

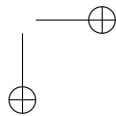
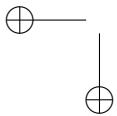
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 23 • Número 1 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2018



REVISTA Ingeniería

Volumen 23 · Número 1 · Año 2018 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Monfort Universities,
Reino Unido

Diego Cantor, PhD.
University of Western Ontario
Robarts Research Institute, Canadá

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

Luz Esperanza Bohorquez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication Technologies - Haute Ecole
d'Ingénierie et de Gestion du Canton
de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bío-Bío,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Victor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Marco Aurelio Alzate, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Ana María Peña, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Rodrigo Herrera, MSc.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Henry Alberto Diosa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Edwin Rivas, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Ricardo García Duarte
Rector

Nelson Libardo Forero Chacón, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Carlos E. Montenegro Marín, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Carolina Suárez R., MSc.
Gestora Editorial

Jenny Alexandra Jimenez, MSc.
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diagramación L^AT_EX

Imagen Editorial
Impresión

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Rafael C. Nuñez, PhD.
University of Miami. Estados Unidos

Alexander Alberto Correa, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

José de Jesús Medel, PhD.
Instituto Politécnico Nacional.
México

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

Abdul Zuluaga Mazo, MSc.
Politécnico Colombiano "Jaime Isaza
Cadavid"

Lely Adriana Luengas, PhD.
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

José Ortiz-Ramírez, PhD(c).
Universidad Católica de Colombia

Olayemi Mikail Olaniyi, PhD.
Federal University of Technology.
Nigeria

Nelson Obregón Neira, PhD.
Pontificia Universidad Javeriana.
Colombia

Pedro Sánchez Caimán, PhD(c).
Universidad Militar Nueva Granada.
Colombia

Javier Mauricio Naranjo, PhD.
Universidad Católica de Manizales.
Colombia

Wilmar Osorio Viana, PhD.
Universidad Católica de Manizales.
Colombia

Carlos Mario González, PhD(c).
Universidad Nacional de Colombia

Oscar Fajardo Montana, PhD.
Universidad Central. Colombia

Alvaro José Rojas, PhD.
Universidad Autónoma de Occidente.

Miguel Melgarejo, PhD(c).
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

Carlos Eduardo Moreno Mantilla, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



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. Está trabajo se distribuye bajo la 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.

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

CARÁTULA

INDIZADA EN



La carátula está inspirada en el artículo sobre estudio de contaminantes atmosféricos de la industria del papel, incluido en este número. A su vez es una metáfora sobre cómo la aplicación errónea de los modelos de medición de Pubindex, desmotiva en vez de fomentar la labor editorial científica, contaminando la visibilidad y credibilidad de nuestras páginas (ver nota editorial).

Idea creativa y pruebas:
Sergio A. Rojas, Carolina Suárez R.
Diseño gráfico: Lilianna Valencia L.

TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Excluded on unfair grounds** 4
Excluidos sin justa causa
Sergio A. Rojas

Computational Intelligence

- Fuzzy Inference System based on Boolean and Kleenean Relations with Convex Combiner** 7
Sistema de Inferencia Difusa basado en Relaciones Booleanas y Kleeneanas con Combinador Convexo
Juan D. Chacón · Jairo Soriano · Omar Salazar

Environmental Engineering

- Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants From a Paper Factory Using the AERMOD Model** 31
Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD
Oscar Andrés Vidal-Daza · Andrea Pérez-Vidal

Industrial Engineering

- Warehouse Sizing based on Material Requirements Planning for a Polyurethane Coating Factory** 48
Dimensionamiento de Almacén a partir de la Planificación de Requerimiento de Materiales en una Fábrica de Revestimiento de Poliuretano
Andrés Mauricio Hualpa Z. · Carolina Suárez R.

Electronic Engineering

- 3D Printing as a Didactic Tool for Teaching some Engineering and Design Concepts** 70
Impresión 3D como Herramienta Didáctica para la Enseñanza de Algunos Conceptos de Ingeniería y Diseño
Edwin Blasnilo Rúa R. · Fernando Jiménez D. · German Andrés Gutiérrez A. · Nelson Iván Villamizar

Complex Systems

- A Conceptual Exploration of Pattern Formation in Social Self-Organized Systems** 84
Una Exploración Conceptual de la Formación de Patrones en Sistemas Sociales Autorganizados
David Anzola

- Instructions for Authors** 103

Excluidos sin justa causa

REVISTA Ingeniería

En el recién publicado listado de revistas indexadas en Publindex (Resolución 0929 del 15 de septiembre de 2017-Resultados Definitivos), Colciencias ha excluido absurdamente a la *Revista INGENIERÍA*. Al respecto arguye que la revista incumplió para el año 2016 el criterio habilitante de contar con al menos 50% de autores externos a la institución editora, explicando que “no es posible garantizar que aquellas personas que no tienen registro de su filiación institucional en CvLAC estén vinculadas a instituciones diferentes a la institución editora”. Es decir que, para Colciencias, cualquier autor que no tenga diligenciado o actualizado el campo de afiliación institucional actual en CvLAC, sea cual sea el motivo, es considerado automáticamente como vinculado a la Universidad Distrital, independiente de su afiliación real.

Craso error. La realidad es que el 57% de los autores (39 de 69) que en el 2016 publicaron en nuestra Revista son externos a la Universidad Distrital. De esa manera lo declararon ellos mismos al firmar sus artículos y de esa manera lo avaló la Revista al publicarlos. Al desconocer este hecho fidedigno, Colciencias pone en tela de duda la buena fe de nuestros autores, desconociendo a su vez la credibilidad que nos caracteriza.

Nos parece indignante. Asumir que la fuente correcta de verificación sea el sistema de información CvLAC que administra la misma Colciencias, y que incidentalmente es susceptible de estar desactualizado pues su diligenciamiento, es autonomía personal de cada investigador, quien voluntariamente podría decidir sencillamente no actualizar por considerarlo impropcedente o inoficioso, es pretender que las revistas científicas asuman dentro de sus competencias la vigilancia del mantenimiento del sistema CvLAC; a todas luces un despropósito. Entre otras razones, porque el dato de afiliación institucional actual no es obligatorio en dicho sistema, o porque además es incoherente validar la información declarada por los autores al momento de la publicación en el 2016 con un dato de afiliación en la fecha del corte de la convocatoria (mayo de 2017), pues esta información no necesariamente debe corresponder (el autor pudo cambiar de institución o haberse trasladado de país o haber fallecido, etc. en ese transcurso de fechas). Para completar, en ningún aparte de la resolución o de los términos o del modelo de medición de la Convocatoria No.768 de 2016 Indexación de Revistas-Publindex, se menciona explícita e inequívocamente que el campo afiliación institucional actual del CvLAC sería el instrumento de comprobación de ese criterio.

Open access



Citación: S. Rojas, “Excluidos sin justa causa”, *Ingeniería*, vol. 23, no. 1, pp. 4-6, 2018.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12832>

Si Colciencias tuvo algún resquicio de duda respecto a la afiliación de nuestros autores, bien hubiera podido realizar una averiguación adicional en la fuente original que suponemos debe ser la oficina de talento o recurso humano de cada institución, o si aquello representaba una carga excesiva de trabajo para los administradores de la convocatoria, también hubieran podido solicitarnos suministrar dichas certificaciones como documentación adicional requerida (las cuales, dicho sea de paso, los siete autores que Colciencias declara como no externos, han tenido la gentileza de proporcionarnos sin ningún inconveniente).

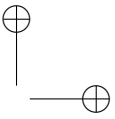
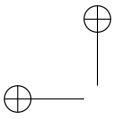
La exclusión es paradójica. Desde hace un par de años la *Revista INGENIERÍA* ha realizado en viraje en sus políticas editoriales buscando mejorar la visibilidad, el impacto, la regularidad y la calidad científica de los artículos que publica. Así mismo, hemos procurado disminuir los tiempos de respuesta, evaluación y producción, enfatizando en dar un servicio cordial a nuestros colaboradores; la mayoría de ellos, autores, evaluadores, editores y público en general han reconocido este mejoramiento continuo.

Los resultados obtenidos en dicho periodo han sido notables. En estos dos últimos años hemos sido indizados en EBSCO, DOAJ, Redalyc, Scielo y Google Scholar. Nuestro índice h desde el 2012 [1] acaba de subir a diez ($h=10$), nuestro índice h5 es de seis ($h5=6$) según certifica oficialmente Google Scholar [2] con corte a junio de 2017. Durante este año, hasta el 09 de noviembre, nuestros artículos han recibido 153 citaciones, el año pasado (2016) recibimos 150, históricamente tenemos 502 citaciones. Cambiamos nuestra frecuencia de aparición a tres ediciones al año, con publicación anticipada de nuestra versión en línea a través de nuestra plataforma Web completamente actualizada y bilingüe. En el año 2016 la tasa de aceptación fue de 42 %, los autores externos representaron un 57 % del total, los evaluadores externos un 85 %, el tiempo promedio de evaluación fue de 8 semanas y el de producción fue de 15 semanas.

Del mismo modo fuimos la primera revista de ingeniería en Colombia en adoptar la innovación del resumen estructurado como alternativa de divulgación científica, así como también fuimos pioneros en presentar nuestro contenido por secciones. Definimos una taxonomía clara de tipos de artículos según el nuevo conocimiento que reportan y hemos contribuido regularmente con nuestras notas editoriales a la pedagogía de la comunicación científica, la ética, el anti plagio y la bibliometría.

Estos avances logrados evidencian el cumplimiento de hasta los criterios más ácidos del nuevo modelo de evaluación de Colciencias. Lastimosamente no lo son para las lógicas absurdas de la medición aplicada por Publindex, lógicas que deberían sustentarse desde la racionalidad académica y no desde la racionalidad burocrática de un sistema cada vez más redundante en relación a los índices internacionales con los que se homologa ($A1 \approx Q1$, $A2 \approx Q2$, etc.), con una aplicación limitada al Decreto 1279 de 2002, pues su visibilidad como índice bibliográfico para consulta de la comunidad académica es imperceptible y además soportado en una plataforma digital que dicho sea de paso, es dispendiosa, poco amigable y susceptible a inconsistencias y pérdida de información.

Es frustrante que los editores tengamos que desviar esfuerzos en menesteres no académicos como la vía gubernativa. Pero no podemos aceptar descalificaciones con argumentos espurios y, más aun, despreciando la credibilidad de la *Revista*, que después de todo, es el atributo máspreciado



de cualquier científico, o canal de divulgación científica en nuestro caso. Las evaluaciones, en todo ámbito, son procesos enfocados en detectar debilidades que puedan o deban ser corregidas, no en desconocer fortalezas, que no esperamos sean premiadas, sino simplemente reconocidas en su justa medida. Creemos que de eso debe tratar también el fomento a la ciencia, misión en la que Colciencias nuevamente nos decepciona.

Quisiéramos agradecer la confianza que en el transcurso de este proyecto han depositado en nuestra propuesta. Indudablemente es un esfuerzo colaborativo que no podría fructificar sin el apoyo de los lectores, los autores, los revisores, los editores, la institución, en fin, sin el apoyo de la comunidad científica; para nosotros será honroso seguir recibiendo ese respaldo. En reciprocidad, reiteramos nuestro ahínco y compromiso en continuar ofreciendo las páginas de la *Revista* como un medio idóneo de comunicación de la actividad científica de la ingeniería en nuestro país.

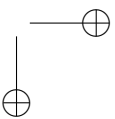
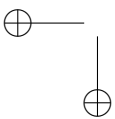
Bogotá D.C., 10 de noviembre de 2017

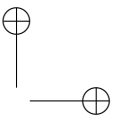
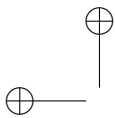
Sergio A. Rojas, PhD.

Editor General

Referencias

- [1] Google Scholar, Revista INGENIERÍA, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2017. [En línea]. Consultado el 9 de noviembre de 2017. Disponible en: <https://scholar.google.com/citations?user=sUM9brMAAAAJ&hl=en> ↑5
- [2] Google Scholar, Revista INGENIERÍA, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, h5. 2017. [En línea]. Consultado el 9 de noviembre de 2017. Disponible en: https://scholar.google.com/co/citations?hl=en&view_op=list_hcore&venue=qDBV5cwqJAgJ.2017 ↑5





Research

REVISTA
Ingeniería

Fuzzy Inference System based on Boolean and Kleenean relations with Convex Combiner

Sistema de Inferencia Difusa basado en Relaciones Booleanas y Kleeneanas con Combinador Convexo

Juan D. Chacón¹, Jairo Soriano¹, Omar Salazar^{*,1}

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas

*Correspondence: osalazarm@correo.udistrital.edu.co

Recibido: 19-12-2016. Modificado: 21-03-2017. Aceptado: 02-05-2017.

Abstract

Context: In the design process of Fuzzy Inference Systems based on Boolean and Kleenean Relations (FIS-BKR) there is a dilemma choosing the regular kleenean extensions of a given boolean function. The set of possible kleenean extensions of a boolean function has a lattice structure under the usual partial order of functions. The fuzzy convex combination proposed by Zadeh guarantees some properties related to this order.

