias and F. S. Osorio, Grid Ant Colony Optimization Applied to a Multi-robotic Garbage Collection System. Robotics: SBR-LARS Robotics Symposium and Robocontrol (SBR LARS Robocontrol), Joint Conference on. IEEE, October, 2014, pp. 187 - 192.
- [15] Xing Wei, Zhiyuan Li, Jingjing Qu. Research on parameters optimization and simulation of the Ant Colony Algorithm. Cyberspace Technology (CCT 2014), International Conference on. IEEE, 2014. Páginas: 1 – 4.
- [16] S. Brown, Fundamentos de lógica digital con diseño VHDL, 2ª edición, McGraw Gil, Ciudad de México, México, 2006, Cap 10, sec 10.2.
- [17] Jinbiao Wang and Kaichi Wang, Union-Intersection Ant System. Theories and Applications (BIC-TA), 2010 IEEE, Fifth International Conference on. IEEE, September, 2010, pp. 364-371.
- [18] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colomi. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 26(1):29–41, 1996.
- [19] J.-L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, and J. M. Pasteels. The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant, Journal of Insect Behavior, 3(2), 1990, pp. 159-168.
- [20] Sergio Rojas Galeano, Optimización de rutas mediante computación bioinspirada, un paralelo entre hormigas artificiales y algoritmos genéticos, Revista de Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Vol. 7, Núm. 14, 2004, pp. 97-104.
- [21] Funcionamiento de la colonia de hormigas, S.f., disponible en: https://www.dropbox.com/s/tt7dk57yo47gfs/Evidencia_colonia_hormigas.AVI?dl=0
- [22] Archivos de descripción VHD para cada componente circuital del proyecto, S.f., disponible en: https://www.dropbox.com/s/jf9x3npcc9gt3vv/proyecto_colonia_hormigas.rar?dl=0

Cristian David Rodríguez Rodríguez

Estudiante Ingeniería Electrónica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, D.C., Colombia; miembro del Laboratorio de Automática e Inteligencia computacional LAMIC.
e-mail: cridrodriguezr@correo.udistrital.edu.co

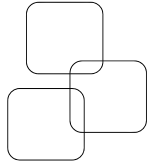
Miguel Alberto Melgarejo Rey

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Ingeniería Electrónica y Computadores, Universidad de los Andes; doctorando en Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana; profesor asociado, Facultad de ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas; miembro del Laboratorio de Automática e Inteligencia Computacional (LAMIC).
e-mail: mmelgarejo@udistrital.edu.co



Citación: Rodríguez, J. S. y Prieto, F.(2015). Análisis y comparación del descriptor *Cone curvature* frente al reconocimiento de expresiones faciales.
En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 261–275
© Los autores. Titular de los derechos de reproducción: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI:
<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.2.a06>

Artículo de Investigación



Julián S. Rodríguez
Universidad de San Buenaventura
Bogotá
jrodriguez@usbog.edu.co

Flavio Prieto
Universidad Nacional de Colombia
fprieto@unal.edu.co



Análisis y comparación del descriptor *Cone curvature* frente al reconocimiento de expresiones faciales

Analysis and comparison of the cone curvature descriptor in facial gesture recognition tasks

Resumen

Se presenta el resultado de analizar el comportamiento del descriptor de forma *Cone Curvature* (CC) en la tarea de reconocimiento de expresiones faciales en imágenes 3D. El descriptor CC es una representación del modelo 3D que se calcula a partir de un conjunto de ondas de modelado para cada vértice de una malla poligonal. Se empleó la base de datos de rostros 3D (BU-3DFE), la cual contiene imágenes con seis expresiones faciales. Con el uso del descriptor CC, las expresiones fueron reconocidas en un porcentaje promedio del 76.67 % con una red neuronal y del 78.88 % con un clasificador bayesiano. Al realizar una combinación del descriptor CC con otros descriptores como DESIRE y *Spherical Spin Image*, se logró un porcentaje promedio de reconocimiento de gestos del 90.27 % y del 97.2 %, usando los mismos clasificadores mencionados previamente.

Palabras claves: Descriptores de forma, reconocimiento facial, visión artificial.

Abstract

This article presents the results of analyzing the behavior of the Cone Curvature shape descriptor (CC) in the task of recognition of facial expressions in 3D images. The CC descriptor is a representation of the 3D model computed from a set of waves modeling for each vertex of a polygon mesh. The 3D Facial Expression Database (BU-3DFE) was used, which contains images with six facial expressions. With the use of the CC descriptor, the expressions were recognized in an average percentage of 76.67 % with a neural network, and of 78.88 % with a Bayesian classifier. By combining the CC descriptor with other descriptors such as DESIRE and *Spherical Spin Image*, it was achieved an average percentage of gesture recognition of 90.27 % and 97.2 %, using the mentioned classifiers.

Key words: Artificial vision, facial recognized, shape descriptors.

Recibido: 15-05-2015
Modificado: 07-08-2015
Aceptado: 24-08-2015

1. Introducción

Recientemente se ha despertado un fuerte interés por el reconocimiento automático de expresiones faciales, lo cual posee variadas aplicaciones, que van desde el desarrollo de interfaces hombre-máquina, sistemas de seguridad que detectan comportamientos “sospechosos” en sitios públicos, hasta la posibilidad de desarrollar robots que interactúen con humanos, de acuerdo con expresión manifestada por estos últimos.

El psicólogo Paul Ekman [1], uno de los pioneros del reconocimiento de emociones mediante el análisis de expresiones faciales, definió seis grandes expresiones: alegría (HA), disgusto (DI), miedo (FE), enojo (AN), sorpresa (SU) y tristeza (SA). Se han desarrollado diferentes técnicas para reconocer dichas expresiones faciales, algunas de ellas basadas en imágenes 2D estáticas [2], otras basadas en secuencias de imágenes empleando aproximaciones por flujo óptico [3], [4], por rastreo de características [5], o por alineamiento del modelo [6]. Generalmente, los trabajos de reconocimiento de expresiones a partir de imágenes 2D, presentan inconvenientes, como sensibilidad a la variación en la iluminación, orientación y escala. También se han reportado desarrollos de reconocimiento facial en tres dimensiones [7]–[9]. El objetivo de realizar un análisis con modelos 3D del rostro, es obtener características que sean invariantes a estos parámetros, lo que permite mayor robustez y confiabilidad en los resultados obtenidos.

Los descriptores de forma se han empleado con el objetivo de realizar reconocimiento de objetos 3D, dándole utilidad práctica en tareas como inspección visual, guiado de robots, reconocimiento de rostros y control de calidad. En particular, en la tarea de reconocimiento de rostros dichos descriptores son de mucha utilidad, debido a la gran cantidad de información morfológica que pueden extraer. Algunos trabajos se han centrado en obtener ciertas características del rostro humano, como en [10], donde mediante el uso de las imágenes *spin* se localizan tres puntos característicos del rostro: la punta de la nariz y los puntos que definen el ángulo interno de cada uno de los ojos; en [11] se analizan varios descriptores basados en curvatura. En otros trabajos como en [12] y [13], se han hecho revisiones acerca de los métodos empleados para realizar reconocimiento facial. En [14] se realiza este reconocimiento basándose en las propiedades de los segmentos de línea que unen algunos puntos característicos del rostro, obteniendo un desempeño promedio de reconocimiento del 87.1 %. Wang en [15] realiza también un estudio del reconocimiento de expresiones en mallados 3D, basándose en las curvaturas principales. En [16] se realiza un análisis comparativo de dos descriptores de forma, *Spherical Spin Image* (SSI) y DESIRE, para determinar el de mejor desempeño ante el reconocimiento de expresiones faciales en modelos 3D. En el presente trabajo se realiza la implementación del descriptor *Cone Curvature* (CC) sobre modelos 3D del rostro; los resultados obtenidos son comparados con los obtenidos en [16] para los descriptores DESIRE y SSI, además se hace una combinación de todos los descriptores y se evidencia la mejoría en los resultados de reconocimiento de expresiones.

El descriptor *Cone Curvature* (CC) ha mostrado ser eficiente en el reconocimiento de objetos [17], por este motivo se realizó el estudio con este descriptor para verificar su desempeño frente al reconocimiento de expresiones faciales en modelos 3D. Los resultados de este estudio son útiles para comparar la capacidad de reconocimiento de expresiones faciales utilizando este descriptor *versus* los resultados obtenidos con otros descriptores de forma, lo que permitirá seleccionar el método adecuado para reconocer expresiones faciales para posibles aplicaciones como interfaces avanzadas hombre-máquina.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2 se hace una breve explicación acerca de los fundamentos del descriptor empleado, así como de los utilizados en [16]. En la Sección 3 se describen los análisis realizados para evaluar la efectividad del descriptor CC en la tarea de clasificación de gestos faciales. En la Sección 4 se muestran los resultados de reconocimiento del descriptor tras entrenar dos tipos de clasificadores, también se realiza la combinación del descriptor CC con otros dos descriptores de forma, de igual forma se presenta el análisis de los resultados obtenidos y se hace la comparación con lo obtenido en [16]. Finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sección 5.

2. Descriptores de forma

Los descriptores de forma son herramientas matemáticas que permiten extraer, en forma de datos numéricos, información acerca de la geometría de un objeto 3D. Un buen descriptor debe tener invarianza con respecto a traslación, rotación, escala y reflexión del modelo 3D, además debe ser robusto frente al ruido presente en la superficie y a valores atípicos. A continuación se hace una breve descripción del descriptor *Cone Curvature* (CC) implementado en este trabajo, así como de otros dos descriptores: *Spherical Spin Image* y DESIRE, implementados en [18] y [19] respectivamente. Dichos descriptores fueron combinados con el descriptor CC para evaluar o mejorar su desempeño en la tarea de reconocimiento de expresiones faciales.

2.1. Cone Curvature (CC)

Antes de definir el descriptor *Cone Curvature* es necesario describir los conjuntos de onda de modelado (MWS) [20], dichos conjuntos relacionan subconjuntos de nodos en una malla triangular T de un objeto (Modelo 3D), organizando los nodos en puntos concéntricos, dispuestos alrededor de un vértice N perteneciente a T . Cada uno de los grupos concéntricos (figura 1) se llama un *wave front* (WF), y el nodo inicial N de cada uno de ellos se conoce como foco. Todas las posibles ondas de modelado (MW) que se pueden generar sobre T , se conocen como conjunto de ondas de modelado. Entonces, $MWS = \{MW^1, MW^2, \dots, MW^q\}$, donde MW^i es la onda de modelado generada a partir del foco N , que corresponde con el i -ésimo vértice de la malla T .

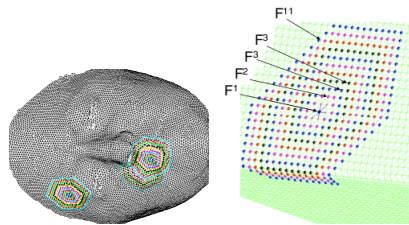


Figura 1. WF en diferentes focos sobre el modelo 3D del rostro (Izquierda). Diferentes frentes de ondas de un nodo N (derecha) [21].

El *Cone Curvature* es una representación del modelo 3D, que se calcula a partir del MWS para cada nodo de la malla y cuya definición en [22]: se llama *Cone Curvature* (CC) j -ésimo de N (α^j), al ángulo del cono con vértice N cuya superficie está aproximada al j -ésimo frente de onda (F^j), de la onda de modelado asociada a N . Formalmente:

$$\alpha^j = \text{sign}(F^j) \cdot \left| \frac{\pi}{2} - \frac{1}{t_j} \sum_{i=1}^{t_j} \gamma_i^j \right|, \quad (1)$$

donde $\gamma_i^j = \angle C^j N N_i$, $N_i \in F^j$, t_j es el número de nodos de F^j y C^j es el baricentro de F^j .

El rango de valores de la CC es $[-\pi/2, \pi/2]$, donde el signo toma en cuenta la localización relativa de O , C^j y N , siendo O el origen de coordenadas del sistema de referencias fijo a T . Un signo negativo indica zonas cóncavas, valores cercanos a cero se corresponden a superficies planas y valores positivos son zonas convexas. La figura 2 ilustra la definición del CC.

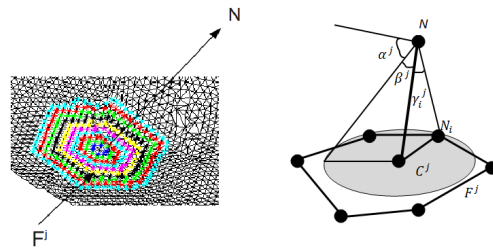


Figura 2. Definición del Cone Curvature [22].

Dado un foco N , existe un conjunto de frentes de onda que determina todas las CC para N $\{\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^q\}$, las cuales proporcionan información acerca de la curvatura del objeto desde el punto de vista de N . La información de la curvatura del objeto es útil en el reconocimiento de expresiones faciales porque en cada expresión las diferentes regiones del rostro, y en particular la de la boca, cambian su forma, lo que implica un cambio en la curvatura de la región desde el punto de vista de cada vértice para el cual se calcula el CC. El algoritmo 1 ilustra los pasos para obtener las CC, previo cálculo del WM y los baricentros de cada uno de los frentes de onda.

El resultado, luego de calcular el CC a un modelo 3D, es una matriz de $h \times q$ donde h corresponde al número de vértices pertenecientes al modelo y q el número de frentes de onda considerado para cada foco. En [22] se demuestra que un valor de q mayor tiene mejores resultados, allí se experimentó con niveles de $q = 2, 6, 8, 14$ y 16 . Considerando el tiempo de cálculo del descriptor y teniendo en cuenta que en promedio el número máximo podría ser de quince para la región de la boca (figura 3), en el presente trabajo se consideró $q = 10$.

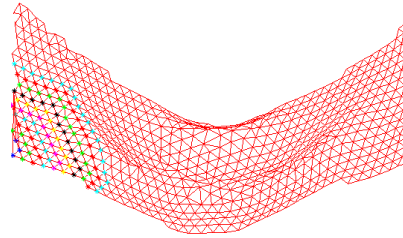


Figura 3. diez frentes de onda en la región de la boca. Se podrían tener un máximo promedio de 15 frentes de onda.

Algorithm 1 Cone Curvature

Require: foco N , arreglo de baricentros, wf (coordenadas de los puntos de cada frente de onda)

```

for indice < cantidad de wf do
    baricentro  $\leftarrow$  arreglo de baricentros(indice)
    Cálculo de parámetro  $\gamma$ 
    distancia baricentro  $\leftarrow$  cálculo de la distancia entre baricentro y origen  $\gamma$ 
    distancia Foco  $\leftarrow$  cálculo de la distancia entre  $N$  y el origen  $\gamma$ 
    if distancia baricentro > distancia foco then
        signo  $\leftarrow$  -1
    else
        signo  $\leftarrow$  1
    end if
    cálculo de  $\alpha$ (indice)
end for
    
```

2.2. Spherical Spin Image (SSI)

El descriptor *Spherical Spin Image* (SSI) [18] comprende una serie de imágenes descriptivas asociadas con los puntos de orientación en la superficie de un objeto. Estas imágenes se crean mediante la construcción de un sistema de coordenadas 2D sobre un punto orientado (punto 3D con vector normal n). Una Imagen *Spin* de un punto p es un histograma 2D donde cada píxel es un bin que almacena el número de vecinos que están: a una distancia α a partir de n y a una profundidad β de su plano tangente p (Figura 4).

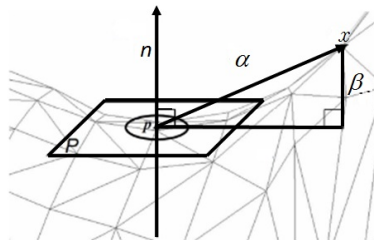


Figura 4. Punto orientado para la extracción de *Spherical Spin Image* [18].

2.3. DESIRE

El descriptor DESIRE [19] es un descriptor compuesto conformado por imágenes de profundidad (**DE**pth), siluetas (**SI**) y rayos extendidos de una malla poligonal (**RA**y-**EX**tent). El vector de características (**DE**) describe la distancia del objeto desde una cara de un cubo canónico, midiendo la distancia entre las direcciones que son perpendiculares a la cara del cubo. El vector de siluetas (**SI**) caracteriza los puntos de contorno de proyecciones ortogonales del modelo sobre un cubo de acotamiento. El vector (**RE**) proporciona información acerca de la extensión del objeto desde el centro de gravedad a lo largo de las direcciones radiales. La Figura 5 ilustra cada uno de los tres componentes de este descriptor.

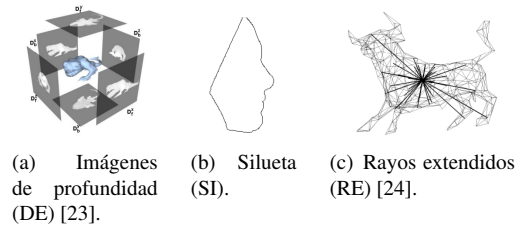


Figura 5. Los tres componentes del descriptor DESIRE.