Method: The addition of a convex combiner just before the defuzzifier offers a solution to the above situation. The ISE (Integral Squared Error) and ITSE (Integral Time-weighted Squared Error) performance indexes were used on an application for tuning a liquid level control system.

Results: The tuning process carried out on the FIS-BKR controller with fuzzy convex combiner using constant coefficients, implied an improvement of the controlled system up to 1.427% for ISE index and up to 21.99% for ITSE with respect to the extreme extensions.

Conclusions: New evidence of convenient characteristics of FIS-BKR controllers with fuzzy convex combiner was presented when the performance indexes ISE and ITSE were evaluated. On the other hand, although in this work parameter tuning for convex combination was done by grid search (brute force), it would be interesting to study more effective optimization methods for this purpose.

Keywords: Fuzzy convex combiner, Level control, Fuzzy control, ISE performance index, ITSE performance index.

Acknowledgments: The authors would like to thank to the Laboratory for Automation and Computational Intelligence (LAMIC) for all its contributions to this paper.

Language: Spanish.

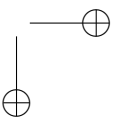
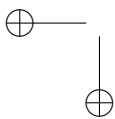
Open access



Cite this work as J. D. Chacón, J. Soriano, O. Salazar, "Fuzzy Inference System based on Boolean and Kleenean Relations with Convex Combine", Ingeniería, vol. 23, no.1, pp. 7-30, 2018.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.11138>



Resumen

Contexto: En el proceso de diseño de sistemas de control difuso basados en relaciones booleanas o kleeneanas (FIS-BKR, por sus siglas en inglés) existe una clara disyuntiva a la hora de elegir las extensiones kleeneanas regulares de una función booleana dada. El conjunto de posibles extensiones kleeneanas de una función booleana tiene estructura reticular bajo el orden parcial usual de funciones. La combinación convexa difusa propuesta por Zadeh garantiza ciertas propiedades relacionadas con este orden.

Método: La adición de un combinador convexo antes del defusificador ofrece una solución a esta situación. Los índices de desempeño ISE (Integral Squared Error) e ITSE (Integral Time-weighted Squared Error) son usados en la sintonización de un sistema de control de nivel de líquido en un tanque cilíndrico.

Resultados: El proceso de sintonización llevado a cabo en el controlador de nivel tipo FIS-BKR con combinador convexo difuso usando coeficientes constantes implicó una mejora en la respuesta del sistema controlado de hasta el 1.427% para el ISE y de hasta el 21.99% para el ITSE con respecto al desempeño de las extensiones extremas.

Conclusiones: Se presentaron nuevas evidencias de las características favorables de controladores FIS-BKR con combinador convexo difuso cuando se evaluaron los índices de desempeño ISE e ITSE. Por otro lado, teniendo en cuenta que la sintonización de los parámetros de combinación convexa se realizó mediante búsqueda exhaustiva, como trabajo futuro valdría la pena explorar técnicas de optimización más eficientes.

Palabras clave: Combinador convexo difuso, Control de nivel, Control difuso, Criterio ISE, Criterio ITSE.

Agradecimientos: Los autores quieren agradecer al grupo de investigación LAMIC (Laboratorio de Automática e Inteligencia Computacional) por sus contribuciones en lo relacionado a este artículo.

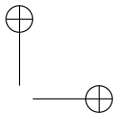
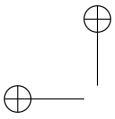
Idioma: Español

1. Introducción¹

Los automatismos basados en lógica booleana (también llamada clásica o bivalente) han sido ampliamente utilizados para controlar distintos fenómenos, por ejemplo, temperatura, nivel, caudal y otros [2]. Estos cuentan con principios básicos de diseño (como tablas de verdad), y técnicas de simplificación (mapas de Karnaugh, por ejemplo) que ayudan a su rápido planteamiento, fácil aplicación y bajo costo computacional. Sin embargo, presentan serios inconvenientes a causa de la naturaleza discontinua de la acción de control sobre los fenómenos sobre los que operan.

Buscando mejorar este comportamiento Soriano *et. al.* [3] propusieron el reemplazo de la lógica booleana por la lógica difusa en el diseño de automatismos. Esto derivó en un nuevo esquema de inferencia difusa con claras diferencias sobre el esquema clásico propuesto por Mamdani y As-

¹Nota aclaratoria: el presente documento hace una extensión del artículo [1], el cual fue socializado por los mismos autores en el marco del Congreso Mundial en Inteligencia Computacional (WCCI 2016) de IEEE. El presente manuscrito exhibe una aplicación original de los controladores FIS-BKR con combinador convexo, mostrando nueva evidencia de la pertinencia de la técnica cuando se usan índices de desempeño ISE e ITSE. Por otro lado, también incluye una reflexión sobre la cardinalidad del conjunto de funciones extensión de una función booleana dada y la ventaja que ofrece la técnica en este sentido.



silian [4]. Desde ese entonces han aparecido varias aplicaciones: control de temperatura, control de nivel, control en procesos químicos, control de velocidad de un motor, control de actitud de un satélite, control en convertidores DC-DC, identificación de sistemas no lineales, identificación de series de tiempo, identificación de personas, mapas cognitivos difusos, y además estudios teóricos con el fin de consolidar las bases de este sistema de inferencia difusa. Entre estas contribuciones se destaca la realizada por Salazar *et. al.* [5], que presenta un método para extender funciones booleanas (o de lógica clásica) a funciones regulares² kleeneanas (o de lógica trivalente de Kleene). Tema con ciertas consecuencias teóricas que son precisamente el punto de partida de este trabajo.

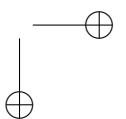
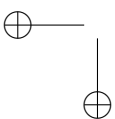
Una de las ventajas de trabajar con funciones kleeneanas para el diseño de controladores difusos está en el hecho de que esta metodología permite proponer bases de reglas en forma de tablas de verdad finitas de tres elementos, que pueden ser representadas mediante fórmulas lógicas fáciles de computar, similar a como se hace en el diseño de automatismos booleanos. La metodología para el diseño y optimización de sistemas de control difuso basados en relaciones booleanas y kleeneanas (FIS-BKR) fue presentada en [7]. Dicha metodología hace amplio uso de la extensión de funciones booleanas a kleeneanas regulares. Sin embargo, la forma de extender una función booleana a una kleeneana regular no es única. Esto en ocasiones convierte el proceso de diseño en un reto debido a que la cantidad de extensiones puede ser enorme e inmanejable. La elección de una extensión regular adecuada para una aplicación particular requiere ciertos criterios de ingeniería.

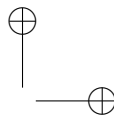
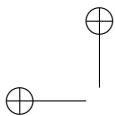
La propuesta sobre la que se basa este artículo fue introducida en [1]. Se usa la estructura reticular de las funciones kleeneanas que son extensiones regulares de una función booleana dada y la combinación convexa difusa introducida por Zadeh [8]. Esta metodología de diseño cambia el panorama de la optimización de un problema discreto sobre un conjunto finito a uno continuo en un conjunto infinito.

En este artículo se presenta una aplicación al control de nivel de un sistema hidráulico compuesto por un tanque cilíndrico horizontal. Problema que fue trabajado en [9]–[12]. Los índices de desempeño que se trabajaron son el ISE (Integral Squared Error) e ITSE (Integral Time-weighted Squared Error) los cuales fueron minimizados en cierto espacio de parámetros relacionados con los coeficientes de la combinación convexa difusa. El control con dicha técnica implicó una mejora en la respuesta del sistema controlado de hasta el 1.427% para el ISE y de hasta 21.99% para el ITSE con respecto al desempeño de las extensiones extremas. Se evidenció la aparición de nuevos puntos de operación que ayudarán al diseñador, y creemos presentan importantes propiedades para futuras aplicaciones.

Consideramos que esta metodología, aparte de simplificar el proceso de diseño, capta la naturaleza de los sistemas de inferencia basados en relaciones algebraicas. Sin embargo, tareas relacionadas con la optimización de parámetros quedan abiertas, y serán clave a la hora de buscar un modelo más completo de este tipo de controladores.

²La regularidad de las funciones kleeneanas, estudiada por Mukaidono [6], es condición necesaria y suficiente para que estas funciones puedan ser expresadas por fórmulas lógicas.





Este documento está dividido en tres grandes partes. En la primera se presentan algunos preliminares sobre funciones lógicas así como de controladores FIS-BKR y su metodología de diseño. En la segunda se presenta la propuesta sobre el controlador FIS-BKR con combinador convexo. En la tercera parte se exhibe una aplicación de control de nivel en un tanque cilíndrico, donde se realiza un proceso de sintonización y se presentan los resultados. El documento concluye con una sección de conclusiones.

2. Preliminares

Definición 1 (Lógica trivalente de Kleene). Se denotará por \mathcal{K} el álgebra de valores de verdad $\langle K = \{0, 1/2, 1\}; \vee, \wedge, ', 0, 1 \rangle$, con el orden usual para sus elementos ($0 < 1/2 < 1$), donde las operaciones disyunción (\vee) y conjunción (\wedge) entre $a, b \in K$ están dadas por $a \vee b = \max \{a, b\}$ y $a \wedge b = \min \{a, b\}$. El complemento ($'$) de $a \in K$ es $a' = 1 - a$. También se identificará el elemento $1/2$ con la letra u . En la Tabla I(b) se muestran estas operaciones lógicas actuando sobre K .

Definición 2 (Lógica bivalente de Boole). La restricción de \mathcal{K} al conjunto $B = \{0, 1\}$ se conoce como lógica bivalente de Boole (lógica clásica o lógica booleana) y se denota con la letra \mathcal{B} . En la Tabla I(a) se muestran las operaciones lógicas actuando sobre B .

Tabla I. (a) Operaciones lógicas disyunción (\vee), conjunción (\wedge) y complemento ($'$) en lógica bivalente de Boole. (b) Operaciones lógicas disyunción (\vee), conjunción (\wedge) y complemento ($'$) en lógica trivalente de Kleene.

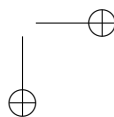
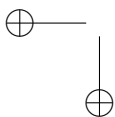
(a)			(b)																		
\vee	0	1	\wedge	0	1	$'$	0	1	\vee	0	u	1	\wedge	0	u	1	$'$	0	u	1	
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	u	1	0	0	0	0	0	1	0	u	u	u
1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	u	1	1	0	u	1	1	0

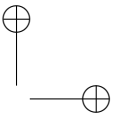
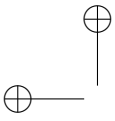
Definición 3 (Lógica difusa estándar). Se denotará por \mathcal{I} el álgebra de valores de verdad conformada por $\langle I = [0, 1]; \vee, \wedge, ', 0, 1 \rangle$, con el orden usual para sus elementos, donde las operaciones disyunción (\vee) y conjunción (\wedge) entre $a, b \in I$ están dadas por $a \vee b = \max \{a, b\}$ y $a \wedge b = \min \{a, b\}$. El complemento ($'$) de $a \in I$ es $a' = 1 - a$.

Observación 1. Aunque \mathcal{K} e \mathcal{I} no están definidas sobre los mismos conjuntos de valores de verdad, \mathcal{K} e \mathcal{I} tienen la misma lógica proposicional [13], es decir, sus proposiciones lógicas son las mismas. Como consecuencia, \mathcal{K} permite la elaboración de tablas de verdad y obtención de fórmulas lógicas para \mathcal{I} , lo cual sería imposible para esta última debido a su carácter infinito.

Definición 4 (Funciones de lógica bivalente, trivalente y multivalente). Una función f de n variables se dice *función de lógica bivalente* (FLB) (o función booleana) si es una aplicación de B^n a B , se dice *función de lógica trivalente* (FLT) (o función kleeneana) si es una aplicación de K^n a K , y se dice *función de lógica multivalente* (FLM) si es una aplicación de I^n a I .

Observación 2. Una caracterización de funciones kleeneanas desde un punto de vista más general se encuentra en [14]. Para el propósito de este artículo, una función kleeneana es una aplicación de K^n a K .





Definición 5 (Fórmulas bien formadas). Sea V un conjunto finito de variables. Dadas las constantes $0, u$ y 1 , y los símbolos \wedge, \vee y $'$, el conjunto de fórmulas bien formadas F está definido recursivamente como:

1. $0, 1, u \in F$ y si $x \in V$ entonces $x \in F$.
2. Si $f \in F$ y $g \in F$ entonces $f \wedge g \in F, f \vee g \in F$ y $f' \in F$.

Los elementos de F son llamados *fórmulas bien formadas*, *fórmulas lógicas* o simplemente *fórmulas*.

Es conocido que toda FLB es representable a través de una fórmula que no involucra la constante u en ella. Esto es consecuencia del teorema de expansión de Boole. Sin embargo, esto no siempre es cierto para las FLT. Una clase importante de FLT, llamadas *regulares*, son aquellas que pueden ser representadas por fórmulas.

Definición 6. Se define sobre K el siguiente orden parcial³: $0 \preceq_a u, 1 \preceq_a u$, y $a \preceq_a a$ para todo $a \in K$. La relación \preceq_a no compara 0 y 1 . Esta relación es extendida a K^n como sigue: Sean $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n), \mathbf{b} = (b_1, \dots, b_n) \in K^n$, entonces $\mathbf{a} \preceq_a \mathbf{b}$ si, y solo si, $a_i \preceq_a b_i$ para todo $i = 1, 2, \dots, n$.

Definición 7 (Regularidad). Sea $f : K^n \rightarrow K$ una FLT. f se dice *regular* si, y solo si, $f(\mathbf{a}) \in B = \{0, 1\}$ implica $f(\mathbf{a}) = f(\mathbf{b})$ para todo $\mathbf{b} \preceq_a \mathbf{a}$.

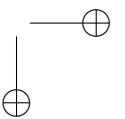
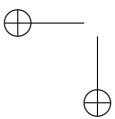
Mukaidono [6] demostró que la regularidad es condición necesaria y suficiente para que una FLT sea representable a través de una fórmula. En esencia, este autor mostró que el conjunto F y el conjunto de las FLT regulares (FLTR) es el mismo. Dado que una FLB (o FLTR) puede tener más de una fórmula, entonces cada FLB (o FLTR) se identificará con su fórmula *canónica*, también llamada *forma normal*⁴.

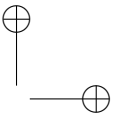
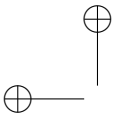
Ahora, dada una tabla de verdad asociada a una FLB (o FLTR) es de interés conocer su *forma normal* (conjuntiva y/o disyuntiva). El siguiente procedimiento tomado y adaptado de [13] se usa para este fin. En [13], [15]–[17] se probó la existencia y unicidad de las formas normales.

- Método 1** (Forma normal disyuntiva [13]).
1. *Para las filas que tienen valor 1 en la columna de f que debe ser puesta en su forma normal disyuntiva:* Formar la *conjunción* de las variables que tienen valor 1 con los complementos de las variables que tienen valor 0 (omitir las variables que tienen valor u).
 2. *Para las filas que tienen valor u en la columna de f que debe ser puesta en su forma normal disyuntiva:* Formar la *conjunción* de las variables que tienen valor 1 con los complementos de las variables que tienen valor 0 y la conjunción tanto de la variable como de su complemento para las que tienen valor u .

³Mukaidono [6] llama *ambigüedad* a la relación \preceq_a .

⁴En el conjunto F dos fórmulas son equivalentes si, y solo si, representan la misma función. Esto define una relación de equivalencia sobre F . Una *forma normal* (o *canónica*) es un representante de cada clase de equivalencia [13], [15]–[17].





3. Formar la *disyunción* de las *conjunciones* obtenidas en los dos pasos anteriores. En caso de no existir conjunciones se obtendrá una disyunción vacía que representa la forma normal disyuntiva para 0.

La *forma normal disyuntiva kleeneana* de f , denotada $\text{FNDK}(f)$, se obtiene al descartar conjunciones que tienen los mismos (o posiblemente más) literales que otras conjunciones.

Observación 3. La *forma normal disyuntiva booleana* de f , denotada $\text{FNDB}(f)$, se obtiene siguiendo los pasos 1 y 3 del Método 1, teniendo en cuenta el valor de f solo en la filas de la tabla de verdad donde aparecen unos y ceros exclusivamente.

Observación 4. Las correspondientes formas normales conjuntivas (kleeneana y booleana), denotadas $\text{FNCK}(f)$ y $\text{FNCB}(f)$ respectivamente, se obtienen del Método 1 intercambiando las palabras *conjunción* por *disyunción*, *disyunción* por *conjunción*, *ceros* por *unos*, y *unos* por *ceros*.

Una forma de obtener fórmulas en \mathcal{I} es por medio de \mathcal{K} (debido a la igualdad de sus lógicas proposicionales [13]). Dado que \mathcal{B} es una restricción de \mathcal{K} , una manera de lograr lo anterior es partir de una FLB f , luego extender f a una FLTR g , y posteriormente encontrar una fórmula para g . La fórmula encontrada para g en \mathcal{K} es la misma que en \mathcal{I} , sin embargo, esta fórmula en \mathcal{I} es una FLM. En [5] se propuso el Método 2 para extender una FLB a una (o más) FLTR. De acuerdo a [5, Teorema 3.1], dada f una FLB el Método 2 garantiza que siempre es posible encontrar a lo menos una FLTR g que es extensión de f , pero no necesariamente única.

Definición 8. Sea $\beta : K^n \rightarrow N : \mathbf{a} \rightarrow \beta(\mathbf{a})$, donde $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$, definida⁵ como el número total de u en $\mathbf{a} \in K^n$.

Método 2 (Extensión [5]). 1. Dada una FLB $f : B^n \rightarrow B$ de n variables x_1, \dots, x_n construir una tabla de verdad de 2^n filas y $n+1$ columnas (n columnas para x_1, \dots, x_n y 1 columna para f). Estas filas tendrán las 2^n combinaciones de valores para x_1, \dots, x_n y los correspondientes valores para f (los cuales son representados como $f_i \in B, i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$) como se muestra en la Tabla II(a).

2. A la tabla elaborada en el numeral 1, agregar $3^n - 2^n$ nuevas filas. Primero aquellas $\binom{n}{1}2^{n-1}$ filas cuya combinación de valores de las variables tienen solamente una u (nivel de ambigüedad $\beta = 1$), enseguida aquellas $\binom{n}{2}2^{n-2}$ filas cuya combinación de valores de las variables tienen dos u (nivel de ambigüedad $\beta = 2$), y así sucesivamente. Al final, la tabla finaliza con aquella $\binom{n}{n}2^{n-n} = 1$ fila que tiene n valores u en la combinación de valores de sus variables (nivel de ambigüedad $\beta = n$), como se muestra en Tabla II(b). Cada grupo de filas agregado previamente es separado por una línea horizontal que representa la separación entre diferentes niveles de ambigüedad β . El nivel de ambigüedad es creciente.

3. Hacer $g_i = f_i$ para $i = 0, 1, 2, \dots, 2^n - 1$.

4. Para cada grupo con nivel de ambigüedad $\beta = 1, 2, \dots, n$ hacer lo siguiente:

- (a) Para la j -ésima fila considerada dentro del grupo con nivel de ambigüedad β , con $j = 1, 2, \dots, \binom{n}{\beta}2^{n-\beta}$, encontrar aquellas 2^β filas en el grupo inmediatamente previo con

⁵El valor $\beta(\mathbf{a}) \in N$ se conoce como el *nivel de ambigüedad de a* [5, Definición 2.6]. Por ejemplo, si $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in K^4$ tal que $\mathbf{a} = (0, u, u, 1)$ y $\mathbf{b} = (0, 1, 0, 1)$, entonces $\beta(\mathbf{a}) = 2$ y $\beta(\mathbf{b}) = 0$, es decir, \mathbf{a} tiene dos u y \mathbf{b} tiene cero u .

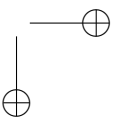
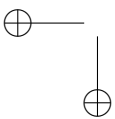


Tabla II. (a) FLB inicial $f : B^n \rightarrow B$ dada como una tabla de verdad. (b) FsLTR $g : K^n \rightarrow K$ (extensiones de f) dadas como tabla de verdad.

(a)					(b)								
	x_1	x_2	\dots	x_n	f	β	x_1	x_2	\dots	x_n	g		
2^n filas	0	0	\dots	0	f_0	2^n filas	0	0	\dots	0	$g_0 = f_0$		
	0	0	\dots	1	f_1		0	0	\dots	1	$g_1 = f_1$		
	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots		\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots		
	1	1	\dots	1	f_{2^n-1}		1	1	\dots	1	$g_{2^n-1} = f_{2^n-1}$		
$\binom{n}{1} 2^{n-1}$ filas		u	0	\dots	0	$\binom{n}{1} 2^{n-1}$ filas		u	0	\dots	0	g_{2^n}	
	1		u	0	\dots		1		u	0	\dots	1	g_{2^n+1}
			\vdots	\vdots	\ddots		\vdots		\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
			1	1	\dots		u		1	1	\dots	u	\vdots
$\binom{n}{2} 2^{n-2}$ filas		u	u	\dots	0	$\binom{n}{2} 2^{n-2}$ filas		u	u	\dots	0		
	2		u	u	\dots		1		u	u	\dots	1	
			\vdots	\vdots	\ddots		\vdots		\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
			1	1	\dots		u		1	1	\dots	u	\vdots
1 fila \dots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	1 fila \dots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots		
	n	u	u	\dots	u		n	u	u	\dots	u	g_{3^n-1}	

nivel de ambigüedad $\beta - 1$ cambiando uno por uno cada u por 0 y 1 sobre la j -ésima fila. Estas 2β filas son inmediatamente menos o igual de ambiguas que la j -ésima fila de acuerdo a la relación \preceq_a definida sobre K y extendida sobre K^n (Definición 6).

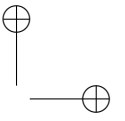
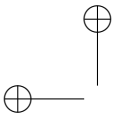
- (b) Para cada una de las 2β filas encontradas en el numeral 4a, encontrar el conjunto de valores más o igual de ambiguos al respectivo valor g de esa fila. Escribir este conjunto en una columna separada.
- (c) El conjunto de valores que g puede tomar sobre la j -ésima fila considerada es la intersección de aquellos conjuntos encontrados en el numeral 4b. Si g puede tomar más de un valor, crear tantas nuevas columnas para nuevas funciones g como sea posible. Para cada g creada, repetir el numeral 4.

Como se mencionó anteriormente, la forma de extender una FLB a una FLTR no es única. Si f es una FLB y $E_f = \{f_i\}_{i=1,2,\dots,L}$ es el conjunto de todas las FLTR que son extensión de f , entonces E_f ordenado en el sentido de la Definición 9 forma una estructura de retículo [1] con mínimo y máximo. El conjunto E_f es finito dado que $L \leq 3^{3^n}$, donde n es el número de variables de f .

Definición 9. Sea f una FLB y sean g y h dos FLTR que son extensión de f . Se dirá que g es menor o igual que h , denotado $g \preceq h$, si y solo si, $g(x) \leq h(x)$ para todo x en el dominio de g y h .

Definición 10 (Funciones extremas). Sean f una FLB y $E_f = \{f_i\}_{i=1,2,\dots,L}$ el conjunto de todas las FLTR que son extensiones de f . Se denotará por f_M a la extensión máxima en E_f tal que $f_i \preceq f_M$ para toda $i = 1, 2, \dots, L$ y similarmente por f_m a la extensión mínima en E_f tal que $f_m \preceq f_i$ para $i = 1, 2, \dots, L$.

Por definición $f_M = \bigvee_{i=1}^L f_i$ y $f_m = \bigwedge_{i=1}^L f_i$. Si L es grande (y también desconocido a priori) las anteriores expresiones pueden ser poco útiles para su cálculo. La siguiente proposición, demostrada en [1], da expresiones simples para f_M y f_m que no requieren del conocimiento previo de la totalidad de extensiones.



Proposición 1. [1] Sea f una FLB. La forma normal conjuntiva booleana de f es igual a f_M y la forma normal disyuntiva booleana de f es igual a f_m .

Las fórmulas correspondientes para f_M y f_m sobre lógica difusa son FLM. Estas dos FLM pueden ser operadas a través de combinación convexa (Definición 11) para obtener otras FLM, en particular, todas las extensiones en E_f vía la Proposición 2. La siguiente es una definición general dada por Zadeh [8].

Definición 11 (Combinación convexa). [8] Sean $f : X \rightarrow I$, $g : X \rightarrow I$ y $\lambda : X \rightarrow I$ funciones definidas sobre un conjunto X no vacío. La combinación convexa de f y g con coeficiente λ , denotada por $\langle f, g; \lambda \rangle$, es una función $\langle f, g; \lambda \rangle : X \rightarrow I$ dada por

$$\langle f, g; \lambda \rangle (x) = \lambda(x)f(x) + (1 - \lambda(x))g(x), \quad x \in X.$$

Proposición 2. [18], [19] Sean $f : X \rightarrow I$, $g : X \rightarrow I$ y $h : X \rightarrow I$ funciones definidas sobre X . Entonces $f \wedge g \preceq h \preceq f \vee g$ si, y solo si, existe $\lambda : X \rightarrow I$ tal que $h = \langle f, g; \lambda \rangle$.