3. Análisis de similitud

3.1. Base de datos

La base de datos empleada para el desarrollo de este trabajo es la BU-3DFE (Binghamton University 3D Facial Expression) [25], la cual está disponible con fines de investigación y contiene 100 imágenes de personas (56 mujeres, 44 hombres), que van desde los 18 hasta 70 años de edad, con una variedad de grupos étnicos/raciales, incluyendo blanco, negro, asiáticos, indio y latinos hispanos. Cada persona realizó seis expresiones: alegría (HA), disgusto (DI), miedo (FE), enojo (AN), sorpresa (SU) y tristeza (SA); frente a un escáner 3D. Estas imágenes tienen formato vrml y están constituidas por mallas triangulares. La figura 6 muestra algunos modelos de la base de datos.



Figura 6. Ejemplos de modelos pertenecientes a la base de datos empleada [25].

3.2. Clasificación por distancia

Una forma de encontrar similitudes entre vectores característicos es calcular la distancia entre ellos. Para verificar dicha similitud, se extrajo el descriptor CC a un conjunto de imágenes de la base de datos para cada gesto, se calculó la distancia entre el vector característico de una imagen de búsqueda representativa de cada gesto denominada Q (Q_{AN} , Q_{DI} , Q_{FE} , Q_{HA} , Q_{SA} , Q_{SU}) y los vectores característicos de otras 300 imágenes, de las cuales 50 corresponden a la misma clase de Q . Idealmente se espera que las distancias entre el vector de características de la imagen buscada y cada una de las 50 imágenes del gesto correspondiente sean las menores. Luego de calcular el descriptor CC se tiene una matriz de tamaño $h \times q$, donde h es el número de focos considerados, mientras que q corresponde a la cantidad de WF. De esta forma, la distancia entre dos modelos T_m y T_n se define de como [22]:

$$d^j(T^m, T^n) = \sqrt{\sum_{k=1}^h (\theta_{(k,j)}^m - \theta_{(k,j)}^n)^2}, \quad (2)$$

donde, θ_1 y θ_2 son las matrices de CC para cada modelo. Para cada pareja de modelos (m , n) se obtiene un vector de distancias $\{d^1, d^2, \dots, d^q\}$.

Como medida de similitud se utilizó la métrica de distancia norma-infinito l_∞ , calculada de acuerdo a la ecuación 3:

$$d(T^m, T^n) = \max |d^j(T^m, T^n)|, j = 1, 2, \dots, q. \quad (3)$$

La tabla I muestra la tasa de modelos con la menor distancia $d(T^m, T^n)$ aplicada al descriptor CC de 50 modelos y sobre la región de la boca. De esta forma, por ejemplo, en la primera fila de la tabla I se indica que de las 50 imágenes correspondientes a la expresión de enfado (AN), las primeras dieciocho posiciones fueron ocupadas por imágenes de AN por lo que se tiene una tasa de aciertos del 36 %. El descriptor CC fue extraído únicamente sobre la región de la boca debido a la gran cantidad de cálculos que deben ser realizados para obtenerlo; en promedio el rostro tiene 10000 vértices, si se quisiera extraer el descriptor para todo el rostro el sistema de reconocimiento sería inviable.

Tabla I. Aciertos del descriptor Cone Curvature sobre la región de la boca

Expresión	Casos	Porcentaje
AN	18	36 %
DI	4	8 %
FE	8	16 %
HA	10	20 %
SA	10	20 %
SU	30	60 %

En [16] se realizó un análisis similar al presentado en la tabla I pero para el descriptor DESIRE, dicho análisis muestra que para este tipo de clasificación por norma-infinito el descriptor CC presenta un desempeño más bajo.

3.3. Reducción de dimensionalidad

El descriptor implementado tiene alta dimensionalidad lo que puede dificultar el entrenamiento de algunos clasificadores y, en general, consume gran cantidad de recursos computacionales. Además, en muchas ocasiones las componentes del descriptor pueden estar correlacionadas o no aportar información importante para el problema de clasificación. Por lo anterior, con el objetivo de reducir la dimensión de los vectores característicos del descriptor, se emplea la técnica del análisis de componentes principales (PCA) y, de acuerdo a [22], el uso de las dos componentes principales asegura más del 90 % de la variabilidad de los gestos. Con el uso de estas dos componentes principales como características se repitió el experimento de cálculo de las distancias, obteniendo los resultados presentados en la tabla II.

Tabla II. Aciertos del descriptor Cone Curvature luego de aplicar PCA

Expresión	Casos	Porcentaje
AN	40	80 %
DI	43	86 %
FE	27	54 %
HA	33	66 %
SA	30	60 %
SU	50	100 %

Comparando las tablas I y II se evidencia el mejor desempeño en la clasificación de los gestos cuando se usan las características más relevantes proporcionadas por el PCA.

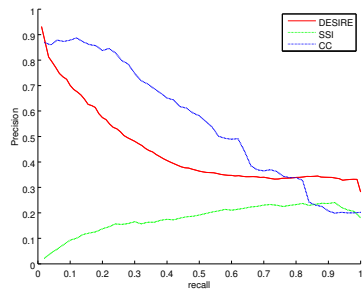
Con el objetivo de verificar la similitud entre imágenes de una misma expresión, se dividió el conjunto de 100 imágenes por gesto en dos subconjuntos de 50 imágenes cada uno, a estos subconjuntos de se calcularon los vectores característicos por cada expresión y se calculó la distancia entre promedios. Los resultados se encuentran en la tabla III, donde se aprecia la efectividad del descriptor CC, solamente la expresión de miedo (FE) no presentó la menor distancia con su correspondiente, sin embargo esta fue la segunda menor distancia.

3.4. Análisis del desempeño mediante curvas precision-Recall

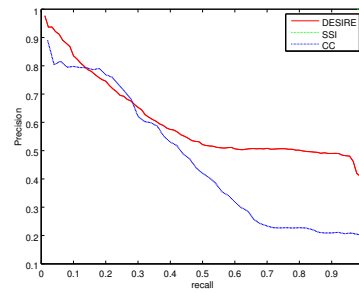
La precisión se define como la fracción de imágenes recuperadas que son relevantes entre el total de imágenes. Recall es la fracción del número de imágenes relevantes que han sido correctamente recuperadas, mide la capacidad de recuperar las imágenes que son relevantes dentro de todo el conjunto [24]. Se obtuvo la curva precision-Recall del descriptor CC y se comparó con las curvas realizadas en [16], para evaluar su desempeño contra los descriptores DESIRE [24] y SSI [18].

Tabla III. Distancias entre promedios para el descriptor CC con reducción de dimensionalidad sobre la región de la boca

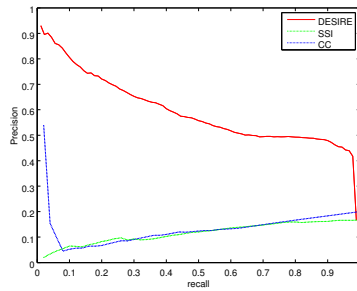
	AN	DI	FE	HA	SA	SU
AN	0,1037	0,1097	0,1937	0,2549	0,1995	2,7498
DI	0,0835	0,0602	0,1061	0,1673	0,1119	2,7994
FE	0,1806	0,0895	0,0573	0,0722	0,0147	2,7989
HA	0,2664	0,1753	0,0865	0,0703	0,0711	2,7697
SA	0,1787	0,1089	0,1056	0,0894	0,0434	2,7506
SU	2,8417	2,8478	2,8445	2,8283	2,7823	0,0214



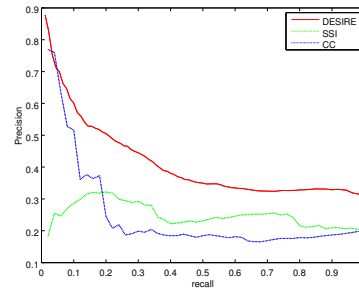
(a) Expresión enojo (AN).



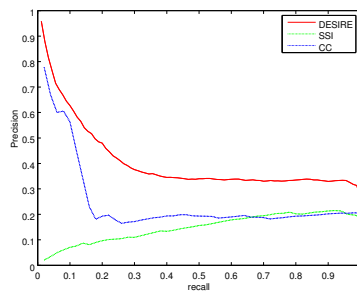
(b) Expresión disgusto (DI).



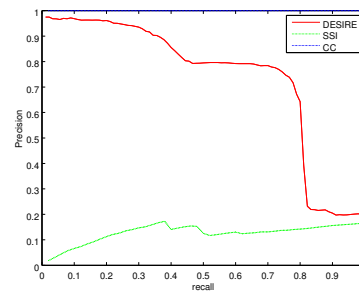
(c) Expresión miedo (FE).



(d) Expresión alegría (HA).



(e) Expresión tristeza (SA).



(f) Expresión sorpresa (SU).

Figura 7. Curvas Precisión-recall para cada uno de los descriptores en los seis gestos sobre la región de la boca luego de aplicar PCA.

La figura 7 muestra las curvas de precisión-recall de los tres descriptores para cada gesto, luego de realizar reducción de dimensionalidad. Se aprecia que el descriptor DESIRE tiene la mejor efectividad, en general, respecto a la recuperación de datos relevantes. Aunque para el caso de la expresión DI la mayor efectividad la tuvo el descriptor SSI y para la expresión SU el mejor comportamiento lo tiene CC.

3.5. Clasificación mediante análisis discriminante

Se generó un descriptor de diecisiete características $D_T = [x_1, x_2, \dots, x_{17}]$, conformado por las diez características del descriptor DESIRE, cinco características del descriptor SSI y las dos características arrojadas al aplicar PCA al descriptor CC. El Análisis Discriminante Lineal (LDA) permite tomar dicho vector y reducir la dimensionalidad, seleccionando un número inferior de características formadas como combinación lineal de las originales, las cuales proporcionan la mayor información discriminante. Luego de realizar LDA y aplicar una regresión lineal a las características obtenidas, para analizar el aporte de cada una de las características originales, se obtuvieron cinco funciones discriminantes es decir, el número de clases (seis gestos) menos uno, que separan linealmente cada una de las clases. Este análisis mostró que las características menos relevantes son las correspondientes al descriptor SSI.

El análisis LDA permite determinar cuales de las características son las más relevantes para la discriminación de las clases. Sin embargo, las funciones obtenidas también permiten separar linealmente los gestos, resultado que se usó para clasificación de gestos empleando el descriptor compuesto por los tres descriptores (D_T). La matriz de confusión para dicha clasificación se presenta en la tabla IV. Se observa el buen desempeño para los gestos AN, DI, SA y SU, el menor desempeño se obtuvo en el gesto FE.

Tabla IV. Matriz de confusión (en porcentajes) de la clasificación empleando LDA y el descriptor D_T

	LDA					
	AN	DI	FE	HA	SA	SU
AN	100	0	0	0	0	0
DI	0	100	0	0	0	0
FE	28	0	50	0	22	0
HA	16.67	0	0	83.33	0	0
SA	0	0	0	0	100	0
SU	0	0	0	0	0	100

4. Resultados

4.1. Clasificación no lineal

El análisis de similitud estudiado en la sección anterior permitió conocer cuál descriptor presenta mejor desempeño en la tarea de reconocimiento de gestos, mediante una análisis lineal de distancias entre vectores característicos. En esta sección se emplean dos clasificadores

no lineales: una red neuronal artificial y un clasificador bayesiano, para evaluar el desempeño del descriptor CC en la tarea de reconocer gestos faciales, se compara su desempeño contra los resultados obtenidos con los descriptores DESIRE y SSI reportados en [16]. Los clasificadores fueron entrenados con un conjunto de 50 imágenes de cada gesto y se evaluó su desempeño con otro grupo de veinte imágenes por gesto en la tabla V se presenta la matriz de confusión obtenida con los resultados de clasificación con los dos clasificadores usando solo el descriptor CC.

Tabla V. Matriz de confusión (en porcentajes) de cada clasificador para el descriptor Cone Curvature

	Red Neuronal						Bayesiano					
	AN	DI	FE	HA	SA	SU	AN	DI	FE	HA	SA	SU
AN	93.33	6.67	0	0	0	0	93.33	6.67	0	0	0	0
DI	13.33	80	6.67	0	10	0	13.33	80	0	0	6.67	0
FE	0	0	0	0	100	0	0	6.67	6.67	0	86.67	0
HA	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0
SA	0	6.67	0	6.67	86.67	0	0	0	6.67	0	93.33	0
SU	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100

Según lo observado en la tabla V, solo la expresión de miedo (FE) tuvo 0% de reconocimiento con la red neuronal y 6.67% con el clasificador bayesiano, las demás expresiones tuvieron una tasa de reconocimiento superior al 80%.

Con el objetivo de seguir evaluando el desempeño de los descriptores frente al reconocimiento de gestos, se planteó un segundo experimento que consiste en construir un vector de características, tomando los tres descriptores, es decir, el CC implementado en este trabajo junto con el DESIRE y el SSI implementados en [16] y realizar de nuevo la clasificación con los clasificadores mencionados. Para este experimento se obtuvieron los resultados presentados en la tabla VI, en la que se resumen las diagonales de las correspondientes matrices de confusión incluyendo las del clasificador con LDA (tabla IV). Se aprecia que solo hubo incremento en la tasa de verdaderos positivos para el gesto FE, con respecto a los resultados logrados con el descriptor CC. Además, las columnas 2 y 3 de la tabla VI muestran la capacidad discriminante no lineal del descriptor conformado por la concatenación de los tres descriptores (CC, DESIRE y SSI).

Tabla VI. Porcentaje de correcta clasificación combinando los tres descriptores (diagonal matriz de confusión)

Expresión	Red neuronal	Bayesiano	LDA
AN	66.67 %	100 %	100 %
DI	91.67 %	91.67 %	100 %
FE	100 %	83.33 %	50 %
HA	75 %	83.33 %	83.33 %
SA	91.67 %	83.33 %	100 %
SU	100 %	100 %	100 %

Finalmente, un tercer experimento consistió en construir un vector conformado por los descriptores de mejor desempeño individual, es decir, DESIRE y CC, y con las características

más relevantes según el análisis discriminante lineal. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla VII, en la que se observa que para el reconocimiento de los gestos AN y HA con la red neuronal, se presentó un descenso en el desempeño del 19,64 % y el 25 %, respectivamente. El reconocimiento de los demás gestos presentó una tasa de reconocimientos superior al 90 %.

Tabla VII. Porcentaje de correcta clasificación usando un descriptor que combina los descriptores DESIRE y CC.

Expresión	Red neuronal	Bayesiano	LDA
AN	75 %	100 %	100 %
DI	100 %	91.67 %	91.67 %
FE	100 %	100 %	91.67 %
HA	75 %	91.67 %	91.67 %
SA	91.67 %	100 %	100 %
SU	100 %	100 %	100 %

4.2. Discusión

Tanto el descriptor *Cone Curvature* (CC) implementado en este trabajo, como los descriptores DESIRE y *Spherical Spin image* han demostrado ser eficientes en el reconocimiento de objetos en 3D [18], [22], [24], dado este antecedente se evaluó su desempeño frente al reconocimiento de expresiones faciales. De acuerdo a los resultados de la tabla V, el descriptor CC tiene un aceptable desempeño en el reconocimiento de expresiones, salvo en la expresión de miedo (FE), lo cual puede atribuirse a la menor variabilidad en la curvatura de la región de la boca para esta expresión, en comparación con las demás. Los resultados de la tabla VII muestran que esta limitante del descriptor CC es corregida cuando se combina con el descriptor DESIRE, el cual tiene mejor desempeño que el descriptor *Spherical Spin Image* [16].

Por último, en la tabla VIII se comparan los resultados obtenidos con los reportados en [16]. Se aprecia que para todos los clasificadores se obtiene una mayor tasa de reconocimiento de los gestos faciales cuando se combinan los descriptores DESIRE y CC, que la tasa de reconocimiento obtenida solo con el descriptor DESIRE. El promedio relacionado en la tabla VIII corresponde al calculado para cada columna de la tabla VII.

Tabla VIII. Tasa de reconocimiento promedio

	Clasificador	Promedio de reconocimiento
DESIRE [16]	RNA	88.16 %
	Bayesiano	91.11 %
	LDA	80.5 %
DESIRE + CC	RNA	90.3 %
	Bayesiano	97.2 %
	LDA	95.8 %

5. Conclusiones

Se implementó el descriptor Cone Curvature sobre los modelos de rostros de una base de datos de imágenes 3D en la región de la boca, se evaluó su desempeño frente al reconocimiento de gestos faciales encontrando que tiene un buen desempeño previo entrenamiento de un clasificador basado en redes neuronales artificiales y un clasificador Bayesiano. El descriptor fue capaz de reconocer seis gestos con un desempeño promedio del 76.7 % usando el primer clasificador y del 78.88 % usando el segundo.