La Proposición 2 aplicada a f_M y f_m , las extensiones máxima y mínima del conjunto $E_f = \{f_i\}_{i=1,2,\dots,L}$, tomando $X = I^n$ lleva a $f_m \wedge f_M = f_m \preceq f_i \preceq f_M = f_m \vee f_M$ si, y solo si, existe $\lambda_i : X \rightarrow I$ tal que $f_i = \langle f_m, f_M; \lambda_i \rangle$, $i = 1, 2, \dots, L$. Entonces todas las extensiones regulares de una FLB pueden ser obtenidas vía combinación convexa. Además, con otras elecciones de λ también se pueden obtener otras FLM entre f_m y f_M que no están en E_f .

3. Sistema de inferencia difusa basado en relaciones booleanas y kleeneanas (FIS-BKR)

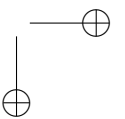
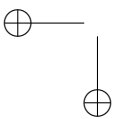
El sistema de inferencia difusa basado en relaciones⁶ booleanas y kleeneanas (Fuzzy Inference System based on Boolean and Kleenean Relations (FIS-BKR)) fue propuesto por primera vez en el año 2001 por Soriano *et. al.* [3]. La propuesta original ha sido ampliada considerablemente tras casi 16 años de investigación continua y varios nombres han aparecido con el tiempo. La Figura 1 muestra el diagrama de bloques actual. A continuación se presenta el método de diseño propuesto en [7].

Fusificador El fusificador usado es *unitario* (o *singleton* en inglés). Para un \mathbf{x}^* dado, el conjunto difuso unitario A (singleton) a la salida del fusificador está definido por la función de pertenencia:

$$\mu_A(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} = \mathbf{x}^*, \\ 0, & \mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*, \end{cases}$$

donde $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \in X$ es el vector de variables de entrada, $\mathbf{x}^* = (x_1^*, \dots, x_n^*) \in X$ es un valor particular tomado en la entrada del fusificador y $X = X_1 \times \dots \times X_n \subseteq \mathbb{R}^n$ es el universo de entrada.

⁶La palabra *relación* usada originalmente por Soriano *et. al.* [3] (y conservada hasta la actualidad) siempre ha sido usada como sinónimo de la palabra *fórmula*. Nunca ha tomado el significado clásico de las matemáticas como un subconjunto del producto cartesiano de conjuntos. Por razones históricas se ha conservado esta palabra queriendo decir que se trata de un modelo *basado en fórmulas*.



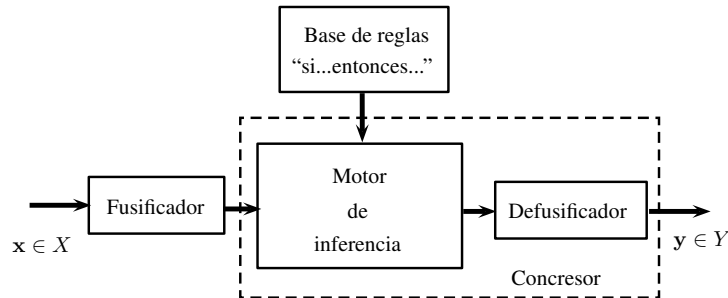
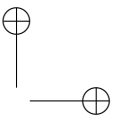
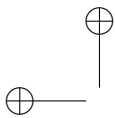


Figura 1. Sistema de inferencia difusa basado en relaciones booleanas y kleeneanas (FIS-BKR). Tomado de [7]

Base de reglas Para la j -ésima salida y_j ($j = 1, 2, \dots, m$) del vector de salidas $\mathbf{y} \in Y$, donde $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)$ y $Y = Y_1 \times \dots \times Y_m \subseteq \mathbb{R}^m$, una regla típica de la base de reglas luce como:

Si x_1 (no) es A_1 y/o \dots y/o x_n (no) es A_n entonces y_j (no) es B ,

donde A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) es uno de los posibles conjuntos difusos formulados sobre el i -ésimo universo de entrada X_i y B es uno de los posibles conjuntos difusos formulados sobre el j -ésimo universo de salida Y_j .

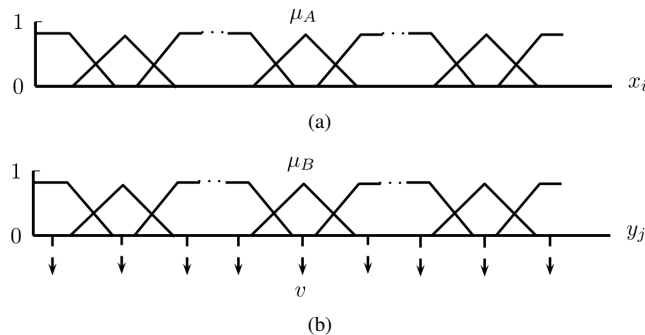
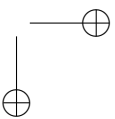
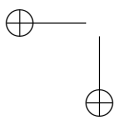
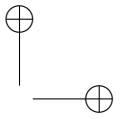
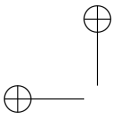


Figura 2. (a) Ejemplo de formulación de conjuntos difusos en el i -ésimo universo de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Se muestra la función de pertenencia de uno de los conjuntos difusos A . (b) Ejemplo de formulación de conjuntos difusos en el j -ésimo universo de salida Y_j ($j = 1, 2, \dots, m$). Se muestra la función de pertenencia de uno de los conjuntos difusos B con su valor característico $v \in Y_j$ llamado *actuador virtual*.

Las operaciones lógicas “y”, “o” y “no” son las dadas por la lógica difusa estándar⁷ y/o lógica booleana. La formulación de los conjuntos difusos sobre cada universo de entrada y salida

⁷Es conocido que cualquier operación lógica difusa (tipo-1) siempre se reduce a la correspondiente de la lógica booleana cuando el conjunto de valores de verdad I es cambiado por B . Además, por simplicidad en la explicación, en este artículo se usa la operación de complemento estándar $a' = 1 - a$, $a \in I$, en la lógica difusa. Sin embargo, esta operación puede ser cambiada por cualquiera que sea monótona decreciente e involutiva sin alterar significativamente lo que se dice en este documento. Ver [7] para más detalles.





puede seguir algún criterio (Figura 2(a) y Figura 2(b)), por ejemplo, puede obedecer a la definición de *partición difusa* [17, def. 7.4.1]. Además, cada conjunto difuso B formulado sobre el j -ésimo universo de salida $Y_j \subseteq \mathbb{R}$ debe tener un único valor característico $v \in Y_j$ llamado *actuador virtual*.

Motor de inferencia El diseño del motor de inferencia se realiza en dos etapas:

1. En la primera se hace una aproximación a través de lógica booleana,
2. y en la segunda se hace una extensión a la lógica difusa estándar a través de lógica trivalente.

A continuación se explican los pasos a seguir en cada etapa.

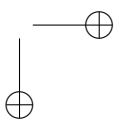
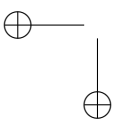
Etapa 1: Aproximación a través de lógica booleana

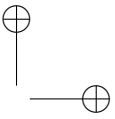
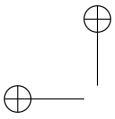
1. **Aproximación de conjuntos difusos mediante conjuntos bivalentes** Todos los conjuntos de los antecedentes de las reglas son aproximados mediante conjuntos bivalentes, esto es, si A es uno de los posibles conjuntos difusos formulados sobre el i -ésimo universo de entrada $X_i \subseteq \mathbb{R}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), entonces este conjunto es aproximado mediante un conjunto bivalente \hat{A} con función de pertenencia bivalente (es decir, $\mu_{\hat{A}} \in \{0, 1\}$).
2. **Codificación bivalente de las regiones aproximadas de operación** Cada conjunto bivalente \hat{A} formulado en el paso anterior realiza una partición del universo de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) en la siguiente forma:
 - (a) **Codificación con 0:** para aquellos $x_i \in X_i$ tales que $\mu_{\hat{A}}(x_i) = 0$ y
 - (b) **Codificación con 1:** para aquellos $x_i \in X_i$ tales que $\mu_{\hat{A}}(x_i) = 1$.

En este paso es posible realizar una codificación bivalente de todas las posibles regiones aproximadas de operación⁸ mediante una tabla de verdad de lógica bivalente (ceros y unos), basados en la partición descrita anteriormente. Cada codificación corresponderá a una fila de la tabla. Si después de codificar todas las posibles regiones aproximadas de operación aún existen códigos por asignar, estos códigos son tratados como condiciones *no importa*.

3. **Asignación de las acciones del sistema en las regiones aproximadas de operación** Sobre la tabla de verdad del paso anterior, crear una función booleana \hat{f} por cada actuador virtual $v \in Y_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$) perteneciente a cada conjunto difuso B formulado sobre el j -ésimo universo de salida $Y_j \subseteq \mathbb{R}$. El valor de $\hat{f} \in \{0, 1\}$ en la respectiva codificación (fila de la tabla) dependerá de la acción que tomará el sistema en la respectiva región aproximada de operación. Cada función \hat{f} es llamada *salida de activación* (del respectivo actuador virtual v) y corresponderá con una columna de la tabla. Sobre las filas de la tabla consideradas como condiciones *no importa* el valor de \hat{f} es arbitrario y puede ser elegido con algún criterio dado por el diseñador.

⁸Una región de operación es un subconjunto del universo de entrada $X = X_1 \times \dots \times X_n \subseteq \mathbb{R}^n$.





4. **Obtención de fórmulas** Para cada función booleana \hat{f} creada en el paso anterior obtener su forma normal (disyuntiva o conjuntiva) booleana, donde las variables de dicha fórmula son las funciones de pertenencia de cada conjunto bivalente.
5. **Simplificación (optimización) de fórmulas** Para cada fórmula obtenida en el paso anterior aplicar la versión de lógica booleana del método de simplificación⁹ (optimización) de fórmulas propuesto en [20].

Etapa 2: Extensión a la lógica difusa mediante lógica trivalente de Kleene

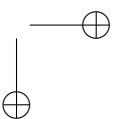
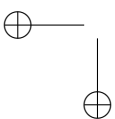
1. **Retrosustitución de conjuntos difusos** Todos los conjuntos bivalentes \hat{A} usados como aproximación en la primera etapa son nuevamente sustituidos por los originales conjuntos difusos A . Las funciones de pertenencia de estos últimos son multivalentes (es decir, $\mu_A \in [0, 1]$).
2. **Codificación trivalente de las regiones de operación** Dado un $\varepsilon \in [0, 1]$ definido por el diseñador, tal que $0 < \varepsilon \leq \xi$, donde ξ es el punto fijo¹⁰ de la operación lógica “no” (o complemento (')), cada conjunto difuso A formulado en el paso anterior realiza una partición del universo de entrada X_i en la siguiente forma:
 - (a) **Codificación con 0:** para aquellos $x_i \in X_i$ tales que $\mu_A(x_i) \in [0, \varepsilon)$,
 - (b) **Codificación con u :** para aquellos $x_i \in X_i$ tales que $\mu_A(x_i) \in [\varepsilon, \varepsilon']$ y
 - (c) **Codificación con 1:** para aquellos $x_i \in X_i$ tales que $\mu_A(x_i) \in (\varepsilon', 1]$.

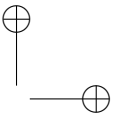
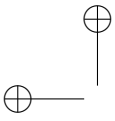
En este paso es posible realizar una codificación trivalente de todas las posibles regiones de operación mediante una tabla de verdad de lógica trivalente (0, u y 1), basados en la partición descrita anteriormente. Cada codificación corresponderá con una fila de la tabla. Esta codificación trivalente debe preservar en su totalidad la codificación bivalente obtenida en la primera etapa. De esta forma la tabla de verdad de lógica trivalente es una extensión de la correspondiente de lógica bivalente.

3. **Extensión a la lógica difusa (por medio de la lógica trivalente de Kleene)** Usar el método de extensión (Método 2) para extender cada función booleana \hat{f} (salidas de activación) obtenida en la primera etapa a una (o varias) funciones kleeneanas regulares f .
4. **Selección de las extensiones regulares adecuadas** Por cada función booleana \hat{f} obtenida en la primera etapa, seleccionar una función kleeneana regular f (de las varias existentes) encontradas en el paso anterior. Esta selección puede hacerse con algún criterio que depende de la aplicación.
5. **Obtención de fórmulas lógicas difusas** Para cada función kleeneana regular f seleccionada en el paso anterior obtener su forma normal (disyuntiva o conjuntiva) kleeneana.

⁹El método de simplificación de fórmulas propuesto en [20] no se explica en este documento debido a consideraciones de espacio.

¹⁰El *punto fijo* del complemento (') es un valor $\xi \in [0, 1]$ tal que $\xi' = \xi$. Este valor existe y es único para todo complemento monótono decreciente e involutivo. Por ejemplo, para el complemento $a' = 1 - a$ de la lógica difusa estándar usada en este documento se tiene $\xi = 1/2$.





6. **Simplificación (optimización) de fórmulas lógicas difusas** Para cada fórmula obtenida en el paso anterior aplicar la versión de lógica trivalente de Kleene del método de simplificación (optimización) de fórmulas propuesto en [20].

Defusificador El vector de salidas $\mathbf{y} \in Y$, donde $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)$ y $Y = Y_1 \times \dots \times Y_m \subseteq \mathbb{R}^m$, se calcula por medio de un defusificador basado en fórmulas lógicas (booleanas y/o kleeneanas). Estas fórmulas ponderan el valor del respectivo actuador.

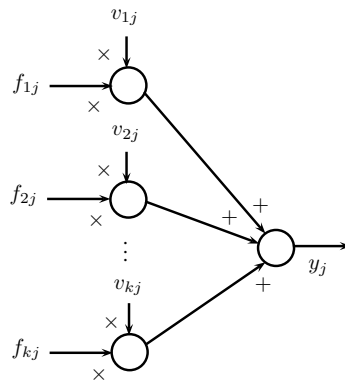


Figura 3. Diagrama de bloques del defusificador para la j -ésima salida y_j ($j = 1, 2, \dots, m$), basado en las fórmulas lógicas (booleanas y/o kleeneanas) f_{ij} ($i = 1, 2, \dots, k$) y actuadores virtuales v_{ij}

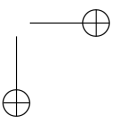
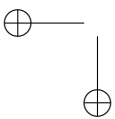
La j -ésima salida y_j ($j = 1, 2, \dots, m$), correspondiente al j -ésimo universo de salida Y_j donde se tienen k actuadores virtuales v_{ij} ($i = 1, 2, \dots, k$) que están siendo ponderados por k formulas lógicas f_{ij} dadas por el motor de inferencia, está dada por (Figura 3):

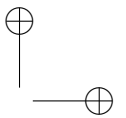
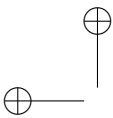
$$y_j = f_{1j}v_{1j} + f_{2j}v_{2j} + \dots + f_{kj}v_{kj} = \sum_{i=1}^k f_{ij}v_{ij}.$$

De acuerdo a Espitia y Soriano [9], [21], v_{ij} es llamado *actuador virtual*, f_{ij} es llamada *salida de activación* y el producto $f_{ij}v_{ij}$ es llamado *salida virtual*. Estos nombres corresponden al hecho que en lógica booleana $f_{ij} \in \{0, 1\}$ y en lógica difusa $f_{ij} \in [0, 1]$, por lo tanto f_{ij} (al ser adimensional y construido usando la respectiva lógica) actúa como un *activador/desactivador* del actuador v_{ij} . Además, v_{ij} al ser un elemento del respectivo universo de salida Y_j tiene las mismas dimensiones de este último, por lo que funciona como un *actuador*. El término *virtual* corresponde al hecho que v_{ij} (dependiendo de la aplicación) podría (o no) tener alguna correspondencia con algún elemento físico real donde el sistema difuso está actuando.

Concesor Históricamente se ha denominado *Concesor* a la unión entre el *Motor de Inferencia* y el *Defusificador* (Figura 1). El *Concesor* es aquel bloque que realiza la *concreción*¹¹ de la información difusa.

¹¹(Del lat. *concretio*, *-ōnis*). Acción y efecto de concretar [22].





4. FIS-BKR con combinador convexo

En algunas aplicaciones la selección de las extensiones regulares en el paso 4 de la segunda etapa del diseño del motor de inferencia puede ser una tarea difícil, principalmente por su gran número. La propuesta dada en [1] está en la adición de un bloque llamado *Combinador Convexo*¹² justo antes del defusificador y después del motor de inferencia. Esto permite integrar todas las extensiones regulares kleeneanas. En la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques del combinador convexo.

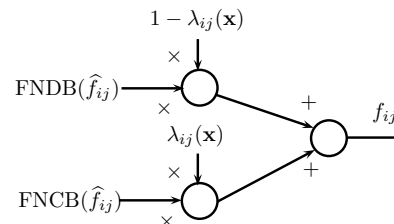


Figura 4. Diagrama de bloques del combinador convexo con coeficiente $\lambda_{ij}(\mathbf{x}) \in [0, 1]$ para la i -ésima función booleana \hat{f}_{ij} ($i = 1, 2, \dots, k$) formulada sobre el j -ésimo universo de salida ($j = 1, 2, \dots, m$). FNCB(\hat{f}_{ij}) y FNDB(\hat{f}_{ij}) corresponden a la forma normal conjuntiva y disyuntiva booleanas de \hat{f}_{ij} , respectivamente.

El proceso de diseño del FIS-BKR con combinador convexo es el mismo al presentado en la Sección 3 con las siguientes modificaciones en el diseño del motor de inferencia:

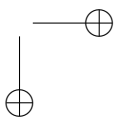
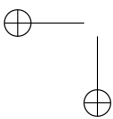
Etapla 1: Aproximación a través de lógica booleana

1. **Aproximación de conjuntos difusos mediante conjuntos bivalentes.** Igual al paso 1, etapa 1, Sección 3.
2. **Codificación bivalente de las regiones aproximadas de operación** Igual al paso 2, etapa 1, Sección 3.
3. **Asignación de las acciones del sistema en las regiones aproximadas de operación** Igual al paso 3, etapa 1, Sección 3.
4. **Obtención de fórmulas** Para cada función booleana \hat{f} creada en el paso anterior obtener su forma normal disyuntiva y conjuntiva booleana, donde las variables de dicha fórmula son las funciones de pertenencia de cada conjunto bivalente. La forma normal disyuntiva booleana de \hat{f} corresponde a \hat{f}_m (extensión regular mínima) y la forma normal conjuntiva booleana de \hat{f} corresponde a \hat{f}_M (extensión regular máxima).
5. **Simplificación (optimización) de fórmulas** Este paso no se realiza.

Etapla 2: Extensión a la lógica difusa mediante lógica trivalente de Kleene

1. **Retrosustitución de conjuntos difusos** Igual al paso 1, etapa 2, Sección 3.

¹²El uso de combinadores convexos para combinar dos o más respuestas es una idea con antecedentes. Por ejemplo, en [23] se usa sobre filtros adaptativos.



2. **Codificación trivalente de las regiones de operación** Este paso no se realiza.
3. **Extensión a la lógica difusa (por medio de la lógica trivalente de Kleene)** Este paso no se realiza.
4. **Selección de las extensiones regulares adecuadas** Este paso no se realiza.
5. **Obtención de fórmulas lógicas difusas** Este paso no se realiza.
6. **Simplificación (optimización) de fórmulas lógicas difusas** Este paso no se realiza.
7. **Obtención de combinaciones convexas** Para cada extensión mínima \hat{f}_m y máxima \hat{f}_M encontrada en la etapa 1 obtener su combinación convexa difusa con coeficiente λ definido por el diseñador. El coeficiente λ puede ser seleccionado con algún criterio dependiendo de la aplicación.

5. Aplicación

La siguiente aplicación muestra el uso del método de diseño de controladores FIS-BKR con combinador convexo difuso. Esta aplicación fue presentada por Espitia [9] y Salazar [20], y previamente por Lara [12], Hernández [11] y Tunyasirirut [10] donde se propusieron otras soluciones de control empleando lógica difusa.

5.1. Modelo dinámico

Se desea mantener el nivel $h(t)$, siendo t la variable tiempo, de cierta cantidad de líquido en un tanque cilíndrico en posición horizontal donde el flujo de salida $\phi_s(t)$ varía a través de la válvula V_S . Existen dos válvulas de flujo de entrada. La primera (V_G) deja entrar un flujo grande $\phi_g(t)$ de líquido mientras que la segunda (V_P) deja entrar un flujo pequeño $\phi_p(t)$. El flujo total de entrada está dado por $\phi_e(t) = \phi_g(t) + \phi_p(t)$ como se muestra en la Figura 5(a). Las variables y constantes del sistema con sus unidades se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Variables y constantes del sistema de llenado de un tanque cilíndrico en posición horizontal

Símbolo	Significado	Valor	Unidad
H	Altura del tanque	0.4	m
$R = H/2$	Radio del tanque	0.2	m
h	Altura del nivel del líquido		m
H_{ref}	Altura de referencia	0.3	m
L	Longitud del tanque	0.6	m
ρ	Densidad del líquido		kg/m ³
v	Volumen del líquido dentro del tanque		m ³
$m = \rho v$	Masa del líquido		kg
$\phi_e = \phi_g + \phi_p$	Flujo total de entrada		m ³ /s
ϕ_g	Flujo de entrada por la válvula V_G		m ³ /s
ϕ_p	Flujo de entrada por la válvula V_P		m ³ /s
$\phi_s = C_{V_S} \sqrt{h}$	Flujo de salida por la válvula V_S		m ³ /s
C_{V_S}	Constante de la válvula V_S	1.6×10^{-4}	m ^{5/2} /s
v_p	Actuador virtual asociado a la válvula V_P	0.5×10^{-4}	m ³ /s
v_g	Actuador virtual asociado a la válvula V_G	1.5×10^{-4}	m ³ /s

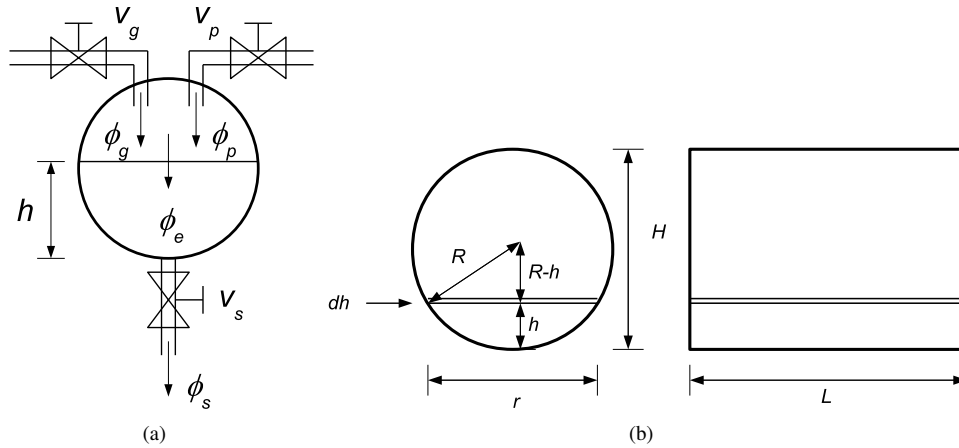


Figura 5. (a) Sistema de llenado de un tanque cilíndrico en posición horizontal. (b) Geometría del tanque cilíndrico en posición horizontal

La Figura 5(b) muestra la geometría del tanque donde $(r/2)^2 + (R - h)^2 = R^2$, por lo tanto al despejar r se tiene $r = 2\sqrt{2Rh - h^2}$. El diferencial de volumen del líquido en el tanque está dado por $dv = Lrdh = 2L\sqrt{Hh - h^2}dh$, siendo $H = 2R$. Para esta aplicación se supone que la densidad del líquido del tanque (ρ) es constante y la misma que la del líquido entrante y saliente. La ecuación de conservación de la masa para este sistema es: $dm/dt = dm_e/dt - dm_s/dt$ donde m es la masa de líquido del tanque, m_e es la masa entrante y m_s la masa saliente. Esta ecuación se puede simplificar a $dv/dt = \phi_e - \phi_s$ donde $\phi_e = dv_e/dt$ y $\phi_s = dv_s/dt$ son los flujos de entrada y salida, v_e y v_s son los volúmenes de líquido entrante y saliente, y usando las ecuaciones $m = \rho v$, $m_e = \rho v_e$ y $m_s = \rho v_s$. Sustituyendo el diferencial de volumen dv encontrado antes y despejando para dh/dt se obtiene: $dh/dt = (\phi_e - \phi_s)/(2L\sqrt{Hh - h^2})$. Dado que la válvula de salida se encuentra en la parte inferior del tanque y actúa por acción de la gravedad, el flujo de salida está dado por $\phi_s = C_{V_s}\sqrt{h}$, donde C_{V_s} es la constante de la válvula V_s . Se obtiene entonces la siguiente ecuación que modela el sistema:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\phi_e - C_{V_s}\sqrt{h}}{2L\sqrt{Hh - h^2}}, \quad 0 \leq h \leq H.$$

La Figura 6(a) presenta un diagrama de bloques de la anterior ecuación diferencial.

5.2. Diseño de un controlador FIS-BKR con combinador convexo

La Figura 6(b) muestra el diagrama de bloques de la estrategia de control elegida. Esta consiste en un esquema de retroalimentación de la variable nivel h , comparada contra una altura de referencia H_{ref} , para obtener el error $e = H_{ref} - h$, que junto a su derivada, serán las entradas del controlador FIS-BKR con combinador convexo tipo proporcional-derivativo (PD). La salida del controlador es el flujo de entrada al tanque ϕ_e .