Al combinar el descriptor CC con otros descriptores implementados en trabajos anteriores se obtuvo un incremento del 13.6 % en la tasa de reconocimientos respecto al CC con la red neuronal, y del 18.3 % con el clasificador Bayesiano, lo cual permite concluir que un vector de características conformado por los descriptores *Cone Curvature* y *DESIRE* puede hacer parte de un sistema de reconocimiento con un alto grado de precisión. No obstante el buen desempeño de los descriptores, una limitante encontrada tiene que ver con el tiempo de cálculo del descriptor CC, cuyo promedio para la región de la boca (aproximadamente 1000 vértices) es de 25 minutos, lo cual lo haría poco viable para un sistema actuando en tiempo real; sin embargo, una implementación de los algoritmos en paralelo podría disminuir este tiempo de cómputo.

Aunque el análisis se realizó calculando los descriptores sobre la región de la boca, no solo porque se reduce considerablemente el tiempo de cálculo, sino porque además esta región es la de mayor variabilidad cuando se cambia la expresión, podría considerarse el análisis sobre otras regiones que involucren menos puntos, lo cual ayudaría a reducir los tiempos. La segmentación de la región de la boca se realizó de forma manual con la ayuda del software Meshlab [26], sin embargo, sería interesante explorar en un trabajo futuro, la implementación de un método de segmentación automática de la región de interés, para que el sistema pueda ser empleado en un proceso de reconocimiento automático.

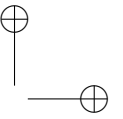
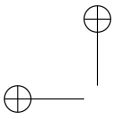
Referencias

- [1] P. Ekman *et al.*, "How do we determine whether judgments of emotion are accurate?," in *Emotion in the Human Face* (P. E. V. F. Ellsworth, ed.), vol. 11 of *Pergamon General Psychology Series*, pp. 15 – 19, Pergamon, 1972.
- [2] M. Rosenblum, Y. Yacoob, *et al.*, "Human emotion recognition from motion using a radial basis function network architecture," in *Motion of Non-Rigid and Articulated Objects, 1994., Proceedings of the 1994 IEEE Workshop on*, pp. 43–49, Nov 1994.
- [3] N. Tsapatsoulis, Y. Avrithis, and S. Kollias, "On the use of radon transform for facial expression recognition," in *Proc Int Conf on Information Systems Analysis and Synthesis (ISAS), Orlando, FL, August, 1999*.
- [4] R. Pericet-Camara, G. Bahi-Vila, J. Lecoeur, and D. Floreano, "Miniature artificial compound eyes for optic-flow-based robotic navigation," in *Information Optics (WIO), 2014 13th Workshop on*, pp. 1–3, July 2014.
- [5] J.-J. Lien, T. Kanade, J. F. Cohn, and C.-C. Li, "Subtly different facial expression recognition and expression intensity estimation," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1998. Proceedings. 1998 IEEE Computer Society Conference on*, pp. 853–859, IEEE, 1998.
- [6] I. A. Essa, T. Darrell, and A. Pentland, "Tracking facial motion," in *Motion of Non-Rigid and Articulated Objects, 1994., Proceedings of the 1994 IEEE Workshop on*, pp. 36–42, IEEE, 1994.

- [7] A. Cerón Correa, A. E. Salazar Jiménez, and F. A. Prieto Ortiz, "Reconocimiento de rostros y gestos faciales mediante un análisis de relevancia con imágenes 3d," *Revista de Investigación, desarrollo e innovación*, vol. 4, no. 1, 2014.
- [8] L. Xiaoli, R. Qiuqi, and A. Gaoyun, "Analysis of range images used in 3d facial expression recognition," in *TENCON 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference (31194)*, pp. 1–4, Oct 2013.
- [9] X. Li, Q. Ruan, and G. An, "3d facial expression recognition using delta faces," in *Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMMN 2013), 5th IET International Conference on*, pp. 234–239, Nov 2013.
- [10] C. Conde, L. J. Rodríguez-Aragón, and E. Cabello, "Automatic 3d face feature points extraction with spin images," in *Image Analysis and Recognition*, pp. 317–328, Springer, 2006.
- [11] A. Ceron, A. Salazar, and F. Prieto, "Relevance analysis of 3d curvature-based shape descriptors on interest points of the face," in *Image Processing Theory Tools and Applications (IPTA), 2010 2nd International Conference on*, pp. 452–457, IEEE, 2010.
- [12] J. Kittler, A. Hilton, M. Hamouz, and J. Illingworth, "3d assisted face recognition: A survey of 3d imaging, modelling and recognition approaches," in *Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on*, pp. 114–114, IEEE, 2005.
- [13] Z. Guo-Feng *et al.*, "New research advances in facial expression recognition," in *Control and Decision Conference (CCDC), 2013 25th Chinese*, pp. 3403–3409, May 2013.
- [14] H. Tang and T. S. Huang, "3d facial expression recognition based on properties of line segments connecting facial feature points," in *Automatic Face & Gesture Recognition, 2008. FG'08. 8th IEEE International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2008.
- [15] J. Wang *et al.*, "3d facial expression recognition based on primitive surface feature distribution," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, vol. 2, pp. 1399–1406, IEEE, 2006.
- [16] J. S. Rodriguez A and F. Prieto, "Analyzing the relevance of shape descriptors in automated recognition of facial gestures in 3d images," in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 8650, International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [17] C. Cerrada, A. Adan, J. A. Cerrada, M. Adan, and S. Salamanca, *Experiences in Recognizing Free-Shaped Objects from Partial Views by Using Weighted Cone Curvatures*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [18] A. E. Johnson and M. Hebert, "Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3d scenes," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 5, pp. 433–449, 1999.
- [19] D. V. Vranić and D. Saupe, "3d model retrieval," *Proc. SCCG 2000*, pp. 3–6, 2004.
- [20] A. Adán, C. Cerrada, and V. Feliu, "Modeling wave set: Definition and application of a new topological organization for 3d object modeling," *Comput. Vis. Image Underst.*, vol. 79, pp. 281–307, Aug. 2000.
- [21] A. Adán, M. Adán, S. Salamanca, and P. Merchán, "Using non local features for 3d shape grouping," in *Structural, Syntactic, and Statistical Pattern Recognition (N. da Vitoria Lobo, T. Kasparis, F. Roli, J. Kwok, M. Georgiopoulos, G. Anagnostopoulos, and M. Loog, eds.)*, vol. 5342 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 644–653, Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [22] A. Adan and M. Adan, "A flexible similarity measure for 3d shapes recognition," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 11, pp. 1507–1520, 2004.
- [23] G. Passalis, T. Theoharis, and I. A. Kakadiaris, "Ptk: A novel depth buffer-based shape descriptor for three-dimensional object retrieval," *The Visual Computer*, vol. 23, no. 1, pp. 5–14, 2007.
- [24] D. V. Vranic, "Desire: a composite 3d-shape descriptor," in *Multimedia and Expo, 2005. ICME 2005. IEEE International Conference on*, pp. 4–pp, IEEE, 2005.
- [25] L. Yin, X. Wei, Y. Sun, J. Wang, and M. J. Rosato, "A 3d facial expression database for facial behavior research," in *Automatic face and gesture recognition, 2006. FGR 2006. 7th international conference on*, pp. 211–216, IEEE, 2006.
- [26] P. Cignoni, M. Corsini, and G. Ranzuglia, "Meshlab: an open-source 3d mesh processing system," *Ercim news*, vol. 73, pp. 45–46, 2008.

Julián S. Rodríguez A.

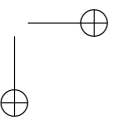
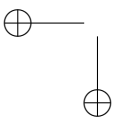
Ingeniero Electrónico de la Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería en la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente se desempeña como docen-

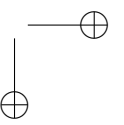
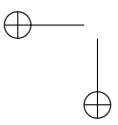
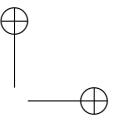
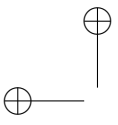


te investigador en el programa de ingeniería Mecatrónica en la Universidad de San Buenaventura Bogotá. e-mail: jrodriguez@usbog.edu.co

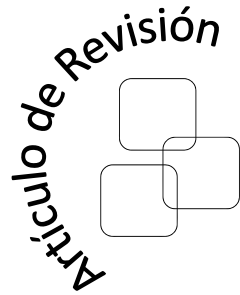
Flavio Prieto

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Físico de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes, DEA y Doctor del Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Lyon, Francia y PhD de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS), Université du Québec, Montreal, Canadá. Actualmente se desempeña como docente de la Universidad Nacional de Colombia y sus áreas de interés son: sistemas de visión artificial (2D y 3D), Diseño electrónico y la Filosofía de la tecnología. e-mail: fprieto@unal.edu.co





Citación: Gamma, E. N., Amaya, D. y Ramos, O. L. (2015). Revisión de las tecnologías y aplicaciones del habla sub-vocal. En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 277–288
© Los autores. Titular de los derechos de reproducción: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.2.a07>



Erika Nathalia Gamma
Universidad Militar Nueva Granada
gav@unimilitar.edu.co

Darío Amaya Hurtado
Universidad Militar Nueva Granada
dario.amaya@unimilitar.edu.co

Olga Lucía Ramos Sandoval
Universidad Militar Nueva Granada
olga.ramos@unimilitar.edu.co



Revisión de las tecnologías y aplicaciones del habla sub-vocal

Technologies and applications review of subvocal speech

Resumen

Se presenta una revisión de estado de las principales temáticas aplicativas y metodológicas del habla sub-vocal o lenguaje silencioso que se han venido desarrollando en los últimos años. Entendiendo por habla sub-vocal como la identificación y caracterización de las señales bioeléctricas que llegan al aparato fonador, sin que se genere producción sonora por parte del interlocutor. La primera sección hace una profunda revisión de los métodos de detección del lenguaje silencioso. En la segunda parte se evalúan las tecnologías implementadas en los últimos años, seguido de un análisis en las principales aplicaciones de este tipo de habla; y finalmente se presenta una amplia comparación entre los trabajos que se han hecho en industria y academia utilizando este tipo de desarrollos.

Palabras claves: Implantes auditivos, micrófonos, procesamiento del habla, reconocimiento del habla, ruido acústico, síntesis del habla, trabajo en ambientes peligrosos.

Abstract

This paper presents a review of the main applicative and methodological approaches that have been developed in recent years for sub-vocal speech or silent language. The sub-vocal speech can be defined as the identification and characterization of bioelectric signals that control the vocal tract, when is not produced sound production by the caller. The first section makes a deep review of methods for detecting silent language. In the second part are evaluated the technologies implemented in recent years, followed by a review of the main applications of this type of speech and finally present a broad comparison between jobs that have been developed in industry and academic applications.

Key words: Acoustic noise, auditory implants, microphones, speech processing, speech recognition, speech synthesis, working environment noise.

Recibido: 28-04-2015
Modificado: 19-08-2015
Aceptado: 09-09-2015

1. Introducción

El lenguaje silencioso o habla sub-vocal está relacionado con la extracción, caracterización y clasificación de señales biológicas que provienen de la corteza cerebral, viajan por el sistema nervioso central, hasta llegar al aparato fonador. Estas señales biológicas representan la intención del habla antes de ser articulada en voz alta. Las interfaces de habla silenciosa (SSI-Silent Speech Interfaces, por sus siglas en inglés), se definen como el proceso de adquisición y reconocimiento, ya sea de fonemas, sílabas, palabras u oraciones completas para lograr transmitir el mensaje que se tiene la intención de decir sin que llegue realmente a ser expresado como una señal acústica. La figura 1 clasifica los enfoques de las SSI dependiendo de la fase de producción del habla de donde se esté tomando la señal a analizar. Vale la pena anotar que, básicamente, dependiendo del tipo de señal que se extraiga, se implementará una interfaz específica y será necesario realizar un acondicionamiento de señal adecuado para cada uno de los casos, a fin de conseguir el reconocimiento del habla silenciosa [68] [69].

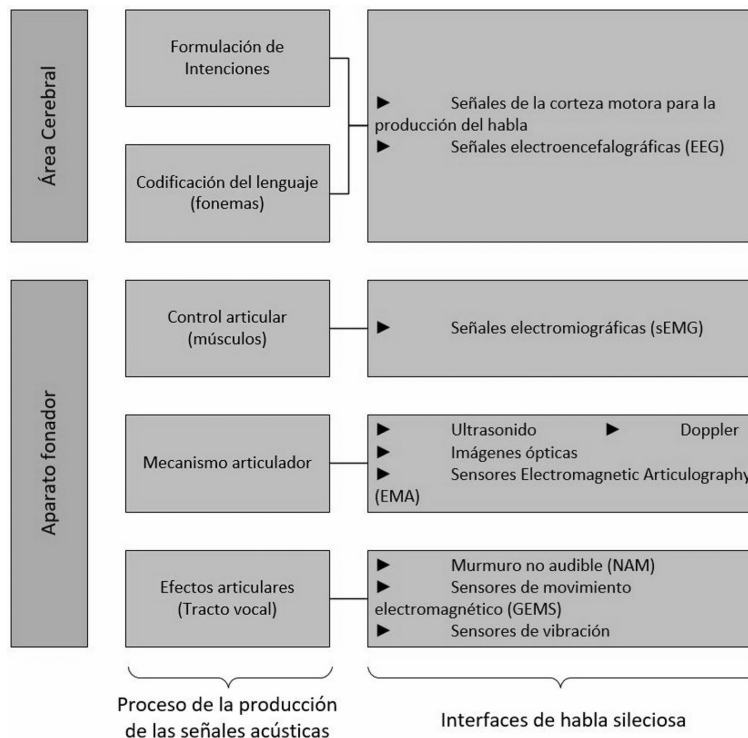


Figura 1. Enfoques de los SSIs durante la producción de la voz.

Son muchas las aplicaciones actuales de este tipo de interfaces, que van desde su utilidad en medicina de recuperación en pacientes que han sido sometidos a alguna intervención del aparato fonador, como por ejemplo una laringectomía y que requieren restablecer su habilidad comunicativa; pasando por los avances que se realizan en sistemas de comunicación humano-máquina, hasta dispositivos que permitan la interlocución en ambientes extremadamente ruidosos o en donde se requiere que el mensaje enviado presente altas condiciones de seguridad.

Este artículo pretende realizar una corta pero comprensible reseña de los métodos de adquisición y procesamiento del habla sub-vocal, los avances que se han realizado en dispositivos de comunicación silenciosa, a nivel mundial y especialmente en Colombia y Latinoamérica, mostrando las limitaciones actuales de los sistemas de habla silenciosa y las perspectivas del trabajo que se desarrollará en los próximos años en este campo. En [2], los autores realizan un detallado estudio de las técnicas actuales para el reconocimiento del habla sub-vocal, basándose en diferentes tipos de sensores, evaluando las ventajas, portabilidad y nivel de alcance comercial de cada método, haciendo una comparación entre estos, que se muestra resumida en la tabla 1. A nivel local, y especialmente, en referencia a los avances realizados para la captura y clasificación de fonemas y palabras del idioma español, los métodos que se han desarrollado principalmente son la adquisición de señales por electromiografía de superficie, como se referencia en [3] y [4], y en menor proporción por medio de encefalogramas [5] e imágenes ultrasónicas. En la siguiente sección se presenta una breve introducción a cada uno de estos métodos, para dar paso a las aplicaciones que tienen en la actualidad este tipo de interfaces.

2. Métodos de adquisición y procesamiento del habla sub-vocal

La tabla 1 describe los métodos más populares de SSI y hace una comparación entre ellos, destacando sus ventajas y posibilidad de comercialización a corto plazo, como se presenta en [2]. De acuerdo con la figura 1, la primera señal que es posible captar desde el momento en que se produce la intención de pronunciar una palabra es la proveniente de la corteza cerebral, donde se aloja el proceso del habla y establecen los comandos para la comunicación y la expresión oral. Para adquirir estas señales, típicamente se utilizan varios electrodos de alta resolución que se ubican en la parte izquierda del cerebro, donde se obtienen las señales EEG relacionadas con la producción del habla [5]. Mientras en algunos trabajos como en [6] se utiliza un casco que contiene un gel conductor y se fija a la cabeza del paciente para la apropiada ubicación de los electrodos, otras investigaciones como la presentada en [7] utilizan señales electrocorticográficas (ECoG), que se toman directamente sobre la superficie del cerebro, lo que evita la atenuación de las señales debido al hueso del cráneo y la posible interferencia de ruido causado por el cuero cabelludo. La principal desventaja que presenta dicha técnica es que es muy invasiva, por lo que su aplicación es frecuente en medicina en pacientes con condiciones médicas críticas. Las características para el reconocimiento del habla silenciosa son diferentes de las tomadas para el reconocimiento del habla acústica [6]. Los métodos de adquisición también son diferentes; mientras en el habla normal la toma de datos se realiza sobre un canal a 16kHz, las ondas cerebrales se adquieren a través de 16 canales a 300Hz, cada uno.

El objetivo de los BIC (Brain-Computer Interface, por sus siglas en inglés) es traducir los pensamientos o intenciones de un sujeto dado en una señal de control para operar dispositivos tales como computadores, sillas de ruedas o prótesis [8]. Frecuentemente, este tipo de interfaz requiere que el usuario explícitamente manipule su actividad cerebral, la cual se usa entonces para controlar la señal de un dispositivo. Generalmente se necesita un proceso de aprendizaje que puede tomar varios meses. Este es el caso de una prótesis de habla para individuos con impedimentos severos de comunicación [9], donde se propone un esquema de control de señales EEG, para ser implementada en pacientes que sufren esclerosis lateral amiotrofia avanzada (ELA).