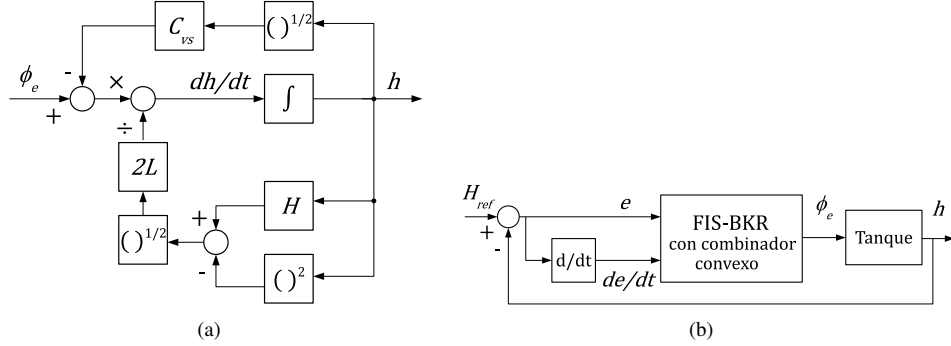


Figura 6. (a) Diagrama de bloques del sistema de llenado del tanque cilíndrico en posición horizontal. (b) Control usando FIS-BKR con combinator convexo.

Aproximación a través de lógica booleana Para el error de nivel e se definen dos conceptos: *error positivo* (E_P) y *error negativo* (E_N) con las siguientes funciones de pertenencia (Figura 7):

$$\mu_{E_P}(e) = \begin{cases} 1, & e \geq 0.02 \text{ m,} \\ 0, & \text{otro caso,} \end{cases} \quad \mu_{E_N}(e) = \begin{cases} 1, & e \leq -0.02 \text{ m,} \\ 0, & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (1)$$

Para la variable de/dt se define un solo concepto: *derivada positiva* (D_P) con la siguiente función de pertenencia:

$$\mu_{D_P}(de/dt) = \begin{cases} 1, & de/dt \geq 0 \text{ m/s,} \\ 0, & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (2)$$

Para la variable de flujo de entrada ϕ_e se definen cuatro conceptos: *flujo grande* (F_G), *flujo mediano* (F_M), *flujo pequeño* (F_P) y *flujo nulo* (F_N) con las siguientes funciones de pertenencia:

$$\mu_{F_G}(\phi_e) = \begin{cases} 1, & \phi_e = v_p + v_g = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s,} \\ 0, & \text{otro caso,} \end{cases} \quad \mu_{F_M}(\phi_e) = \begin{cases} 1, & \phi_e = v_g = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s,} \\ 0, & \text{otro caso,} \end{cases}$$

$$\mu_{F_P}(\phi_e) = \begin{cases} 1, & \phi_e = v_p = 0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s,} \\ 0, & \text{otro caso,} \end{cases} \quad \mu_{F_N}(\phi_e) = \begin{cases} 1, & \phi_e = 0 \text{ m}^3/\text{s,} \\ 0, & \text{otro caso.} \end{cases}$$

La Tabla IV muestra las acciones de control, similares a las presentadas en [9], con funciones de activación \hat{f} y \hat{F} para las válvulas V_G y V_P para así obtener los valores de flujo grande, mediano, pequeño y nulo con la activación y desactivación de V_G y V_P .

Tabla IV. Tabla de verdad para las funciones de activación \hat{f} y \hat{F} de V_P y V_G respectivamente

μ_{E_P}	μ_{E_N}	μ_{D_P}	\hat{f}	\hat{F}	Regla
1	0	1	1	1	Si e es E_P y e no es E_N y de/dt es D_P entonces ϕ_e es F_G
1	0	0	1	0	Si e es E_P y e no es E_N y de/dt no es D_P entonces ϕ_e es F_P
0	1	1	0	1	Si e no es E_P y e es E_N y de/dt es D_P entonces ϕ_e es F_M
0	1	0	0	1	Si e no es E_P y e es E_N y de/dt no es D_P entonces ϕ_e es F_M
0	0	1	0	0	Si e no es E_P y e no es E_N y de/dt es D_P entonces ϕ_e es F_N
0	0	0	0	0	Si e no es E_P y e no es E_N y de/dt no es D_P entonces ϕ_e es F_N

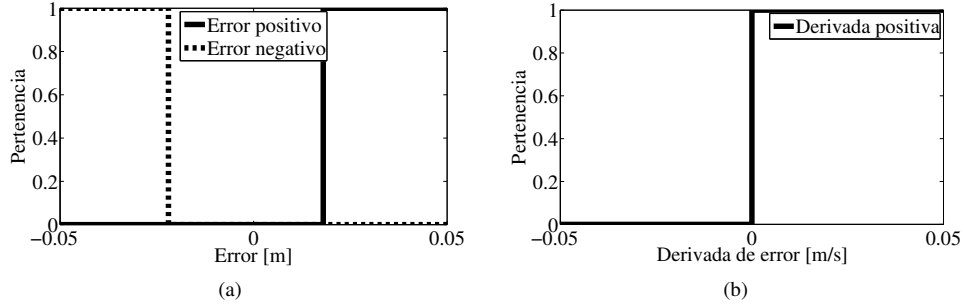


Figura 7. (a) Conjuntos asociados al error positivo y negativo. (b) Conjunto asociado a la derivada del error positiva

Extensión a la lógica difusa estándar y uso del combinador convexo El primer paso consiste en suavizar los conceptos booleanos cambiándolos por difusos. Los conjuntos difusos para los respectivos conceptos del antecedente son los siguientes:

$$\mu_{E_P}(e) = \begin{cases} 0, & e < 0 \text{ m}, \\ 25e, & 0 \text{ m} \leq e \leq 0.04 \text{ m}, \\ 1, & e > 0.04 \text{ m}, \end{cases} \quad \mu_{E_N}(e) = \begin{cases} 1, & e < -0.04 \text{ m}, \\ -25e, & -0.04 \text{ m} \leq e \leq 0 \text{ m}, \\ 0, & e > 0 \text{ m}, \end{cases}$$

$$\mu_{D_P}(de/dt) = \begin{cases} 0, & de/dt < -0.02 \text{ m/s}, \\ 25de/dt + 0.5, & -0.02 \text{ m/s} \leq de/dt \leq 0.02 \text{ m/s} \\ 1, & de/dt > 0.02 \text{ m/s}. \end{cases}$$

Las funciones de pertenencia para los conjuntos difusos del consecuente son los mismos que para el caso booleano.

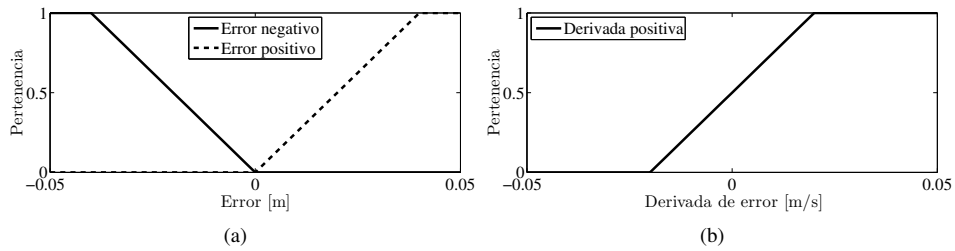


Figura 8. (a) Conjuntos difusos asociados al error positivo y negativo. (b) Conjunto difuso asociado a la derivada del error positiva

Las formas normales (disyuntiva y conjuntiva) booleanas para las funciones de activación \hat{f} y \hat{F} de la Tabla IV llevan a las extensiones kleeneanas extremas asociadas a \hat{f} y \hat{F} , las cuales son:

$$f_m = (\mu_{E_P} \wedge \mu'_{E_N} \wedge \mu_{D_P}) \vee (\mu_{E_P} \wedge \mu'_{E_N} \wedge \mu'_{D_P}),$$

$$f_M = (\mu_{E_P} \vee \mu'_{E_N} \vee \mu'_{D_P}) \wedge (\mu_{E_P} \vee \mu'_{E_N} \vee \mu_{D_P}) \wedge (\mu_{E_P} \vee \mu_{E_N} \vee \mu'_{D_P}) \wedge (\mu_{E_P} \vee \mu_{E_N} \vee \mu_{D_P}),$$

$$F_m = (\mu_{E_P} \wedge \mu'_{E_N} \wedge \mu_{D_P}) \vee (\mu'_{E_P} \wedge \mu_{E_N} \wedge \mu_{D_P}) \vee (\mu'_{E_P} \wedge \mu_{E_N} \wedge \mu'_{D_P}),$$

$$F_M = (\mu'_{E_P} \vee \mu_{E_N} \vee \mu_{D_P}) \wedge (\mu_{E_P} \vee \mu_{E_N} \vee \mu'_{D_P}) \wedge (\mu_{E_P} \vee \mu_{E_N} \vee \mu_{D_P}).$$

Estas fórmulas en lógica trivalente de Kleene pueden ser entendidas como fórmulas en lógica difusa estándar basados en la teoría expuesta en [13], [15]–[17].

Los coeficientes de la combinación convexa fueron tomados como conjuntos difusos con pertenencia constante. Esto significa que $\lambda_i(x) = \lambda_i \in [0, 1]$ para todo x , con $i = 1, 2$. Las expresiones para las funciones de activación f y F están dadas por:

$$f = \lambda_1 f_M + (1 - \lambda_1) f_m, \quad \lambda_1 \in [0, 1], \quad (3)$$

$$F = \lambda_2 F_M + (1 - \lambda_2) F_m, \quad \lambda_2 \in [0, 1]. \quad (4)$$

Para obtener la acción de control (flujo de entrada) ϕ_e se ponderan (3) y (4) con actuadores virtuales $v_p = 0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y $v_g = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ como sigue:

$$\phi_e = v_p \cdot f + v_g \cdot F. \quad (5)$$

Notar que las unidades de ϕ_e son las mismas que las unidades de los actuadores virtuales v_p y v_g dado que las funciones de activación f y F son adimensionales. La Figura 9 muestra las superficies de control extremas para el flujo de entrada.

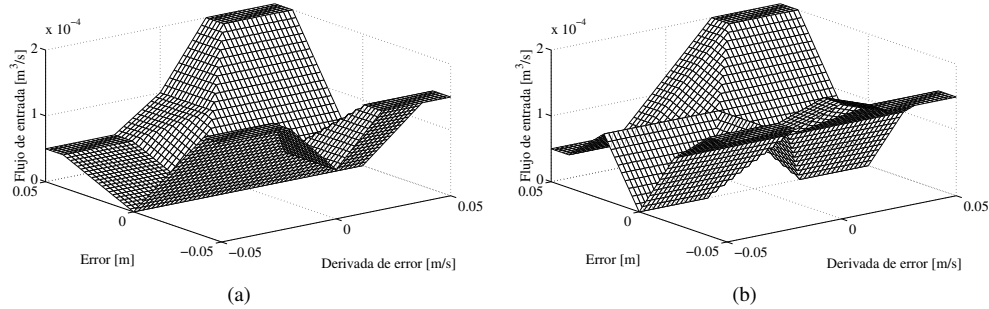


Figura 9. Superficies de control para el flujo de entrada ϕ_e cuando: (a) $\lambda_1 = 0$ y $\lambda_2 = 0$, (b) $\lambda_1 = 1$ y $\lambda_2 = 1$.

Cabe anotar que si las expresiones (3) y (4) son evaluadas para los conceptos de lógica booleana (1) y (2), las extensiones máxima y mínimas coinciden. Esto implica que $f = f_M = f_m$ y $F = F_M = F_m$, es decir, no hay sensibilidad a los parámetros de la combinación λ . En la Figura 10 se muestra el diagrama de bloques del controlador FIS-BKR diseñado.

5.3. Resultados

La implementación del sistema de control se realizó mediante la simulación del sistema dinámico en el entorno de programación visual Simulink de MATLAB¹³. Se usó un tiempo de simulación $T_s = 5000 \text{ s}$ y pasos de tiempo de $\Delta t = 5 \text{ s}$. Teniendo como flujo de entrada al tanque:

$$\phi_e = 0.5 \times 10^{-4} \cdot (\lambda_1 f_M + (1 - \lambda_1) f_m) + 1.5 \times 10^{-4} \cdot (\lambda_2 F_M + (1 - \lambda_2) F_m). \quad (6)$$

¹³Los archivos de simulación se pueden encontrar en el repositorio público [24].

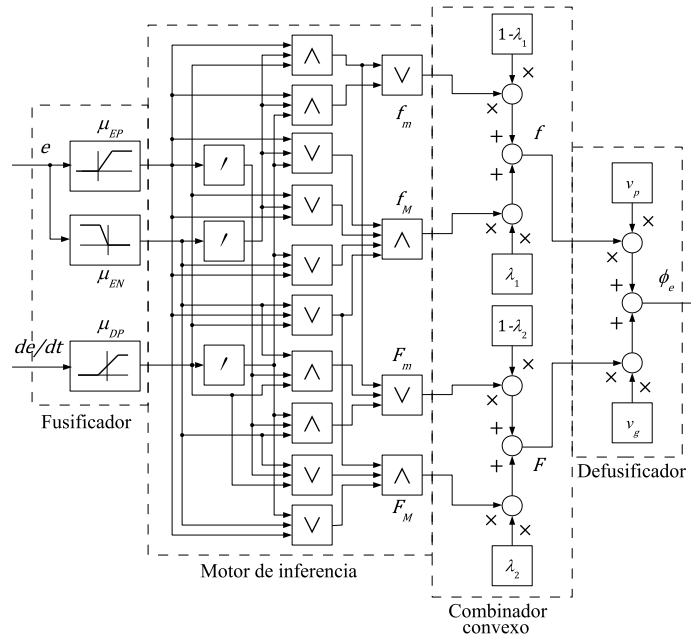


Figura 10. Diagrama de bloques del controlador FIS-BKR con combinador convexo diseñado

Al variar los parámetros λ_1 y λ_2 , el sistema controlado presenta distintas repuestas temporales. En la Figura 11 se presenta la respuesta del controlador booleano (sin suavización de los conceptos), al tiempo que se exhiben repuestas para algunos parámetros de combinación convexa. Se observa que los controladores presentan error en estado estacionario y diferentes tiempos de establecimiento. Llama la atención la repuesta del sistema para los parámetros $\lambda_1 = 0$ y $\lambda_2 = 0$ puesto que no hay establecimiento alguno del nivel. La razón de este comportamiento está asociada a la magnitud del flujo de entrada que en este caso es la acción de control mínima posible (ecuación (6)). Este comportamiento muestra clara evidencia de un hecho importante: no todo controlador FIS-BKR diseñado a partir de un controlador booleano que aproxima la referencia controla el sistema.

En la Figura 11 se observa que el control booleano presenta cierta variabilidad consecuencia de la discontinuidad de los conceptos, situación que no ocurre cuando estos son suavizados, como se propone en la metodología de diseño de controladores FIS-BKR.

Evaluación de índices de desempeño Es de nuestro interés evaluar para el sistema controlado los índices de desempeño ITSE e ISE. Para este caso se usó la definición discreta de tales índices donde se remplaza la integral por una sumatoria y los valores de error son muestreados. Estos índices están definidos por:

$$ISE = \sqrt{\int_0^{T_s} e^2(t)dt}, \quad ITSE = \sqrt{\int_0^{T_s} te^2(t)dt},$$

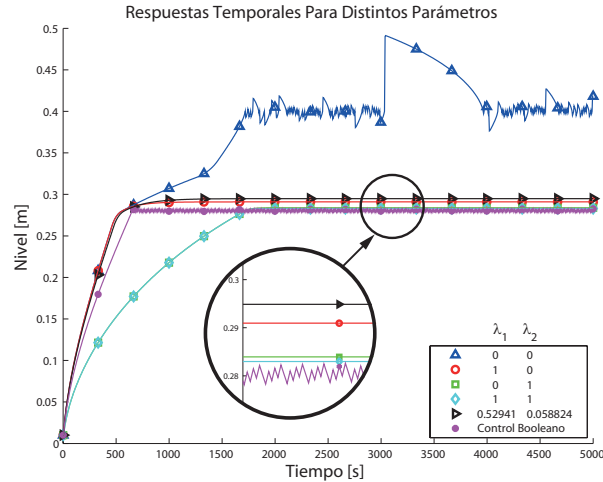


Figura 11. Respuesta temporal de la variable nivel para el sistema controlado para diferentes coeficientes de combinación convexa.

donde $\epsilon(t) = H_{ref} - h(t)$ es el error de nivel y T_s es el tiempo de simulación. Estos criterios de un solo número dan cuenta del cuadrado del error en el tiempo. El primero favorece sistemas con respuestas que se acercan a una referencia dada, mientras que el segundo, por tener en cuenta el tiempo usado para alcanzarla, es menor para sistemas que lo hacen rápidamente. La Figura 12 muestra cómo cambian los anteriores índices de desempeño con la variación de los parámetros λ_1 y λ_2 .

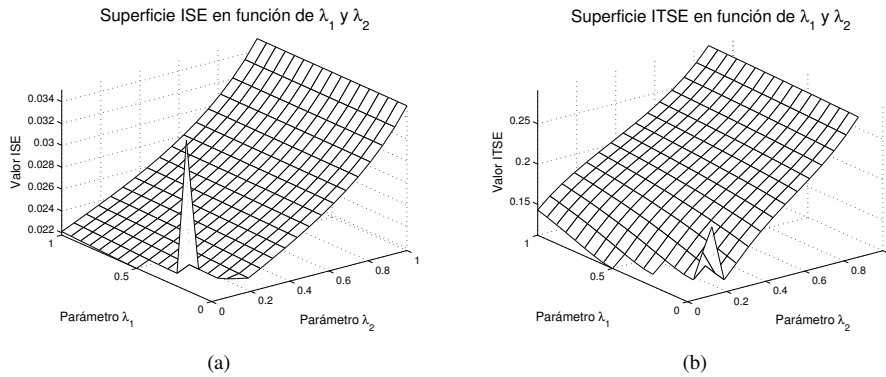


Figura 12. (a) Valores del índice ISE para diferentes valores de λ_1 y λ_2 . (b) Valores del índice ITSE para diferentes valores de λ_1 y λ_2 .

El proceso de optimización de los índices ISE e ITSE se realizó mediante la evaluación de una rejilla de 16×16 puntos en el dominio $[0, 1] \times [0, 1]$, el cual tomó un tiempo de 35 minutos y 30 segundos¹⁴. Se obtuvieron los parámetros óptimos $\lambda_1 = 0.52941$ y $\lambda_2 = 0.058824$ para ambos

¹⁴Proceso ejecutado en un equipo de computo con: procesador: AMD A8 2.90 GHz, memoria RAM: 4 GB, sistema

índices. La Tabla V resume los valores que optimizan los índices de estudio, además de presentar el desempeño del sistema de control booleano.

Tabla V. Índices ISE e ITSE para las extensiones extremas f_m, f_M, F_m, F_M y valores de los coeficientes λ_1 y λ_2 que minimizan ambos índices (negrilla).

λ_1	λ_2	ISE	ITSE
0	0	0.0496	1.1556
0	1	0.0350	0.1431
1	0	0.0221	0.3364
1	1	0.0351	0.3405
0.5294	0.0588	0.0224	0.1116
Booleano		0.0255	0.2389

En este caso el proceso de optimización llevó a una mejora de hasta el 1.427% para ISE y de hasta 21.99% para el ITSE con respecto al desempeño de las extensiones extremas. Sin embargo, cabe notar que no se puede concluir que este controlador óptimo sea mejor que cualquier extensión algebraica ya que esta aplicación se limitó exclusivamente a coeficientes con pertenencia constante. Por otro lado, la simple validación de si lo es o no resulta una tarea extensa como se verá a continuación.

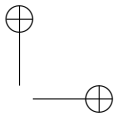
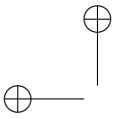
Conteo de extensiones Por último, con el fin de mostrar al lector lo complejo que puede ser buscar la mejor extensión algebraica dado un índice de desempeño por el método tradicional (Sección 3), en la Tabla VI se muestran las extensiones posibles de la función \hat{f} de la Tabla IV obtenidas al aplicar el Método 2.

Tabla VI. Posibilidades para extender regularmente la función booleana \hat{f} de la Tabla IV.

(a)					(b)					
Cantidad de u 's (nivel de ambigüedad)	μ_{EP}	μ_{EN}	μ_{DP}	\hat{f}	Cantidad de u 's (nivel de ambigüedad)	μ_{EP}	μ_{EN}	μ_{DP}	\hat{f}	
0	1	0	1	1	1	0	u	1	0, u	
	1	0	0	1		0	u	0	0, u	
	0	1	1	0		1	1	u	-	
	0	1	0	0		1	0	u	1, u	
	0	0	1	0		0	1	u	0, u	
	0	0	0	0		0	0	0	u	0, u
	1	1	1	-		u	u	1	u	
1	1	1	0	-	u	u	0	u		
	u	0	1	u	1	u	u	-		
	u	0	0	u	0	u	u	0, u		
	u	1	1	-	u	1	u	-		
	u	1	0	-	u	0	u	u		
	1	u	1	-	3	u	u	u	u	
1	u	0	-							

Donde “-” representa una condición de *no importa* y pueden valer 0, 1 o u , teniendo en cuenta las condiciones de regularidad. Para conocer la cantidad de extensiones es necesario realizar el producto de las posibilidades de cada fila, lo cual, sin tener en cuenta las condiciones de *no importa*, es de a lo menos $2^6 = 64$. Esta sería la cantidad de funciones kleeneanas regulares que se tendrían

operativo: Windows 10 de 64 bit, Versión MATLAB: 7.12.0 (R2011a).



que evaluar como mínimo para elegir la mejor, no sin antes encontrar sus fórmulas lógicas lo cual de por sí es una tarea ardua.

6. Conclusiones y comentarios finales

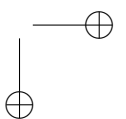
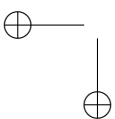
Este artículo presentó nueva evidencia de las características favorables de controladores FIS-BKR con combinador convexo difuso cuando se evaluaron los índices de desempeño ISE e ITSE. Basados en hechos teóricos se puede asegurar que la estrategia de control FIS-BKR con combinador convexo difuso y su metodología de diseño generalizan el FIS-BKR actual, permitiendo así trabajar con un modelo más completo, como lo demuestra una mejora en el desempeño de 1.427% para el ISE y 21.99% en el caso del ITSE, comparados con las alternativas extremas del FIS-BKR y un controlador basado en lógica booleana.

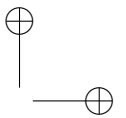
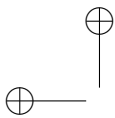
Por el carácter global que tienen las funciones extremas, se puede decir que la información obtenida de la etapa de diseño con lógica booleana está siendo incorporada sin sesgo alguno y sin mayor complejidad; ya que se obtiene a partir de las alternativas extremas, sin necesidad de pasar por métodos computacionalmente costosos de deducción de fórmulas que requieren otras extensiones, solucionando en cierto modo algunas de las desventajas mencionadas por Salazar en [7].

Tanto el estudio de la simplificación de fórmulas representadas mediante formas normales, como la caracterización de las familias de coeficientes-parámetro para el proceso de sintonización serían importantes aportes en la fundamentación del uso del combinador convexo, que por su novedad, ha sido poco estudiada. Así mismo, consideramos que el estudio de otras técnicas de optimización en dominios compactos para el proceso de sintonización, diferentes al de “fuerza bruta” que fue utilizada, es indispensable cuando la cantidad de parámetros sea considerablemente grande, ya que hacerlo con una técnica poco sofisticada podría resultar inviable.

Referencias

- [1] J. Soriano and J. Chacón, “Concesor based on kleenean relations using convex combinator,” in *The 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Vancouver, BC, Canada, Jul. 2016, pp. 133–139. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737679>. ↑ 8, 9, 13, 14, 19
- [2] G. Pangalos and G. Lichtenberg, “Approach to boolean controller design by algebraic relaxation for heating systems,” in *Proceedings of the 4th IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems (ADHS 12)*, vol. 45, no. 9, Eindhoven, The Netherlands, Jun. 2012, pp. 210–215. <https://doi.org/10.3182/20120606-3-NL-3011.00070>. ↑ 8
- [3] J. J. Soriano, O. L. González Melo, F. V. Munar Fontecha, and A. A. Ramos Acosta, “Propuesta de concesor basado en relaciones booleanas,” *Ingeniería*, vol. 6, no. 2, pp. 42–50, 2001, Bogotá, Colombia. ↑ 8, 14
- [4] E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *International journal of man-machine studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, 1975. [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2). ↑ 9
- [5] O. Salazar, J. Soriano, and H. Serrano, “From binary logic functions to fuzzy logic functions,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 7, no. 103, pp. 5129–5138, 2013, ISSN 1312-885X. ↑ 9, 12
- [6] M. Mukaidono, “Regular ternary logic functions—ternary logic functions suitable for treating ambiguity,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-35, no. 2, pp. 179–183, Feb. 1986. <https://doi.org/10.1109/TC.1986.1676738>. ↑ 9, 11

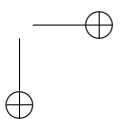
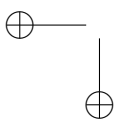


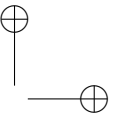
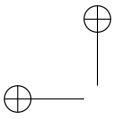