Tabla I. Comparación de las tecnologías actuales

Tipo de interfaz	Trabaja de forma silenciosa	Funciona en entorno ruidoso	Rehabilitación	Tipo de procedimiento	Posibilidad de comercialización	Costo de implementación
Electrodos EEG	Sí	Sí	Muy utilizado en pacientes con condiciones médicas críticas (en especial ECoG)	Puede ser invasivo	No en la actualidad	Medio
Electrodos EMG	Sí	Sí	En pacientes que han sido sometidos a una laringectomía	No es invasivo	Sí	Medio
Imágenes ultrasónicas	Sí	Sí	En pacientes que han sido sometidos a una laringectomía	No es invasivo	Sí	Medio/alto
Micrófono de murmullo no audible (NAM)	No completamente	Presenta interferencias por ruido proveniente principalmente del movimiento del paciente	No es usualmente utilizado para fines médicos. Sí para fines comerciales	No es invasivo	Sí	Bajo
Electromagnéticos o de vibración	No completamente	Sí	No es utilizado para fines médicos	No es invasivo	Sí	Medio/alto

Algunos de los avances realizados en el último año sugieren que es posible identificar lenguaje imaginario [10], inicialmente para la identificación de dos sílabas. Las aplicaciones EEG para el procesamiento de señales biológicas va más allá del reconocimiento de la intención de habla, trabajos como [11] se enfocan en identificar la intención humana a través de una interfaz humano-máquina. De igual forma, en [12] se propone un nuevo enfoque al problema de lenguaje silencioso por medio de una interfaz cerebro-computador (BCI), basada en microelectrodos intracorticales para predecir la información que se destina al discurso, directamente desde la actividad de las neuronas que están relacionadas con la producción del habla.

Otro de los métodos que ha presentado un amplio desarrollo es la adquisición de señales por electromiografía de superficie (sEMG, por sus siglas en inglés, *surface Electromyography*). La utilización de esta tecnología consiste en registrar la actividad eléctrica del músculo, la cual es capturada por electrodos de superficie (es decir, no implantados), produciendo señales acordes a la vibración o movimiento del aparato fonador [13], [14]. Las señales eléctricas son producidas por la fibra muscular, que es activada por el sistema nervioso central, generando una pequeña descarga de corriente eléctrica debida a los flujos iónicos a través de las membranas de las células musculares. Después de adquirirse las señales, se realiza un proceso de amplificación para tener señales que puedan ser utilizadas en la reproducción de la voz [15], [16], [17]. Cuando se utiliza esta técnica en interfaces que pretenden instrumentar el reconocimiento del lenguaje en español, se busca utilizar el enfoque de reconocimiento de sílabas [18], ya que es un modo común y natural de dividir las palabras en español, lo que presenta una diferencia notoria con las interfaces desarrolladas para el reconocimiento del idioma Inglés, pues dicho idioma se divide de acuerdo a los golpes de sonido y no en sílabas. Este es el caso de la investigación realizada en [3], donde la interfaz de lenguaje silencioso desarrollada se basa en el reconocimiento de sílabas, en vez de fonemas o palabras, obteniendo una efectividad del 70 %, utilizando un árbol de decisiones en el reconocimiento de 30 monosílabos del español. Igualmente en [4], se realiza el análisis de las señales electromiográficas de los músculos mientras el paciente pronuncia fonemas correspondientes a 30 monosílabos diferentes. Para ello, entrenaron un clasificador a fin de reconocer las sílabas con una efectividad del 71 %. En [19], los autores conjugan las señales de habla normal, de susurro y de habla silenciosa, todas obtenidas

por SMEG, para su análisis y comparación, mostrando que las tasas de reconocimiento en el lenguaje silencioso mejoran en porcentaje considerable.

Cuando el proceso de producción de voz llega hasta el aparato fonador se presenta la posibilidad de implementar nuevas interfaces basadas en las vibraciones de este mismo. Tal es el caso de las adquisición de señales por micrófonos de Murmuro no Audible, NAM, señales de ultrasonido [20], [21] y ópticas [22], [23], [24] o utilizando sensores magnéticos [25], o sensores de vibración [26]. El reconocimiento del soplo no audible NAM (por las siglas en inglés de Non-audible Murmur), es una de las interfaces del lenguaje silencioso más prometedoras para comunicación hombre-máquina. El sonido de baja amplitud generado por el flujo de aire en la laringe puede ser detectado usando el micrófono de NAM [27], [28]. La principal desventaja de este dispositivo es la pérdida de las altas frecuencias de la señal debido al medio de transmisión de las mismas, lo cual causa que las señales detectadas no sean lo suficientemente claras [29]. Un micrófono NAM comprende un micrófono condensador (ECM, Electret Condenser Microphone, por sus siglas en inglés), cubierto de un polímero suave, como la silicona o el elastómero de uretano, que proporcionan una mejor impedancia y ayudan al contacto suave con el tejido del cuello. La sensibilidad del micrófono de acuerdo al material utilizado (silicona o elastómero de uretano) en 1kHz están entre -41 y 58 dB. Como se observa en la figura 2, este se ubica en el cuello cerca de la oreja. En [30] se registra un estudio de la propagación del sonido desde el tracto vocal hasta la superficie del cuello con el objetivo de mejorar la claridad de la señales tipo NAM obtenidas.

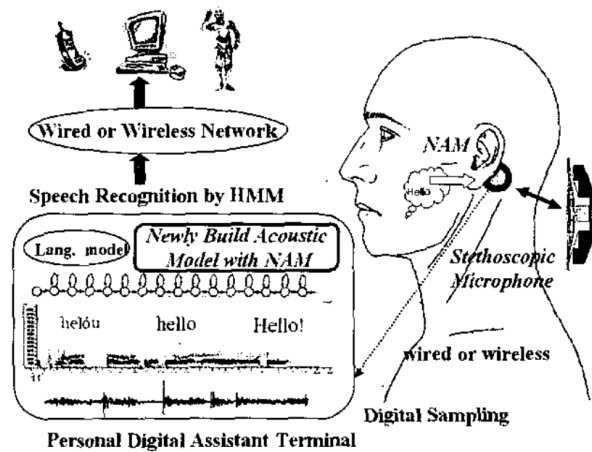


Figura 2. Normas relevantes en Colombia sobre calidad de potencia.

El principal método para el reconocimiento de señales es el entrenamiento de un modelo acústico basado en los modelos ocultos de Markov (HMM, Hidden Markov Model, por sus siglas en inglés), como se explica en [31]. Más específicamente, en el área del habla subvocal, HMM se ha utilizado para la conversión y comparación estadística de la articulación silenciosa del aparato fonador, con vocablos de una base de datos guardados con anterioridad [61]. Basado en este mismo modelo, se presenta en [32] un nuevo método de reconocimiento NAM, el cual requiere solamente una pequeña cantidad de datos para el entrenamiento de HMMs y está basado en adaptación supervisada e iteración adaptativa. Con el fin de mejorar la claridad de las señales NAM, en [33] los autores presentan los resultados de un escaneo por imágenes de resonancia magnética del tracto vocal para ser aplicadas al estudio del mecanismo

de producción del NAM y compararlo con el mecanismo de producción de habla normal. Uno de los trabajos más recientes hechos sobre el análisis y reconocimiento de las señales tipo NAM es el mostrado en [34]. Aquí los autores realizan el reconocimiento de los fonemas japoneses e incluyen el uso de señales provenientes del habla normal con las señales tipo NAM para un mejor procesamiento. Lo anterior debido a que las señales NAM muestreadas resultan débiles, por lo que requieren un proceso de amplificación antes de ser analizadas por herramientas de reconocimiento del habla. Este es un nuevo enfoque para métodos de reconocimientos de señales NAM que incluye la implementación de un modelo acústico y otro de lenguaje, así como la utilización de datos de habla normal transformados en datos NAM, como es posible observar en [35]. Para combatir el ruido causado, entre otras cosas por el movimiento del hablante, en [36] se plantea el uso de un detector de señal estéreo junto a dos micrófonos NAM para la supresión del ruido por medio de la separación ciega de fuentes y de la sustracción espectral que se realiza en cada uno de los canales.

Otro método empleado para el procesamiento de las señales de habla sub-vocal se presenta en [62], donde los autores filtran con la Transformada Wavelet Discreta, las señales tomadas con electrodos superficiales colocados en la garganta, para que a continuación se extraigan las principales características de las señales y se clasifiquen con redes neuronales. A fin de analizar las señales de habla sub-vocal, también se han usado algoritmos como las series de Fourier-Bessel, que separan los formantes de la señal de voz y luego, usando la transformada de Hilbert, se calcula la frecuencia instantánea de cada formante separado [63]. Asimismo, utilizando la transformada fraccionada del coseno, es posible analizar la información de habla, reconociendo las palabras ocultas en la señal de habla enviada en un sistema transmisor-receptor [64].

3. Avances en las tecnologías actuales

Los anteriores enfoques para la adquisición del lenguaje silencioso han permitido el desarrollo de tecnologías tales como micrófonos, interfaces de reconocimiento del habla, implantes cocleares, entre otros; que abarcan un gran número de aplicaciones en diferentes campos, como se ha dicho: medicina, comunicaciones, seguridad, etc. Muchos de estos avances se han desarrollado con el fin de subsanar las desventajas que presentan las interfaces de lenguaje silencioso, como la poca portabilidad de los sistemas desarrollados, su viabilidad en aplicaciones en entornos reales al ser un sistema basado netamente en la información proveniente de los sensores empleados, sin poseer realimentación de audio [37], así como la degradación e interferencia de las señales en condiciones de ruido extremas. Los sensores no acústicos [38, 39], tales como los radares de microondas, los de vibración de la piel y los sensores de conducción ósea, proporcionan la posibilidad de medir la excitación de la glotis y del tracto vocal siendo totalmente inmunes a las interferencias acústicas.

Otra de las mejoras implementadas en la adquisición del habla sub-vocal es la inclusión de implantes cocleares para mejorar la discriminación individual de palabras y las habilidades del entendimiento del habla silenciosa, como se describe en [40], [41] y [42]. En [43] se combina un procesador coclear con un circuito integrado al tracto vocal para crear una “realimentación del habla”, que puede aplicarse a prótesis de escucha o para mejorar el reconocimiento del habla en ambientes extremadamente ruidosos. También se investiga su implementación en una interfaz hombre máquina o en sintetizadores del habla usando un dispositivo que simule el

tracto vocal humano. El sistema de realimentación de voz es explicado por Keng y Hoong con detalle en [44] y en [45]. Igualmente, ese último trabajo aplica el concepto de realimentación de las señales de habla para la disminución del ruido de la señal y, así, se sintetice mejor y de forma clara.

4. Aplicaciones actuales del habla sub-vocal

El lenguaje silencioso o habla sub-vocal ha sido investigado durante décadas y ahora es una tecnología lo suficientemente madura para ser usada en una amplia variedad de aplicaciones, como en el área de las comunicaciones, en sistemas de información telefónica, en programas de traducción entre idiomas y de dictado, que pueden ser implementados en un nivel superior, más rápido y con mejor calidad en el reconocimiento de información que con las interfaces de lenguaje acústico [46]. En el área de la medicina, especialmente en rehabilitación del tracto vocal, como se muestra en [47] y [48], cuando un paciente ha sido sometido a una laringectomía debido a un accidente o al cáncer de laringe, no puede producir el sonido de la voz de una manera convencional debido a que sus cuerdas vocales han sido retiradas, por lo que se requiere un método alternativo de habla para producir la voz usando fuentes que generen el sonido de manera especial, sin necesidad de hacer vibrar sus cuerdas vocales. La voz producida por medio de este método se conoce como voz esofágica (que no es producida en la laringe). La utilización del habla sub-vocal en pacientes que han sido sometidos a una laringectomía total se presenta en [49]. El reconocimiento de la voz no laríngea y el incremento de la calidad de las señales producidas por una laringe electrónica usando métodos de reconocimiento de patrones son temas estudiados en [50]. Otro tipo de pacientes son aquellos que sufren de parálisis severas que les impiden realizar el proceso completo de producción de voz, pero sus señales en la corteza cerebral permiten la aplicación de interfaces BCI para hacer posible su comunicación con el entorno, como se muestra en [51] y [52]. En [12] se utilizan Electrodo Neurotrópicos para el desarrollo de la BCI, los cuales proveen grabaciones de las señales neurológicas útiles durante aproximadamente cuatro años, una propiedad necesaria para pacientes con parálisis que deben convivir mucho tiempo con este tipo de interfaces. Dentro de estas mismas interfaces se han elaborado sintetizadores de voz, que convierten las señales del habla sub-vocal en fonemas pronunciados por un dispositivo electrónico [65]. La utilidad que se le ha dado a estos desarrollos ha permitido profundizar más en los métodos que se han utilizado para captar las señales, el procesamiento digital y analógico de estas señales y los dispositivos utilizados para convertirlas en señales acústicas.

5. Trabajos realizados

En esta sección se citarán de forma más detallada, algunos de los trabajos que han sido desarrollados utilizando el habla sub-vocal. Una de las investigaciones realizadas en el campo del habla sub-vocal fue elaborada por la NASA, quienes investigaron en la aplicación del sEMG en ambientes hostiles [53]. Los resultados obtenidos con ese trabajo demuestran un 74 % de precisión para la clasificación de quince palabras del lenguaje inglés, en un sistema de tiempo real donde fue aplicado a sujetos que están expuestos a 95dB nivel de ruido. En [54] se presenta un dispositivo con la capacidad de medir la distribución de la vibración de las cuerdas vocales en tiempo real. Pacientes con enfermedades de la laringe fueron tratados con este dispositivo y los resultados obtenidos describen que fue posible estimar la frecuencia de los armónicos de los sonidos. En [55] y [56] se presentan analizadores de voz que usan

electrodos EMG, micrófonos Electrec y acelerómetros, para tratar a pacientes con desórdenes de lenguaje y la implementación del habla sub-vocal para la fabricación de sintetizadores del lenguaje.

En cuanto a comunicaciones respecta, en [57] se muestra una SSI compuesta por un sistema de adquisición multimodal de información del habla llamado Ultraspeech [37]. El sistema graba imágenes ultrasónicas y ópticas sincrónicamente con la señal de audio, que pueden ser transmitidas en tiempo real hasta la ubicación del receptor del mensaje. Las aplicaciones de las SSIs también abarcan las teleconferencias [58], las terminales telefónicas y los teléfonos móviles que tenga disponible la adaptación de tales herramientas de lenguaje silencioso [59]. Algunas investigaciones muestran estudios detallados en los que se expone que las comunicaciones telefónicas pueden ser reconocidas con precisión mediante señales sEMG, cuyas características pueden ser reconocidas, presentando los primeros resultados en clasificaciones de fonemas y características fonéticas en telefonía [46], aplicando técnicas estáticas de conversión de voz [60]. Otro de los trabajos derivados del habla sub-vocal es la laringe electrónica; este dispositivo transforma las vibraciones articulares del aparato fonador, en sonidos de voz, utilizando un sintetizador de voz que apoya la restitución del habla en pacientes que han sufrido cáncer de laringe [65]. A nivel local, uno de los trabajos con habla sub-vocal se presenta en [62], donde se utilizaron sensores superficiales y herramientas matemáticas para captar las señales bioeléctricas y clasificarlas en seis palabras de del idioma español, dando como resultado un 70 % de acierto. Asimismo, grupos de investigación de las universidades de Colombia han presentado sus trabajos para la adquisición de habla subvocal a través de USB [66], con una ancho de banda de 20-500 Hz y reconocimiento de fonemas monosilábicos con redes neuronales, con un porcentaje superior del 80 % [67].

6. Conclusiones

El objetivo principal de este documento fue presentar una revisión, corta pero profunda, de los trabajos realizados sobre el desarrollo de las interfaces de habla silenciosa, evidenciando las ventajas que ofrece para mejorar la comunicación en ambientes hostiles o con un nivel alto de ruido y los beneficios que se generan en personas que sufren de problemas en el aparato fonador y que no pueden producir los sonidos del habla. Es observable que en los últimos diez años los procedimientos donde se aplican las SSIs utilizan sensores colocados sobre el cuerpo, que proporcionan detalladamente las señales bioeléctricas transmitidas desde el cerebro hasta el tracto vocal, las cuales pueden tomarse en cada una de las etapas de producción de habla. Los trabajos presentados demuestran que, dependiendo de la técnica que se utilice, es posible identificar las señales de los fonemas de un idioma específico, para luego comparar la información obtenida con modelos estadísticos y sistemas con inteligencia artificial basados en métodos utilizados para el reconocimiento de habla.

Siendo el habla sub-vocal una técnica novedosa para la comunicación entre personas y la interacción con aquellos que poseen trastornos de habla o pérdida del aparato fonador, se hace necesario que las nuevas tecnologías que contemplen la aplicación de las interfaces de habla silenciosa, para el reconocimiento de fonemas de la lengua española a nivel nacional, se basen en los avances que se han generado en el ámbito mundial, que fomente la investigación y proponga nuevas alternativas de comunicación entre hablantes del idioma español. Adicionalmente, las nuevas tecnologías que se generen pueden fabricarse con un costo menor y adecuarse a los requerimientos de la población particular.

Referencias

- [1] J. Freitas, A. Teixeira, M. Sales y C. Bastos, "Towards a Multimodal Silent Speech Interface for European Portuguese", en *Speech Technologies*, I. Ipsic, Ed., ed. Rijeka, Croatia: InTech, 2011, pp. 125-150.
- [2] B. Denby, T. Schultz, K. Honda, T. Hueber, J. Gilbert, J. Brumberg, "Silent speech interfaces", *Speech Communication*, vol. 52, pp. 270-287, 2010.
- [3] E. Lopez-Larraz, O. Martinez, J. Antelis y J. Minquez, "Syllable-Based Speech Recognition Using EMG", en *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, United States, 2010, pp. 4699-4702.
- [4] E. Lopez-Larraz, O. Martinez, J. Antelis, J. Damborenea y J. Mínguez, "Diseño de un sistema de reconocimiento del habla mediante electromiografía", XXVII Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica, Cádiz, España, 2009, pp. 601-604.
- [5] A. A. Torres García, C. A. Reyes García y L. Villaseñor Pineda, "Hacia la clasificación de habla no pronunciada mediante electroencefalogramas (EEG)", XXXIV Congreso Nacional de Ingeniería Biomédica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, Mexico, 2011.
- [6] M. Wester, *Ünsproken Speech*, Diplomarbeit, Inst. Theoretical computer science, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany, 2006.
- [7] P. Xiaomei, J. Hill y G. Schalk, "Silent Communication: Toward Using Brain Signals", *Pulse, IEEE*, vol. 3, pp. 43-46, 2012.
- [8] A. Porbadnigk, M. Wester, J. P. Calliess y T. Schultz, "EEG-based Speech Recognition - Impact of Temporal Effects", *BIOSIGNALS*, 2009, pp. 376-381.
- [9] C. S. DaSalla, H. Kambara, M. Sato y Y. Koike, "Single-trial classification of vowel speech imagery using common spatial patterns", *Neural Networks*, vol. 22, pp. 1334-1339, 2009.
- [10] K. Brigham y B. V. K. Vijaya Kumar, "Imagined Speech Classification with EEG Signals for Silent Communication: A Preliminary Investigation into Synthetic Telepathy", *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE)*, 2010 4th International Conference on, 2010, pp. 1-4.
- [11] D. Suh-Yeon y L. Soo-Young, "Understanding human implicit intention based on frontal electroencephalography (EEG)", *Neural Networks (IJCNN)*, The 2012 International Joint Conference on, 2012, pp. 1-5.
- [12] J. S. Brumberg, A. Nieto-Catanon, P. R. Kennedy y F. H. Guenther, "Brain-computer interfaces for speech communication", *Speech Communication*, vol. 52, pp. 367-379, 2010.
- [13] T. Schultz y M. Wand, "Modeling coarticulation in EMG-based continuous speech recognition", *Speech Communication*, vol. 52, pp. 341-353, 2010.
- [14] J. A. G. Mendes, R. R. Robson, S. Labidi y A. K. Barros, "Subvocal Speech Recognition Based on EMG Signal Using Independent Component Analysis and Neural Network MLP", *Image and Signal Processing, 2008. CISP '08. Congress on*, 2008, pp. 221-224.
- [15] L. Maier-Hein, "Speech Recognition Using Surface Electromyography", Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2005.
- [16] G. S. Meltzner, G. Colby, Y. Deng y J. T. Heaton, "Signal acquisition and processing techniques for sEMG based silent speech recognition", *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE*, 2011, pp. 4848-4851.
- [17] J. Freitas, A. Teixeira y M. Sales Dias, "Towards a silent speech interface for portuguese surface electromyography and the nasality challenge", *International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing, BIOSIGNALS 2012*, February 1, 2012 - February 4, 2012, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012, pp. 91-100.
- [18] T. Schultz, "ICCHP keynote: Recognizing silent and weak speech based on electromyography", *12th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, ICCHP 2010*, July 14, 2010 - July 16, 2010, Vienna, Austria, 2010, pp. 595-604.
- [19] M. Janke, M. Wand y T. Schultz, "A Spectral Mapping Method for EMG-based Recognition of Silent Speech", *B-Interface 2010 - Proceedings of the 1st International Workshop on Bio-inspired Human-Machine Interfaces and Healthcare Applications*, Valencia, España, 2010, pp. 22-31.
- [20] B. Denby, Y. Oussar, G. Dreyfus y M. Stone, "Prospects for a Silent Speech Interface using Ultrasound Imaging", *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on*, 2006, pp. I-I.

- [21] B. Denby y M. Stone, "Speech synthesis from real time ultrasound images of the tongue", *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004. Proceedings. (ICASSP '04). IEEE International Conference on, 2004*, pp. I-685-8 vol.1.
- [22] T. Hueber, G. Chollet, B. Denby, G. Dreyfus y M. Stone, "Continuous-Speech Phone Recognition from Ultrasound and Optical Images of the Tongue and Lips", *International Speech Communication Association INTERSPEECH 2007, 8th Annual Conference of the, Antwerp, Belgium, 2007*, pp. 658-661.
- [23] T. Hueber, G. Chollet, B. Denby, G. Dreyfus y M. Stone, "Phone Recognition from Ultrasound and Optical Video Sequences for a Silent Speech Interface", *International Speech Communication Association INTERSPEECH 2008, 9th Annual Conference of the, Brisbane, Australia, 2008*, pp. 2032-2035.
- [24] T. Hueber, E. L. Benaroya, G. Chollet, B. Denby, G. Dreyfus y M. Stone, "Development of a silent speech interface driven by ultrasound and optical images of the tongue and lips", *Speech Communication*, vol. 52, pp. 288-300, 2010.
- [25] J. M. Gilbert, S. I. Rybchenko, R. Hofe, S. R. Ell, M. J. Fagan, R. K. Moore y P. Green, "Isolated word recognition of silent speech using magnetic implants and sensors", *Medical Engineering Physics*, vol. 32, pp. 1189-1197, 2010.
- [26] R. Hofe, S. R. Ell, M. J. Fagan, J. M. Gilbert, P. D. Green, R. K. Moore y S. I. Rybchenko, "Small-vocabulary speech recognition using a silent speech interface based on magnetic sensing", *Speech Communication*, vol. 55, pp. 22-32, 2012.
- [27] T. Toda, "Statistical approaches to enhancement of body-conducted speech detected with non-audible murmur microphone", *Complex Medical Engineering (CME), 2012 ICME International Conference on, 2012*, pp. 623-628.
- [28] D. Babani, T. Toda, H. Saruwatari y K. Shikano, "Acoustic model training for non-audible murmur recognition using transformed normal speech data", *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on, 2011*, pp. 5224-5227.
- [29] Y. Nakajima, H. Kashioka, K. Shikano y N. Campbell, "Non-audible murmur recognition input interface using stethoscopic microphone attached to the skin", *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on, 2003*, pp. V-708-11 vol.5.
- [30] Y. Nakajima, H. Kashioka, N. Campbell y K. Shikano, "Non-Audible Murmur (NAM) Recognition", *IEICE - Trans. Inf. Syst.*, vol. E89-D, pp. 1-4, 2006.
- [31] V.-A. Tran, G. Bailly, H. Lævenbruck y T. Toda, "Improvement to a NAM-captured whisper-to-speech system", *Speech Communication*, vol. 52, pp. 314-326, 2010.
- [32] S. Shimizu, M. Otani, T. Hirahara, "Frequency characteristics of several non-audible murmur (NAM) microphones", *Acoustical Science and Technology*, vol. 30, pp. 139-142, 2009.
- [33] T. Hirahara, M. Otani, S. Shimizu, T. Toda, K. Nakamura, Y. Nakajima y K. Shikano, "Silent-speech enhancement using body-conducted vocal-tract resonance signals", *Speech Communication*, vol. 52, pp. 301-313, 2010.
- [34] M. Otani, T. Hirahara, S. Shimizu y S. Adachi, "Numerical simulation of transfer and attenuation characteristics of soft-tissue conducted sound originating from vocal tract", *Applied Acoustics*, vol. 70, pp. 469-472, 2009.
- [35] P. Heracleous, V.-A. Tran, T. Nagai y K. Shikano, "Analysis and Recognition of NAM Speech Using HMM Distances and Visual Information", *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 1528-1538, 2010.
- [36] S. Ishii, T. Toda, H. Saruwatari, S. Sakti y S. Nakamura, "Blind noise suppression for Non-Audible Murmur recognition with stereo signal processing", *Automatic Speech Recognition and Understanding (ASRU), 2011 IEEE Workshop on, 2011*, pp. 494-499.
- [37] V. Florescu, L. Crevier-Buchman, B. Denby, T. Hueber, A. Colazo-Simon, C. Pillot-Loiseau, P. Roussel, C. Gendrot y S. Quattrocchi, "Silent vs Vocalized Articulation for a Portable Ultrasound-Based Silent Speech Interface", *IEEE 18th Signal Processing and Communications Applications Conference, Diyarbakir, Turkey, 2010*.
- [38] S. Li, J. Q. Wang, J. XiJing y T. Liu, "Nonacoustic Sensor Speech Enhancement Based on Wavelet Packet Entropy", *Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on, 2009*, pp. 447-450.
- [39] T. F. Quatieri, K. Brady, D. Messing, J. P. Campbell, M. S. Brandstein, C. J. Weinstein, J. D. Tardelli y P. D. Gatewood, "Exploiting nonacoustic sensors for speech encoding", *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 533-544, 2006.

- [40] L. Xiaoxia, N. Kaibao, F. Karp, K. L. Tremblay y J. T. Rubinstein, "Characteristics of stimulus artifacts in EEG recordings induced by electrical stimulation of cochlear implants", *Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*, 2010 3rd International Conference on, 2010, pp. 799-803.
- [41] D. Smith y D. Burnham, "Facilitation of Mandarin tone perception by visual speech in clear and degraded audio: Implications for cochlear implants", *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, pp. 1480-1489, 2012.
- [42] F. Lin, W. W. Chien, D. M. Clarrett, J. K. Niparko y H. W. Francis, "Cochlear Implantation in Older Adults", *Medicine*, vol. 91, pp. 229-241, 2012.
- [43] W. Keng Hoong, L. Turicchia y R. Sarpeshkar, "An Articulatory Silicon Vocal Tract for Speech and Hearing Prostheses", *Biomedical Circuits and Systems*, *IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 339-346, 2011.
- [44] W. Keng Hoong, L. Turicchia y R. Sarpeshkar, "An Articulatory Speech-Prosthesis System", *Body Sensor Networks (BSN)*, 2010 International Conference on, 2010, pp. 133-138.
- [45] W. Keng Hoong, L. Turicchia y R. Sarpeshkar, "A speech locked loop for cochlear implants and speech prostheses", *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL)*, 2010 3rd International Symposium on, 2010, pp. 1-2.
- [46] M. Wand y T. Schultz, "Analysis of phone confusion in EMG-based speech recognition", *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011 IEEE International Conference on, 2011, pp. 757-760.
- [47] M. J. Fagan, S. R. Ell, J. M. Gilbert, E. Sarrazin y P. M. Chapman, "Development of a (silent) speech recognition system for patients following laryngectomy", *Medical Engineering & Physics*, vol. 30, pp. 419-425, 2008.
- [48] N. Alves, T. H. Falk y T. Chau, "A novel integrated mechanomyogram-vocalization access solution", *Medical Engineering and Physics*, vol. 32, pp. 940-944, 2010.
- [49] H. Doi, K. Nakamura, T. Toda, H. Saruwatari y K. Shikano, "An evaluation of alaryngeal speech enhancement methods based on voice conversion techniques", *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011 IEEE International Conference on, 2011, pp. 5136-5139.
- [50] J. S. Brumberg, P. R. Kennedy y F. H. Guenther, "Artificial speech synthesizer control by brain-computer interface", *International Speech Communication Association INTERSPEECH 2009*, 10th Annual Conference of the, Brighton, Reino Unido, 2009.
- [51] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, W. J. Heetderks, D. J. McFarland, P. H. Peckham, G. Schalk, E. Donchin, L. A. Quatrano, C. J. Robinson y T. M. Vaughan, "Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting", *Rehabilitation Engineering*, *IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 164-173, 2000.
- [52] W. Jun, A. Samal, J. R. Green y F. Rudzicz, "Sentence recognition from articulatory movements for silent speech interfaces", *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2012 IEEE International Conference on, 2012, pp. 4985-4988.
- [53] M. Braukus y J. Bluck. (2004, March 17). NASA Develops System To Computerize Silent, "Subvocal Speech". Disponible en: http://www.nasa.gov/home/hqnews/2004/mar/HQ_04093_subvocal_speech.html
- [54] I. Ishii, S. Takemoto, T. Takaki, M. Takamoto, K. Imon y K. Hirakawa, "Real-time laryngoscopic measurements of vocal-fold vibrations", *Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC*, 2011 Annual International Conference of the IEEE, 2011, pp. 6623-6626.
- [55] A. Carullo, A. Penna, A. Vallan, A. Astolfi y P. Botalico, "A portable analyzer for vocal signal monitoring", *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2012 IEEE International, 2012, pp. 2206-2211.
- [56] M. Janke, M. Wand, K. Nakamura y T. Schultz, "Further investigations on EMG-to-speech conversion", *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2012 IEEE International Conference on, 2012, pp. 365-368.
- [57] T. Hueber, G. Chollet, B. Denby y M. Stone, "Acquisition of Ultrasound, Video and Acoustic Speech Data for a Silent-Speech Interface Application", *8th International Seminar on Speech Production*, Strasbourg, Francia, 2008.
- [58] H. Gamper, S. Tervo y T. Lokki, "Speaker Tracking for Teleconferencing via Binaural Headset Microphones", *Acoustic Signal Enhancement; Proceedings of IWAENC 2012; International Workshop on*, pp. 1-4, 2012.
- [59] K. A. Yuksel, S. Buyukbas y S. H. Adali, "Designing mobile phones using silent speech input and auditory feedback", *13th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, Mobile HCI 2011*, August 30, 2011 - September 2, 2011, Stockholm, Sweden, 2011, pp. 711-713.

- [60] T. Toda, M. Nakagiri y K. Shikano, "Statistical Voice Conversion Techniques for Body-Conducted Unvoiced Speech Enhancement", *Audio, Speech, and Language Processing*, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 2505-2517, 2012.
- [61] T. Hueber y G. Bailly, "Statistical conversion of silent articulation into audible speech using full-covariance HMM", *Computer Speech and Language*, pp. 1-20, Article in Press, 2015.
- [62] L. Mendoza, J. Peña Martínez, L. A. Muñoz-Bedoya y H. J. Velandia-Villamizar, "Procesamiento de Señales Provenientes del Habla Subvocal usando Wavelet Packet y Redes Neuronales", *TecnoLógicas*, vol. Edición Especial, pp.655-667, 2013.
- [63] P. S. Rathore, A. Boyat y B. K. Joshi, "Speech signal analysis using Fourier-Bessel Expansion and Hilbert Transform Separation Algorithm", *Signal Processing, Computing and Control (ISPC)*, 2013 IEEE International Conference on, Septiembre 26-28, pp. 1-4, 2013.
- [64] Y. Tao y Y. Bao, "Speech Information Hiding using Fractional Cosine Transform", en *1st International Conference on Information Science and Engineering*, Diciembre 26-28, pp. 1864-1867, 2009.
- [65] A. Razo, "Sistema para mejorar la calidad de la voz esofágica", disertación para M.Sc., Sección de estudios de posgrado e investigación, Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- [66] Grupo de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Pamplona (GIBUP), (2010, mayo 3) "Adquisición por USB del habla subvocal". Disponible en: <https://gibup.wordpress.com/2010/05/03/adquisicion-por-usb-del-habla-subvocal/>
- [67] G. Buitrago, "Reconocimiento de patrones del habla subvocal utilizando algoritmos evolutivos", Informe de Investigación, Grupo de Investigación GAV, Programa de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C., Colombia, 2013.
- [68] V. Havas, A. Gabarrós, M. Juncadella, X. Rifa-Rios, G. Plans, J. J. Acebes, R. de Diego Balaquer y A. Rodríguez-Fornells, "Electrical stimulation mapping of nouns and verbs in Broca's area", *Brain and Language*, vol. 145-146, pp. 53-63, 2015.
- [69] J. Gutiérrez, E. N. Gama, D. Amaya y O. Avilés, "Desarrollo de interfaces para la detección del habla sub-vocal", *Tecnura*, vol. 17, No. 37, pp. 138-152, 2013.

Erika Nathalia Gamma

Nació en Bogotá D.C., Colombia. Es Ingeniera en Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada, de Bogotá, Colombia. Se desempeñó como Ingeniera en Colvista SAS durante 1 años. Posteriormente, ejerció como ingeniería en Cosmos Sistemas Integrados durante 1 año. Luego se desempeño como Joven Investigadora en la Universidad Militar Nueva Granada desde el 2011 para el apoyo en investigación del grupo GAV.
e-mail: gav@unimilitar.edu.co

Darío Amaya Hurtado

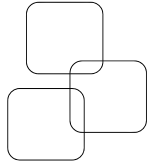
Nació en Quindío, Colombia. Es Ingeniero Electrónico de la Universidad Antonio Nariño, de Bogotá D.C., Colombia. Obtuvo su título de Maestría en telecomunicaciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., Colombia. Obtuvo su PhD en la Universidad Estadual de Campinas, de Sao Paulo, Brasil. Se desempeñó como docente en fundación universidad central durante 5 años. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Automatización Industrial y sensores en la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá D.C., Colombia, y pertenece como investigador al grupo GAV donde realiza estudios sobre energías alternativas y habla Sub-Vocal.
e-mail: dario.amaya@unimilitar.edu.co

Olga Lucia Ramos Sandoval

Nació en Bogotá D.C., Colombia. Es Ingeniera Electrónica de la Universidad Antonio Nariño, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en telecomunicaciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., Colombia. Se encuentra realizando su PhD en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá D.C., Colombia. Se desempeñó como docente de tiempo completo en la Universidad Manuela Beltrán durante 4 años. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Automatización Industrial en la Universidad Militar Nueva Granada de Ciudad, País, y pertenece como investigador al grupo GAV donde realiza estudios sobre habla Sub-Vocal.
e-mail: olga.ramos@unimilitar.edu.ci

Citación: González D., Luna G. y Rivas, E.(2015). Evaluación del impacto de la generación distribuida mediante índices normalizados con base en la normatividad colombiana y estándares IEEE.
En: Ingeniería, Vol. 20, No. 2, pp. 289–305
©Los autores. Titular de los derechos de reproducción: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI:
<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.2.a08>

Artículo de Investigación



Diego González Herrera
Applus-Norcontrol
diego.gonzalez.herrera@applus.com

Gustavo Luna Russi
Ospina Padilla asociados Ltda.
tavorussi@gmail.com

Edwin Rivas Trujillo
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
erivas@udistrital.edu.co



Evaluación del impacto de la generación distribuida mediante índices normalizados con base en la normatividad colombiana y estándares IEEE

Impact assessment of distributed generation using standardized indexes based on colombian regulations and IEEE standards

Resumen

Se presenta una breve revisión de la literatura científica referente a índices normalizados en calidad de potencia y el marco regulatorio colombiano; el trabajo fue motivado por el reto de otros autores de plantear índices para evaluar el impacto de las perturbaciones de calidad de potencia (con enfoque cualitativo y cuantitativo, sin y con generación distribuida). Por ende se presenta una propuesta de índices normalizados (*IREG* Regulación de tensión, *ISU* sobretensión y subtensión, *I_{falla}* corriente de falla, *I_{sag}* amplitud de hueco de tensión, *I_{THDV}* distorsión armónica total en tensión, *I_{DDD}* distorsión de la demanda total) implementada en un sistema de 34 nodos de IEEE, los cuales son comparados con los propuestos por dichos autores.

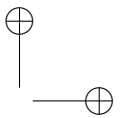
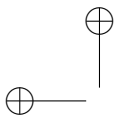
Palabras claves: Calidad de potencia, generación distribuida, índices normalizados, regulación colombiana.

Abstract

This paper considers a short review of the scientific literature concerning standard power quality indexes and the colombian regulatory framework; the work was motivated in other studies proposing indexes to assess the impact of disturbances in power quality (with qualitative and quantitative approaches, with and without distributed generation). Thus, a proposal for standardised indexes is provided (*IREG* voltage regulation, *ISU* overvoltage and undervoltage, *I_{falla}* fault current, *I_{sag}* amplitude of voltage dip, *I_{THDV}* total harmonic voltage distortion, *I_{DDD}* total demand distortion) implemented within a IEEE 34 nodes system; a comparison with the other proposals is also discussed.

Key words: Colombian regulations, distributed generation, indexes, power quality.

Recibido: 22-05-2015
Modificado: 04-08-2015
Aceptado: 01-09-2015



1. Introducción

La generación de energía mediante recursos renovables ha llegado a cubrir el 19 % de la demanda energética a nivel mundial para el periodo 2013-2014 [1] [2]. El principal inconveniente de las energías renovables y de los recursos energéticos distribuidos (DER) es que no son competitivos y visibles en el mercado energético [3] [4].

En [5] se define la generación distribuida (GD) como recursos energéticos distribuidos a pequeña escala en redes de baja y media tensión. En la GD pueden surgir problemas técnicos, tales como pérdidas de potencia, regulación de tensión, aumento de niveles de corriente de falla y problemas de calidad como sobretensión, subtensión, armónicos y huecos de tensión entre otros, por lo cual se hacen necesarias herramientas para medir el impacto técnico de la integración de GD.

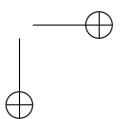
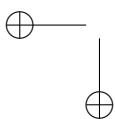
El Congreso de la República de Colombia expidió en mayo de 2014 la Ley 1715 [6] por la cual regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, con el fin de reducir el impacto medioambiental (reducción de emisiones de gases de efecto invernadero) y la seguridad del abastecimiento energético. Sin embargo, en la actualidad en materia de regulación no existe un marco regulatorio que contemple la inclusión de la GD en el sistema interconectado nacional.

En este artículo se presenta una breve revisión de la literatura científica referente a índices normalizados en calidad de potencia y el marco regulatorio colombiano, que define la metodología y los límites necesarios para proponer algunos índices que permitan medir el impacto de la generación distribuida en fenómenos como perfil de tensión, sobretensión y subtensión, corrientes de falla, huecos de tensión y armónicos. Finalmente se presenta una comparación entre los índices propuestos y los índices de otros autores, así como los procedimientos utilizados para evaluar el impacto técnico de la GD.

2. Revisión de índices normalizados y regulación colombiana

El Congreso de la República de Colombia expidió el 13 de mayo de 2014 la Ley 1715 [6] por la cual regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, con el fin de promover la gestión eficiente de la energía [7], la cual comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda, a través de instrumentos tributarios, incentivos, mecanismos de cooperación y estímulos para la inversión e investigación para la producción y utilización de fuentes no convencionales de energía.

Los índices normalizados brindan un mecanismo apropiado para establecer rangos y límites que puedan servir como punto de comparación cualitativo y cuantitativo, en cuanto a beneficios y comportamiento de las perturbaciones de calidad de potencia que se pueden presentar con la conexión de generación distribuida. La propuesta de normalización de índices que desarrolla el presente artículo, se basa en una serie de conceptos que plantean diferentes autores en sus propias propuestas de índices de evaluación, que se expondrán en la tabla I.



Finalmente, con el uso de índices normalizados los autores desarrollan una herramienta útil para analizar el comportamiento de la calidad de potencia de una red de distribución en presencia de generación distribuida.

Tabla I. Trabajos realizados de índices normalizados en calidad de potencia

Autores y año	Aspectos relevantes
G. Carpinelli P. Verde R. Chiumeo 2002	Se propone un índice de calidad de la energía global (GPQI, por sus siglas en inglés) para perturbaciones discretas, con base en indicadores de severidad discretos (DSI, por sus siglas en inglés). El GPQI se puede clasificar en dos tipologías diferentes. La primera tipología mide la diferencia entre la forma de onda ideal de tensión y la forma de onda de tensión real, la segunda tipología maneja índices tradicionales de calidad de energía para determinar un valor general para la calidad de tensión [8].
V. Gosbell 2002	Propone el Índice de Calidad de Energía Unificada (UPQI, por sus siglas en inglés) donde se tienen en cuenta solo las perturbaciones continuas. El UPQI se amplía a las perturbaciones discretas como caídas de tensión, sobretensiones y transitorios que parecen ser más críticas para la regulación futura [9].
P. Caramia C. Perna 2006	Se plantea el uso de los índices UPQI para evaluar de manera eficiente la influencia de la generación distribuida sobre la calidad del suministro, centrándose en armónicos, variaciones de tensión y huecos [10].
P. Caramia G. Carpinelli A. Russo 2006	Se evalúa el impacto de la instalación de generación distribuida introduciendo índices de beneficio, lo que significa, la cuantificación de la influencia de la GD, utilizando el concepto de porcentaje que es cercano a valores por unidad [11].
A. Bracale P. Caramia G. Carpinelli 2011	Se utilizan los UPQI aplicando el índice de beneficio, para la evaluación del impacto de la generación distribuida. En este caso se propone una tabla de decisión basada solo en los resultados parciales de los nodos de conexión de GD [12].

2.1. Regulación colombiana (calidad de potencia)

En Colombia el marco regulatorio lo trabajan distintas entidades (Figura 1); dentro de las más importantes se encuentra ICONTEC, que se encarga de la normalización en el país prestando servicios de educación y metrología, entre otros; y la CREG la cual tiene como objetivo principal garantizar la calidad, la cobertura del suministro y expansión de los servicios de energía eléctrica, gas natural y gas licuado.

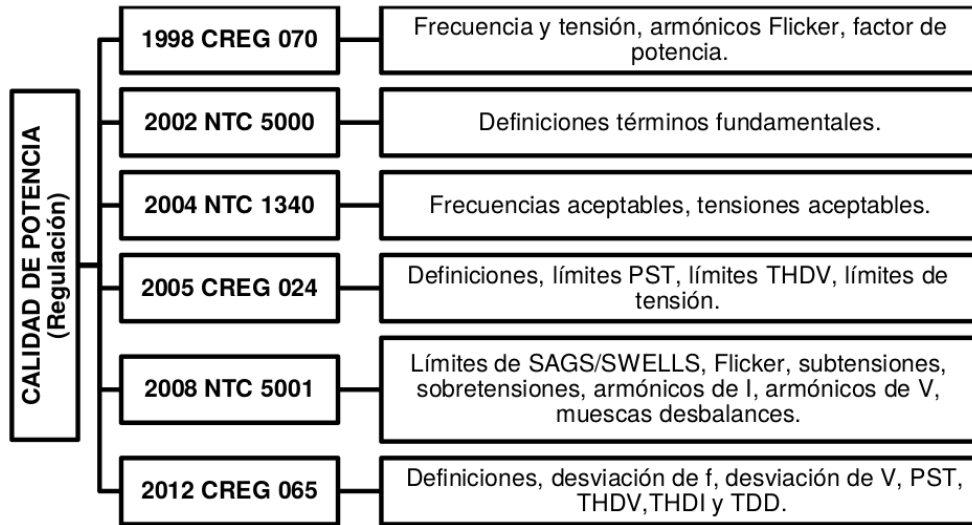


Figura 1. Normatividad relevante colombiana en calidad de potencia.

NTC1340 [13]

Esta norma (Figura 2) del año 2004 aborda mínimos conceptos de calidad de potencia, sus temáticas centrales son las tensiones y frecuencias nominales en sistema de energía eléctrica en redes de servicio público.

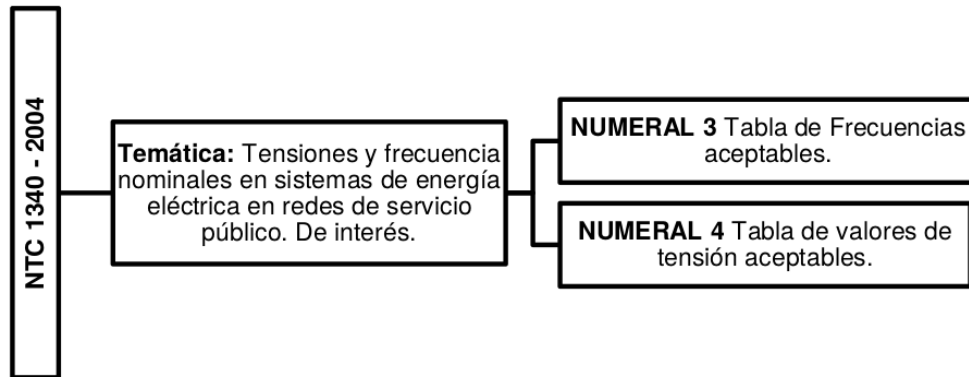


Figura 2. Mapa conceptual NTC 1340–2004.

NTC 5001 [14]

La NTC 5001 (Figura 3) es la norma técnica colombiana de calidad de potencia eléctrica del año 2008, sus temáticas centrales son establecer los límites y la metodología de evaluación en un punto de conexión común, es una norma que contiene aspectos similares a la norma IEEE 1159.

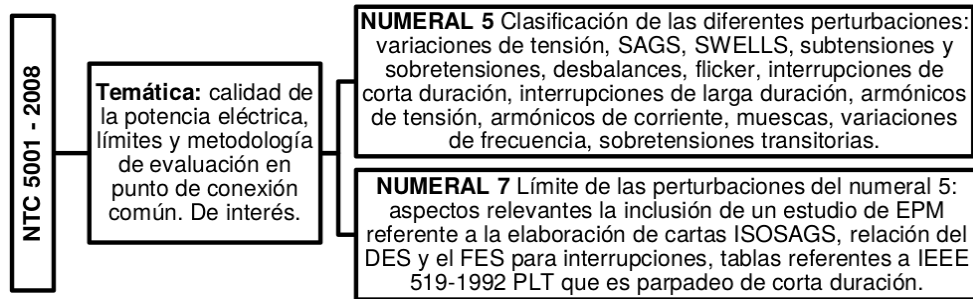


Figura 3. Mapa conceptual de la NTC 5001 – 2008.

CREG 070-1998 [15]

La resolución CREG 070 del año 1998 denominado el reglamento de distribución de energía eléctrica (Figura 4) [15], aborda distintas temáticas como las condiciones de conexión para cargas y generadores, la operación de STR y SDL, equipos de medida, alumbrado público, entre otros. Sin embargo, de gran interés es el Capítulo 6 denominado “Calidad del servicio en los STR y SDL”, el cual hace referencia a la calidad de la potencia suministrada, la calidad del servicio prestado, el registro de interrupciones y las políticas para vigilar o supervisar esta calidad del servicio.

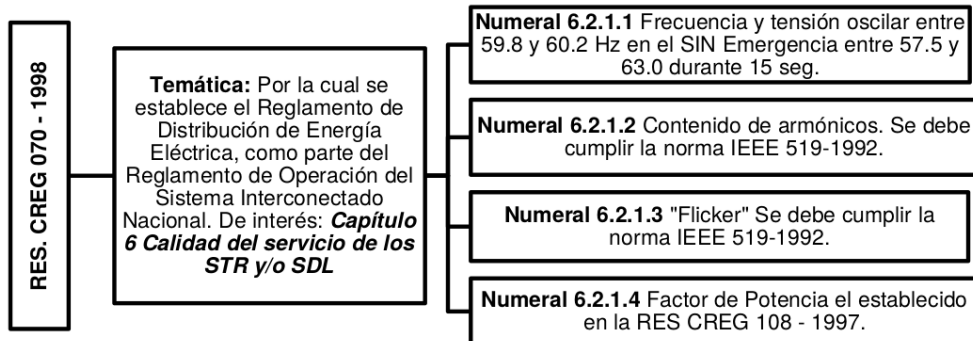


Figura 4. Mapa conceptual CREG 070 – 1998.

CREG 024-2005 [16]

Esta resolución del año 2005 (Figura 5), hace referencia a las normas aplicables de calidad de potencia eléctrica para los servicios de distribución de energía eléctrica. Su objetivo es darle más importancia a esta temática ya que en la resolución CREG 070 solo es parte de un capítulo de la calidad de potencia eléctrica. Sin embargo, en esta resolución solo se enfoca en algunos fenómenos como lo son el flicker y la distorsión armónica en tensión.

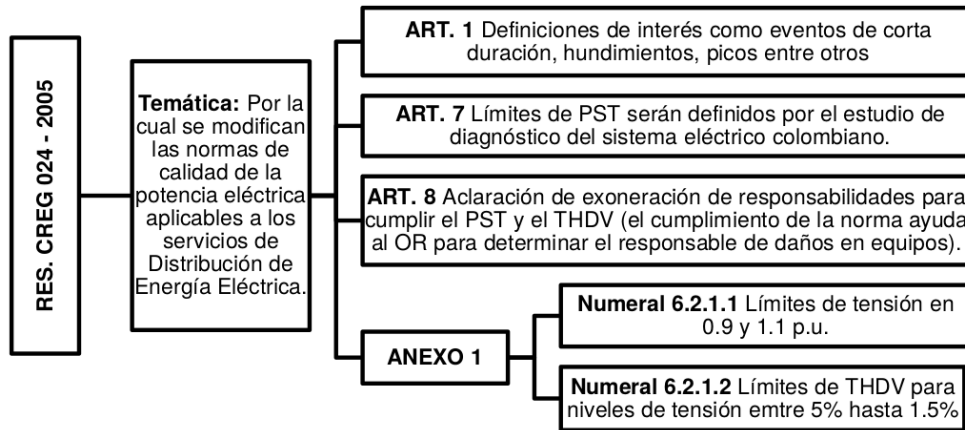


Figura 5. Mapa conceptual CREG 024-2005.

CREG 065-2012 [17]

La CREG en el año 2012 (Figura 6) lanza este proyecto de resolución el cual trata de complementar las resoluciones anteriores y las compila en una sola, su objetivo es tener de forma clara las políticas de calidad de potencia y ajustarlas para que sean similares a la norma NTC. Esta tiene en cuenta indicadores como desviaciones de frecuencia, desviaciones de tensión, flicker, desbalances y distorsión armónica de tensión y corriente. Además, establece los límites de los indicadores mencionados y la forma en que se deben medir dichos fenómenos.

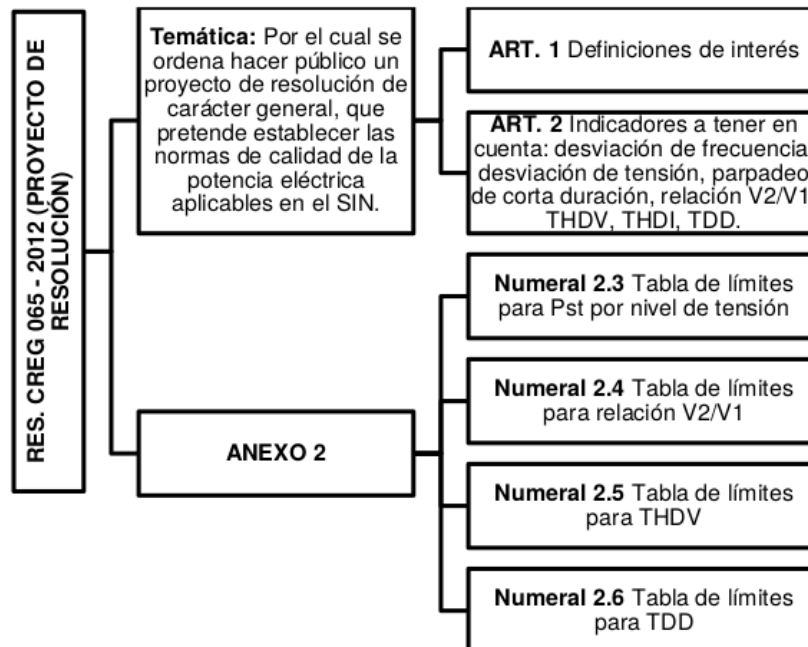


Figura 6. Mapa conceptual CREG 065 – 2012.

3. Índices normalizados propuestos

Los índices normalizados que se plantean en este artículo surgen de la propuesta de los autores [9] y [11]; dichos índices normalizan cada uno de los disturbios que pueden aparecer en los fenómenos de interés (perfil de tensión, corrientes de falla, huecos de tensión y armónicos), de manera que un índice tiene el valor de 1 cuando se está en el límite de aceptación [9]. Algunos índices cuentan con dos márgenes, superior e inferior, de acuerdo a la normativa relacionada con la perturbación medida y su valor se encontrara entre uno y cero. La ecuación (1) expresa la relación que existe entre la cuantificación del disturbio y su valor límite estandarizado.

$$I_n = \frac{I_c - Lim_-}{Lim_+ - Lim_-} \quad (1)$$

Donde I_n es el índice normalizado, I_c es la cuantificación del evento, Lim_- y Lim_+ son los máximos valores permisibles inferior y superior respectivamente. Cuando se tiene un solo límite Lim_- se hace 0.

El objetivo de los índices normalizados es evaluar el impacto de la presencia de generación distribuida sobre la red eléctrica, en relación con límites establecidos en las normas o por las propias condiciones previas al no uso de la generación distribuida. La evaluación del impacto se hace mediante el índice normalizado de evaluación I_{Eval} (2), el cual muestra la relación entre los índices normalizados al utilizar GD y los índices normalizados sin utilizar GD .

$$I_{Eval} = \frac{I_{conGD}}{I_{sinGD}} \quad (2)$$

Donde I_{sinGD} e I_{conGD} son la cuantificación normalizada de los eventos sin GD y con GD respectivamente.

3.1. Perfil de tensión

El perfil de tensión se evalúa teniendo en cuenta la normativa NTC 1340 [13]/CREG 025 [18]. Define para media tensión, es decir entre $1kV$ y $62kV$, una tensión máxima nominal de $+5\%$ y mínima de -10% . Además se plantean las siguientes definiciones:

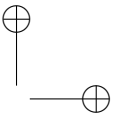
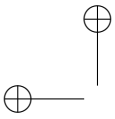
Tensión máxima de un sistema: valor eficaz máximo de tensión que ocurre bajo condiciones de operación normal en cualquier momento y punto del sistema.

Tensión mínima de un sistema: valor eficaz mínimo de tensión que ocurre bajo condiciones de operación normal en cualquier momento y punto del sistema.

De acuerdo a lo anterior se plantean el índice de regulación de tensión (3), el cual considera los dos valores de referencia para la evaluación establecidos por la normativa.

$$IREG = \frac{V_{nodo} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (3)$$

Donde, V_{nodo} es la tensión medida en el punto de conexión común; V_{max} y V_{min} son los límites permitidos.



3.2. Sobretensión y subtensión

De acuerdo con NTC5000 [19]/ IEEE 1159 [20] se definen los valores de referencia para el índice de sobretensión y subtensión ISU; además, se muestran las siguientes definiciones:

Sobretensión: variación en estado estable mayor a 1 min, cuyo valor está, por lo menos, 10 % por encima de la tensión nominal del circuito o sistema.

Subtensión: variación en estado estable mayor a 1 min, cuyo valor está, por lo menos, 10 % por debajo de la tensión nominal del circuito o sistema.

En la ecuación (4) se muestra el índice de sobretensión y subtensión ISU , que se define como la relación entre la tensión de nodo y la tensión máxima y mínima de referencia para sobretensión y subtensión.

$$ISU = \frac{V_{nodo} - V_{lim-}}{V_{lim+} - V_{lim-}} \quad (4)$$

Donde V_{lim+} es el 10 % de la tensión nominal del nodo por encima para el índice de sobretensión [14]; y V_{lim-} es el 10 % de la tensión nominal del nodo por debajo para el índice de subtensión. Lo anterior con el fin de evaluar la tensión del sistema con respecto a los límites presentados por la norma.

3.3. Corrientes de falla

El objetivo de evaluar las corrientes de falla es cuantificar el aumento o disminución de las mismas con la presencia de la generación distribuida. Para esto se utiliza como valor de referencia las corrientes producidas sin GD. En (5) se presenta el índice de corriente de falla I_{falla}

$$I_{falla} = \frac{I_{conGD}}{I_{sinGD}} \quad (5)$$

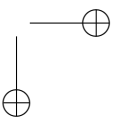
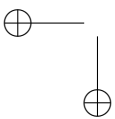
Donde I_{sinGD} y I_{conGD} son las corrientes de falla sin GD y con GD respectivamente.

3.4. Huecos de tensión

De acuerdo a la metodología de evaluación del impacto de la generación distribuida en los huecos de tensión que se presenta en [21], se ha utilizado el índice individual de magnitud.

Los huecos de tensión de acuerdo con NTC 5000 [19] / IEEE 1159 [20] se caracterizan por su amplitud desde 0.1 a 0.9 en p.u. y su duración en instantáneo (0.5 a 30 ciclos) momentáneo (30 ciclos a 3 segundos) y temporal (3 segundos a 1 minuto).

Para el índice de amplitud de hueco de tensión I_{sag} se utiliza la tensión declarada (tensión acordada entre el operador de red y el usuario para ser aplicada en el punto de conexión común. Esta tensión debe estar normalizada NTC 1340 [13]) como referencia fija en el punto de conexión; lo anterior de acuerdo con la NTC 5001 [14] para sistemas de media y baja tensión.



Índice de amplitud de hueco de tensión I_{sag} , muestra la relación entre la tensión en el nodo del hueco de tensión V_{nodo} y la tensión de referencia $V_{declarada}$.

$$I_{sag} = \frac{V_{nodo}}{V_{declarada}} \quad (6)$$

La duración del hueco de tensión depende del tiempo de actuación de las protecciones, por lo cual es una característica que ayuda a identificar el evento.

3.5. Armónicos

La evaluación de armónicos se realiza mediante la distorsión total armónica, tanto en tensión (THDV) como en corriente (THDI), la cual determina el grado de distorsión de una señal periódica con respecto a la senoidal y se define en términos de la amplitud de los armónicos, como se muestra en las ecuaciones (7) y (8).

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (7)$$

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (8)$$

El índice I_{THDV} de la ecuación (9) evalúa la THDV, donde $THDv_{nodo}$ es la distorsión armónica total en tensión de cada nodo y $THDv_{limite}$ es el límite propuesto por la norma NTC 5001 [14] / IEEE519 [20] y que se muestra en la tabla II.

$$I_{THDV} = \frac{THDv_{nodo}}{THDv_{max}} \quad (9)$$

Tabla II. Valores de referencia de THDv [15].

Rango de tensión	Distorsión armónica individual (%)	Distorsión armónica total THDv (%)
$1kV < V_n < 69kV$	3	5
$69kV < V_n < 161kV$	1,5	2,5
$V_n > 161kV$	1	1,5

La evaluación de la distorsión armónica total en corriente (THDI) recurre a otro índice complementario de distorsión total de la demanda TDD ecuación (10); de acuerdo con la norma NTC 5001 [14] / IEEE519 [20], este índice refleja la importancia de las distorsiones armónicas de corriente respecto a la carga máxima del sistema medido, ya que podrían presentarse altas distorsiones de corriente, es decir una medida de $THDi$ elevada, con bajos niveles de carga, que no afectarían en igual proporción al sistema.

$$TDD = THDi * \frac{I_1}{IL} \quad (10)$$

Debido a que los límites del TDD, tabla III, están en función de la corriente de corto circuito y la corriente de carga, se presentan diferentes límites en cada uno de los nodos del sistema de pruebas, lo cual dificulta la tarea de normalizarlo. Con base en lo expuesto el propósito del índice de la ecuación (11), es cuantificar el aumento o disminución de la TDD en presencia de generación distribuida, donde TDD_{nconGD} y TDD_{nsinGD} son la distorsión total de la demanda de cada nodo con GD y sin GD respectivamente.

$$I_{TDD} = \frac{TDD_{nconGD}}{TDD_{nsinGD}} \quad (11)$$

Tabla III. Valores límite de distorsión de corriente armónica individual (Di) y de distorsión total de demanda (TDD) en Porcentaje de la corriente de carga (IL) (Armónicos Impares) [15]

Límites de distorsión en corriente para sistemas de distribución. $120V < Vn \leq 69kV$						
Relación I_{sc}/I_l	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

3.6. Comparación de índices

Los índices propuestos para la evaluación de la conexión de la generación distribuida en redes de distribución se ha basado en algunas ventajas que ofrecen los conceptos de los índices UPQI, que han ido evolucionando a lo largo de los últimos años. En la Figura 7 se expone un comparativo entre las características de los índices propuestos y los índices UPQI.

Características de los principales procedimientos de normalización.

De acuerdo con el artículo Nuevo procedimiento para la normalización de valores numéricos en la toma de decisiones [23] describe las características de los procedimientos utilizados por los índices propuestos y UPQI:

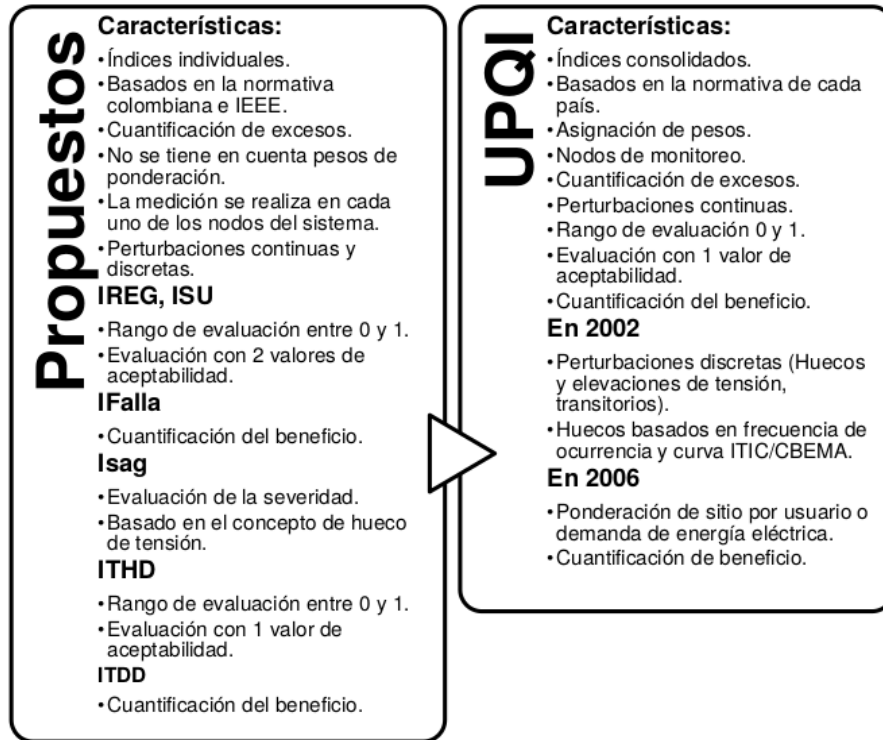


Figura 7. Comparativo de índices Propuestos e UPQI Unifiedpowerqualityindex.

La normalización es la operación mediante la cual un conjunto de valores de una determinada magnitud son transformados en otros, de tal suerte que estos últimos pertenezcan a una escala predeterminada.

La normalización puede realizarse como se ilustra en la (Figura 8):

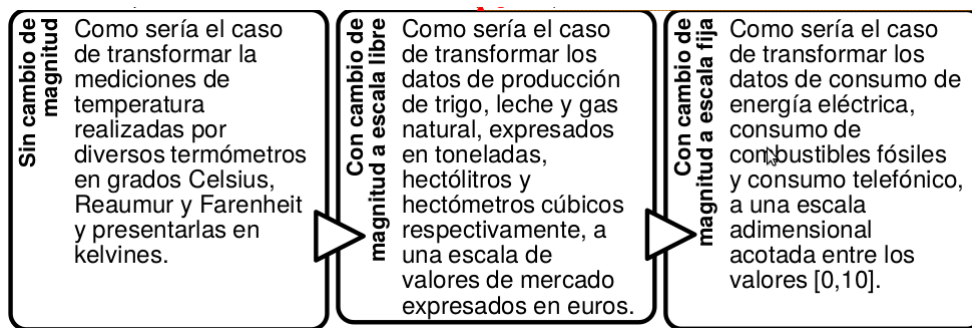


Figura 8. Modos de normalización.

En la Figura 9, se exponen las características de los procedimientos utilizados para la normalización de los índices propuestos y UPQI, con la finalidad de conocer las ventajas y desventajas que matemáticamente podrían presentarse con cada uno de ellos.

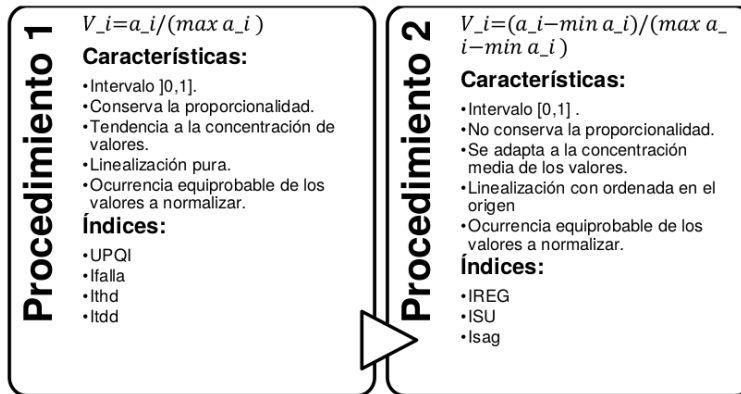


Figura 9. Procedimientos de normalización.

En [23] se aclaran varios aspectos con la concentración de valores: para aquellas ocasiones en las que exista la necesidad de obtener valores normalizados no concentrados, es imprescindible seleccionar un procedimiento de normalización que corrija esta circunstancia. En el caso de la normalización lineal, la condición necesaria para conseguir esta corrección es la proporcionalidad directa entre la concentración de los valores a normalizar y la pendiente de la recta de normalización. De los procedimientos descritos solo el segundo cumple esta condición, ya que la pendiente de la recta de normalización es inversamente proporcional a la amplitud del intervalo de valores y este, a su vez, es inversamente proporcional a la concentración de dichos valores. Quizá por esta característica sea uno de los procedimientos más utilizados en la práctica a pesar de no conservar la proporcionalidad entre los valores originales y los normalizados.

4. Ejemplo de aplicación de índices normalizados propuestos

Para evaluar el impacto de la generación distribuida sobre el perfil de tensión, se tomó como caso de estudio el sistema de prueba IEEE 34 nodos (figura 10) el cual es un alimentador real situado en Arizona, con tensión nominal de 24.9 kV [24].

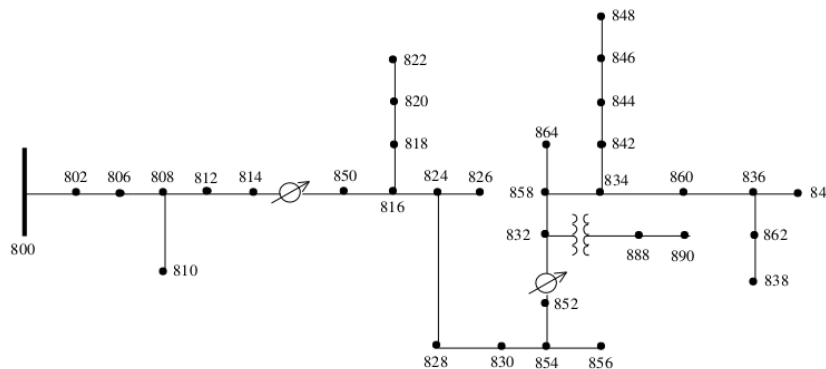


Figura 10. Sistema IEEE de 34 nodos [24].

En la tabla IV se presenta el análisis del comportamiento del perfil de tensión con el índice IREG, el cual se realizó a 3312 datos provenientes de 138 nodos durante 24 horas del día.

Tabla IV. Resumen análisis del perfil de tensión índice IREG

GD nodo	Promedio	Desviación estándar	Max (V)	Nodo	Min (V)	Nodo	Límite máximo sobrepasado %	Límite mínimo sobrepasado %
Sin GD								
	0,867	0,106	1,075	814.2	0,082	890.1	7,427	0
FP 0								
890	0,853	0,145	1,813	890.3	0,512	852.1	14,674	0
832	0,871	0,103	1,139	814.3	0,067	890.1	12,983	0
836	0,86	0,104	1,139	814.3	0,066	890.1	12,983	0
848	0,86	0,104	1,139	814.3	0,065	890.1	12,983	0
FP 1								
890	0,881	0,086	1,334	890.1	0,598	mid822.1	12,077	0
832	0,872	0,102	1,088	814.3	0,066	890.1	11,715	0
836	0,878	0,104	1,088	814.3	0,066	890.1	11,745	0
848	0,875	0,104	1,089	814.3	0,067	890.1	11,745	0
FP 0,85 en atraso								
890	0,875	0,136	1,867	890.1	0,533	852.3	15,187	0
832	0,875	0,104	1,146	814.3	0,533	890.3	13,164	0
836	0,875	0,106	1,146	814.3	0,533	890.3	13,225	0
848	0,875	0,106	1,146	814.3	0,533	890.3	13,225	0
FP 0,85 en adelante								
890	0,875	0,097	1,075	814.2	0,28	890.3	6,129	0
832	0,875	0,101	1,075	814.2	0,075	890.1	7,82	0
836	0,875	0,103	1,075	814.2	0,076	890.1	7,85	0
848	0,875	0,103	1,075	814.2	0,077	890.1	7,911	0

A manera de ejemplo en la ecuación (12) se ilustra el cálculo del índice de regulación en el nodo 824 fase 2 en la hora 2 del perfil de tensión.

- Tensión sin GD = 14680,05 V
- Tensión nominal de fase = 14376,02 V
- V_{max} (+5 % de la tensión nominal) = 15094,80 V
- V_{min} (-10 % de la tensión nominal) = 12938,40 V
- $V_{min} = 14680,05 V$

$$REG = \frac{14680,05 V - 12938,40 V}{15094,80 V - 12938,40 V} = 0,807 pu \quad (12)$$

El resultado obtenido de 0,807 en *p.u.* en la ecuación (12), se encuentra en el rango entre 0 y 1 y por lo tanto no alcanza o sobrepasa ninguno de los límites permisibles.

4.1. Índice de regulación IREG sin GD

En la figura 11 se muestra de manera general el perfil en todos los nodos del sistema al aplicar el índice IREG sin GD.

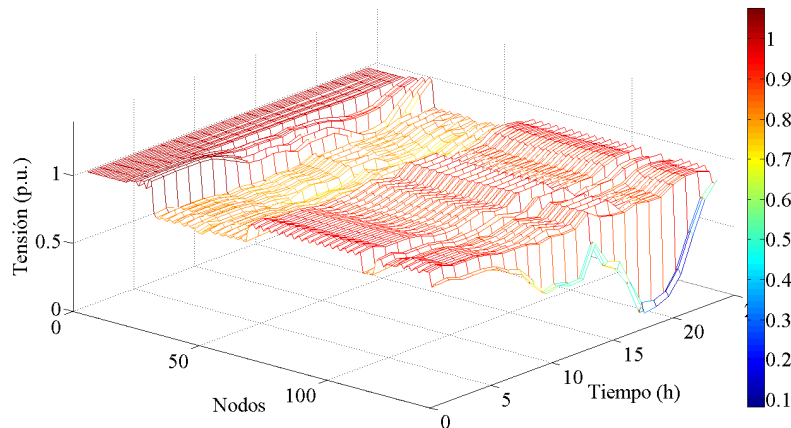


Figura 11. Perfil de tensión sin GD índice IREG.

La Tabla IV se muestra que sin GD solo en el 7,42 % de las veces se sobrepasa el límite máximo aceptable y su valor llega a 1,075. Asimismo, los nodos que han superado la máxima tensión permisible son los cercanos al nodo infinito durante las primeras horas del día, incluso el nodo fuente supera el límite durante el mayor tiempo del día (18 horas). Cabe añadir que los valores más cercanos a 0 se registran en el nodo 890 que corresponde al nivel de 2401,77 V.

4.2. Índice de regulación IREG con GD

En la Tabla IV se muestra que el caso con el mejor promedio 0,853 p.u. en comparación con el escenario sin GD se encuentra conectando GD en el nodo 890 con un factor de potencia 0; sin embargo se supera el límite aceptable 1,81 p.u. y superando el límite máximo aceptable 14,67 % volviéndolo un caso crítico.

El mayor incremento en la tensión (1,86 p.u) ocurre en el nodo 890 fase 1 cuando se conecta el generador en el mismo nodo 890 con factor de potencia 0,85 en atraso; es decir, la tensión de fase alcanza 2834,10 V cuando la tensión nominal es de 2401,77 V. En la Figura 12 se muestra el perfil de tensión en el nodo 890 en la fase 1.

La mejor opción se presenta al conectar GD en el nodo 890 con factor de potencia en adelante, debido a que se mantiene el sobrepaso del límite superior aceptable del escenario sin GD 1,075 p.u. y su ocurrencia baja del 7,42 % el 6,12 %, además se alejó del límite inferior que paso de 0,08 p.u. a 0,28 p.u. Dicho de otra manera, fue el caso donde menos se afectó el perfil de tensión.

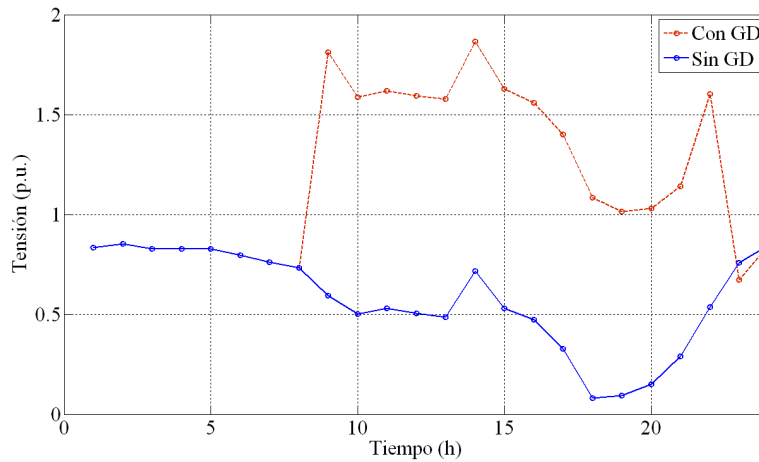


Figura 12. Perfil nodo 890.1, GD en 890 FP=0.85 atraso. Caso crítico.

El caso óptimo se presenta cuando se conecta el generador con factor de potencia 0,85 en adelante en el nodo 890. Lo ideal, sería un perfil de tensión en donde todos los nodos del sistema tuvieran como tensión real la misma tensión nominal; de acuerdo con el índice IREG la tensión nominal del sistema es 0,666 p.u. con un promedio en los datos de 0,666 p.u. y una desviación estándar cero.

5. Conclusiones

La contribución al caso colombiano se hace con la aplicación en un entorno GD por medio del índice de evaluación, el cual sirve como aporte de la Ley 1715 del 2014 [6] de Colombia reflejada en el Artículo 8 sobre la promoción de la autogeneración a pequeña y gran escala y la generación distribuida. En materia de regulación no existe un marco regulatorio que contemple la inclusión de la GD en el sistema interconectado nacional, por lo tanto algunos resultados no pueden ser aclarados completamente, ni se puede evidenciar la utilidad de la inclusión de GD. A parte del marco regulatorio, se requiere más investigación sobre la tecnología de la generación distribuida y el nivel de penetración de la misma.

Para evaluar el impacto (con enfoque cualitativo y cuantitativo, sin y con generación distribuida), basados en la normatividad de las perturbaciones de calidad de potencia (perfil de tensión, sobretensiones, corrientes de falla, huecos de tensión y armónicos), se propusieron los índices normalizados (*IREG* Regulación de tensión, *ISU* sobretensión y subtensión, I_{falla} corriente de falla, I_{sag} amplitud de hueco de tensión, I_{THDV} distorsión armónica total en tensión, I_{TDD} distorsión de la demanda total).

Debido a que la normativa colombiana e IEEE no define límites generales y específicos para las corrientes de cortocircuito, la evaluación solo se realiza con base en un índice cualitativo. + Es poco viable generalizar un índice normalizado para distorsión total de la demanda (TDD), ya que en el sistema IEEE 34 nodos cada nodo se cuenta con un límite de distorsión distinto; lo anterior se debe a que el TDD depende de la corriente de corto circuito y la corriente de demanda.

Referencias

- [1] "Renewable power generation costs in 2014", IRENA. 2014
- [2] "Renewables 2014, global status report", REN-21. 2014
- [3] H. Saboori, M. Mohammadi and R. Taghe, "Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types", in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific, pp.1-4, 25-28 March 2011.
- [4] K. El Bakari and W. L. Kling, "Development and operation of virtual power plant system", in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on, pp.1-5, 5-7 Dec. 2011.
- [5] L. I. Dulau, M. Abrudean and D. Bica, "Impact of distributed generation upon Reghin 'Lăpușna Medium Voltage line", in Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2014 International Symposium on , vol., no., pp.1-5, 28-29 Nov. 2014.
- [6] Congreso de la República de Colombia, Ley 1715 de 2014, Bogotá D.C., 2014.
- [7] J. E. S. Haan, P. H. Nguyen, W. L. Kling and P. F. Ribeiro, "Social interaction interface for performance analysis of smart grids", in Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS), 2011 IEEE First International Workshop on, pp.79-83, 17-17 Oct 2011.
- [8] G. Carpinelli, P. Caramia, P. Varilone, P. Verde, R. Chiumeo, I. Mastrandrea, F. Tarsia and O. Ornago, "A global index for discrete voltage disturbances", in Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on, pp.1-5, 9-11 Oct. 2007.
- [9] V. J. Gosbell, B. S. P. Perera and H. M. S. C. Herath, "Unified power quality index (UPQI) for continuous disturbances", in Harmonics and Quality of Power, 2002. 10th International Conference on, vol.1, pp.316-321, 6-9 Oct. 2002.
- [10] P. Caramia, C. D. Perna, P. Verde, F. Buriola, A. Stocco and R. Turri, "Power Quality Indices of Distribution Networks with Embedded Generation", in Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International, vol.3, pp.1026-1030, 6-8 Sept. 2006.
- [11] P. Caramia, G. Carpinelli, A. Russo and P. Verde, "Power Quality Assessment in Liberalized Market: Probabilistic System Indices for Distribution Networks with Embedded Generation", in Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006. International Conference on, pp.1-6, 11-15 June 2006.
- [12] A. Bracale, P. Caramia, G. Carpinelli, A. Russo and P. Verde, "Site and System Indices for Power-Quality Characterization of Distribution Networks With Distributed Generation", in Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.26, no.3, pp.1304-1316, July 2011.
- [13] ICONTEC, Norma Colombiana NTC 1340 Electrotécnica, Tensiones y frecuencia nominales en sistemas de energía eléctrica en redes de servicio público, Colombia, 2004.
- [14] ICONTEC, Norma Colombiana NTC 5001 Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación en punto de conexión común, Colombia, 2008.
- [15] CREG, Resolución Creg 070 de 1998, Colombia.
- [16] CREG, Resolución Creg 024 de 2005, Colombia.
- [17] CREG, Regulación Creg 065 de 2012, Colombia.
- [18] CREG, Resolución Creg 025 de 1995, Colombia.
- [19] ICONTEC, NTC 5000 Calidad de la potencia eléctrica (CPE), Definiciones y términos fundamentales, Colombia, 2002.
- [20] IEEE. "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", in IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995) ,pp.c1-81, June 26 2009.
- [21] Li, Zheng, Yao, Zhang and Lin Lingxue, "Studies on Voltage Sag in Distribution Network Containing Distributed Generations", in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, pp.1-5, 27-29 March 2012.
- [22] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", in IEEE Std 519-1992, pp.1-112, April 9 1993
- [23] V. Cloquell, M. Santamarina and A. Hospitaler, "Universidad de Zaragoza: Nuevo procedimiento para la normalización de valores numéricos en la toma de decisiones", 2001. [En línea]. Available: <http://www.unizar.es/aeipro/finder/ORGANIZACION%20Y%20DIRECCION/DD18.htm>

[24] W. H., Kersting, Radial distribution test feeders”, in Power Systems, IEEE Transactions on, vol.6, no.3, pp. 975-985, Aug 1991.

Diego González Herrera

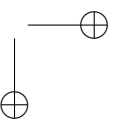
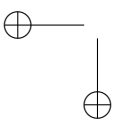
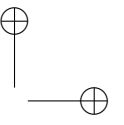
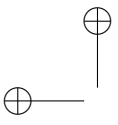
Ingeniero Eléctrico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ha laborado como ingeniero de proyectos y actualmente labora con Applus Norcontrol.
e-mail: diego.gonzalez.herrera@applus.com

Gustavo Luna Russi

Ingeniero Eléctrico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ha laborado como ingeniero de proyectos y actualmente es ingeniero de proyectos en Ospina Padilla Asociados.
e-mail: tavorussi@gmail.com

Edwin Rivas Trujillo

Profesor Titular Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniero Electricista, Magister en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica, Máster en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática y Doctor en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, Director del grupo de Investigación de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética – GCEM.
e-mail: erivas@udistrital.edu.co





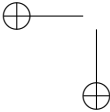
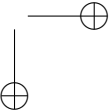
Instrucciones para los Autores

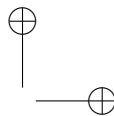
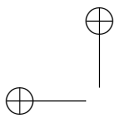
Introducción

La revista INGENIERÍA es una publicación periódica-científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Tiene como propósito principal divulgar los resultados de investigación de la comunidad académica de la Facultad del país y del exterior. Por tal motivo, los artículos que se publican en la revista deben tener relación con el trabajo en ingeniería, en general, y con las derivaciones de la ingeniería que se desarrollan en la Universidad, en particular. Su frecuencia es semestral (dos ediciones por año). Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de los artículos dentro de la revista INGENIERÍA se hace de acuerdo con la categorización sugerida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología y e Innovación COLCIENCIAS, para revistas científicas y tecnológicas indexadas. Los autores deben definir y comunicar en la carta de presentación y en la plantilla del artículo la categoría del mismo. Las categorías de los artículos están identificadas por el número de orden de la siguiente lista y sus características son:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
 2. Artículo de reflexión: Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
 3. Artículo de revisión: Documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.
 4. Artículo cortó: Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.
 5. Reporte de caso: Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.
- 
- 



6. Revisión de tema: Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

La Revista INGENIERÍA dará prelación a aquellos documentos que se clasificarían en los artículos tipo 1, 2 ó 3.

Procedimiento para el envío de artículos para publicación

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: El formato de la presente carta puede descargarse en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>.
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que se aceptan las normas de publicación de la Revista.
- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Instructivos>.
Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:
 - Debe tener al menos título de maestría
 - Pertenecer a una institución diferente a la de los autores
 - Haber realizado publicaciones en los últimos tres años

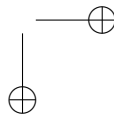
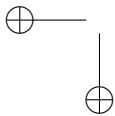
Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica revista_ing@udistrital.edu.co

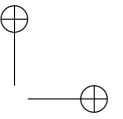
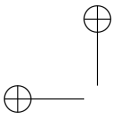
- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente los artículos con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una o dos veces después de presentar el artículo.





- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

DERECHOS DE AUTOR

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista Ingeniería, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