- [7] O. Salazar, “Método de diseño y optimización de controladores difusos FIS-BBR cuasi-estándar por medio de lógicas clásica y trivalente de Kleene,” Trabajo de grado en Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia, 2014. ↑ [9](#), [14](#), [15](#), [28](#)
- [8] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X). ↑ [9](#), [14](#)
- [9] H. E. Espitia, “Aplicación del congresor basado en relaciones booleanas para sistemas de lógica difusa tipo dos,” Trabajo de grado en Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia, Jul. 2009. ↑ [9](#), [18](#), [20](#), [22](#)
- [10] S. Tunyasrirot and S. Wangnipparnto, “Level control in horizontal tank by fuzzy-pid cascade controller,” *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 25, pp. 78–82, 2007. ↑ [9](#), [20](#)
- [11] J. Hernández S. and C. Cuadra A., “Estrategias comparativas de control difuso y control con arreglo inverso nyquist en sistemas multivariados lineales,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 9, pp. 53–58, 2001. ↑ [9](#), [20](#)
- [12] F. Lara-Rojó, E. N. Sánchez, and D. Zaldivar-Navarro, “Real-time fuzzy microcontroller for a didactic level system,” in *Electro 2001*, 2001, pp. 153–158. ↑ [9](#), [20](#)
- [13] M. Gehrke, C. Walker, and E. Walker, “Normal forms and truth tables for fuzzy logics,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 138, no. 1, pp. 25–51, Aug. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00566-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00566-3). ↑ [10](#), [11](#), [12](#), [24](#)
- [14] N. Takagi, K. Nakashima, H. Kikuchi, and M. Mukaidono, “A characterization of Kleenean functions,” in *Proceedings of the 25th International Symposium on Multiple-Valued Logic*, Bloomington, Indiana, May 1995, pp. 236–241. <https://doi.org/10.1109/ISMVL.1995.513537>. ↑ [10](#)
- [15] M. Gehrke, C. Walker, and E. Walker, “A mathematical setting for fuzzy logic,” *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 223–238, Jun. 1997. <https://doi.org/10.1142/S021848859700021X>. ↑ [11](#), [24](#)
- [16] —, “Some comments on fuzzy normal forms,” in *Proceedings of the ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 2, San Antonio, Texas, May 2000, pp. 593–598. ↑ [11](#), [24](#)
- [17] H. T. Nguyen and E. A. Walker, *A First Course in Fuzzy Logic*, 3rd ed. Boca Raton, Florida: Chapman & Hall/CRC, 2006. ↑ [11](#), [16](#), [24](#)
- [18] O. Salazar and J. Soriano, “Convex combination and its application to fuzzy sets and interval-valued fuzzy sets I,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 9, no. 22, pp. 1061–1068, 2015, ISSN 1312-885X. ↑ [14](#)
- [19] —, “Convex combination and its application to fuzzy sets and interval-valued fuzzy sets II,” *Applied Mathematical Sciences*, vol. 9, no. 22, pp. 1069–1076, 2015, ISSN 1312-885X. ↑ [14](#)
- [20] O. Salazar, “Método de simplificación de fórmulas booleanas, borrosas cuasi-estándar y borrosas cuasi-estándar de intervalo por medio de álgebras finitas,” Trabajo de grado en Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia, May 2011. ↑ [17](#), [18](#), [20](#)
- [21] H. E. Espitia and J. J. Soriano, “Sistema de inferencia difusa basado en relaciones booleanas,” *Ingeniería*, vol. 15, no. 2, pp. 52–66, 2010, Bogotá. Colombia. ↑ [18](#)
- [22] R. A. E., *Diccionario de la lengua española*, 22nd ed. Espasa Calpe, S.A., 2003, edición Electrónica. Versión 1.0. ↑ [18](#)
- [23] J. Arenas-García, A. R. Figueiras-Vidal, and A. H. Sayed, “Mean-square performance of a convex combination of two adaptive filters,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 54, no. 3, pp. 1078–1090, Mar. 2006. <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.863126>. ↑ [19](#)
- [24] J. D. Chacón. (2017). [Online]. Available: <https://github.com/juandados/ConvexCombinator>. ↑ [24](#)

Juan David Chacón León

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Matemático, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magister en Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: jdchaconl@correo.udistrital.edu.co



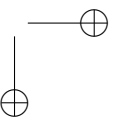
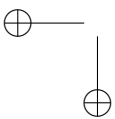


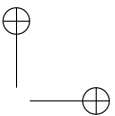
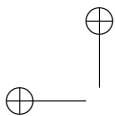
José Jairo Soriano Méndez

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Magister en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: jairosoriano@udistrital.edu.co

Omar Salazar Morales

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magister en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magister en Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Estudiante de Doctorado en Ciencias Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Correo electrónico: osalazarm@correo.udistrital.edu.co





Case report

Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants from a Paper Factory Using the AERMOD Model

Estimación de la Dispersión de Contaminantes Atmosféricos Emitidos por una Industria Papelera Mediante el Modelo AERMOD

Oscar Andrés Vidal-Daza¹, Andrea Pérez-Vidal^{2*}

¹Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ciencias Básicas. Cali, Colombia.

²Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia.

*Correspondence: andrea.perez00@usc.edu.co

Recibido: 26/07/2017. Modificado: 17/10/2017. Aceptado: 08/11/2017.

Abstract

Context: Modeling of atmospheric pollutants is an useful tool for air quality monitoring and management. In this study the dispersion of three atmospheric pollutants (SO₂, NO₂ and Total Suspended Particles - TSP) emitted by a boiler from a paper factory at Valle del Cauca department was estimated and its potential impact on the population settlements located at 5 Km around the stationary source was identified.

Method: The study was structured in three stages: (i) compiling and processing of meteorological, topographic and isokinetic sampling data; (ii) modeling the dispersion of pollutants using AERMOD ViewTM; and (iii) determination of the impact on surrounding populations.

Results: The pollution plume is dispersed towards predominant directions of wind and the trajectory is affected by mountainous topography. The maximum concentrations of pollutants found (0,012 μg SO₂ /m³, 1,42 μg NO₂ /m³ and 0,109 μgTSP/m³) were lower than the Colombian air quality standards.

Conclusions: The emission-control systems used by the studied paper industry ensures compliance with the air quality standard and generates a low impact on exposed populations. In addition, the atmospheric instability conditions favored the dilution of the contaminants discharged to the atmosphere. Although the AERMOD model was useful in the modeling of pollutants under atmospheric instability conditions and short length (< 5 km), it has limitations to simulate the chemical transformations of SO₂ and NO₂, therefore it is recommended to evaluate other models that allow a comparative analysis and select the most appropriate model.

Keywords: Air quality, atmospheric pollution, dispersion of pollutants, paper industry.

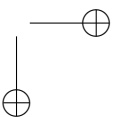
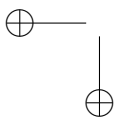
Language: Spanish



Cite this work as: O. A. Vidal, A. Perez, "Estimation of Dilution of Atmospheric Contaminants from a Paper Factory using the AERMOD Model", Ingeniería, vol. 23, no. 1, pp. 31-47, 2018.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12262>



Resumen

Contexto: La modelización de contaminantes atmosféricos es un instrumento que apoya la gestión de la calidad del aire. En este estudio se analizó la dispersión de tres contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 y partículas suspendidas totales o PST) emitidos por una caldera de una empresa productora de papel, que se encuentra ubicada en el departamento del Valle del Cauca; por otro lado, se identificó su potencial afectación en los asentamientos poblacionales ubicados a 5 km alrededor de la fuente fija.

Método: El estudio se estructuró en tres etapas, la primera consistió en la recopilación y procesamiento de información meteorológica, topográfica y datos de muestreos isocinéticos; la segunda en la modelización de dispersión de contaminantes usando AERMOD ViewTM y la tercera en la definición del impacto sobre las poblaciones aledañas.

Resultados: La pluma de contaminación se dispersó hacia las direcciones predominantes del viento y su trayectoria se ve afectada por la topografía montañosa del lugar. Las concentraciones máximas de contaminantes encontradas ($0,012 \mu\text{g SO}_2 / \text{m}^3$, $1,42 \mu\text{g NO}_2 / \text{m}^3$ and $0,109 \mu\text{gTSP}/\text{m}^3$) resultaron inferiores a lo establecido en la normatividad ambiental colombiana.

Conclusiones: El sistema de control de emisiones usado por la fábrica de papel estudiada garantiza el cumplimiento de la norma de calidad de aire y genera un bajo impacto sobre las poblaciones expuestas; adicionalmente, las condiciones de inestabilidad atmosférica favorecieron la capacidad de dilución de los contaminantes descargados a la atmosfera. Aunque el modelo AERMOD resultó útil en la modelización de contaminantes bajo condiciones de inestabilidad atmosférica y corta longitud ($< 5 \text{ km}$), presentó limitaciones para simular las transformaciones químicas de SO_2 y NO_2 , siendo recomendable evaluar otros modelos que permitan realizar un análisis comparativo y seleccionar el modelo más adecuado.

Palabras clave: Calidad del aire, contaminación atmosférica, dispersión de contaminantes, industria papelera.

Idioma: Español

1. Introducción

En zonas urbanas y rurales la contaminación del aire ocasiona la muerte prematura de 3 millones de personas por año, de las cuales el 88 % se concentran en países de bajos y medianos ingresos; el 72 % de las muertes se relacionan con cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, un 14 % con neumopatía obstructiva crónica o infección aguda de las vías respiratorias inferiores y el 14 % restante con cáncer de pulmón [1]. En América Latina y el Caribe, al menos 100 millones de personas están expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los países con mayores tasas de mortalidad, en su orden, son Brasil, México, Argentina, Bolivia, Colombia, Perú, Chile, Uruguay y Ecuador, siendo los tres primeros los que presentan mayores poblaciones urbanas [2].

Los efectos en la salud respiratoria por la exposición aguda o crónica a partículas atmosféricas finas como $\text{PM}_{2.5}$, óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2) han sido demostrados científicamente y se asocian con aumentos significativos en los índices de mortalidad y morbilidad, siendo los niños uno de los segmentos poblacionales más vulnerables por estar expuestos en mayor proporción que los adultos y tener condiciones biológicas más susceptibles [3], [17].

Como parte de la gestión integral de la calidad del aire, se encuentra el uso de los modelos de predicción empleados para estimar la circulación de contaminantes en el aire y calcular su distribución espacial en un espacio determinado; la modelización de contaminantes brinda insumos para predecir y analizar la calidad del aire, contribuyendo a su vez en la toma de decisiones políticas, reglamentarias, de planificación, estudios de impacto ambiental en poblaciones expuestas, entre otras [4], [5]. Algunas autoridades ambientales colombianas utilizan la información obtenida del sistema de vigilancia de la calidad del aire (SVCA) para actividades de modelización, estudios de dispersión de contaminantes y para determinar el impacto de las actividades que afectan el estado de la calidad del aire [6]. El IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) [7] indica que cuando los datos de series anuales no cumplen con la representatividad temporal, pueden ser validados con resultados dados por sistemas de modelización.

En Europa se han desarrollado más de 120 modelos con diferentes aplicaciones, destacándose algunos paquetes de *software* como BOOT software, ASTM, AMET, JRC Tool [4], en Estados Unidos se reportan modelos como el HYSPLIT y READY, desarrollados por la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), el HPDM desarrollado por el *Electric Power Research Institute*, PCCOSYMA desarrollado por el *National Radiological Protection Board* (NRPB) y el *Forshungszentrum Karlsruhe* (FZK) [8], [9], además de los sistemas de modelización recomendados por la *Environmental Protection Agency* (US-EPA) como AERMOD, CALPUFF, BLP, CALINE3, CAL3QHC/CAL3QHCR, CTDMPLUS, y OCD [10]; en Latinoamérica se resalta el *software* CCATT-BRAMS desarrollado en Brasil [11].

En Colombia, el marco normativo de calidad de aire regido por el Decreto 948 de 1995 [12] y sus resoluciones reglamentarias 601/2006 [13], 610/2010 [14], 909/2008 [15] y 1541/2013 [16], promueven el uso de los modelos de dispersión AERMOD y CALPUFF avalados por la US-EPA. A nivel mundial se han reportado diferentes estudios relacionados con el uso de AERMOD en la modelización de emisiones de dióxido de azufre (SO₂), plomo (Pb), partículas suspendidas totales (PST) y PM10 provenientes de fuentes fijas [5], [9], [17], [18]; en el ámbito nacional, se destacan algunos estudios realizados en los departamentos de Boyacá, Cesar y Cundinamarca [19]–[21]. En ciudades como Bogotá D.C., además del uso de AERMOD, se han evaluado otros modelos geoestadísticos y de pluma Gauss para predecir el nivel de contaminación por material particulado (PM10) [22], sistemas difusos evolutivos con resultados satisfactorios, mostrando las redes neuronales como una importante herramienta de predicción [23] y el modelo CCATT-RAMS para estimar el comportamiento de la atmósfera, formación, transporte y remoción de contaminantes en la ciudad y sus alrededores [24], [25].

Los mayores niveles de contaminación atmosférica en Colombia se presentan en las zonas urbanas y grandes centros industriales, los cuales agrupan alrededor del 74 % de la población [6], siendo la principal causa el uso de combustibles fósiles, ya sea por fuentes de emisiones móviles, fijas o aéreas. El 41 % del total de las emisiones se concentran en las ciudades de Bogotá D.C., Medellín y Cali [26], y los contaminantes con mayor incumplimiento de los límites máximos permisibles y con gran potencial de afectación a la salud pública son el material particulado PM2.5, PM10 y partículas suspendidas totales (PST) [7].

La participación de los distintos sectores en la contaminación del aire en el ámbito nacional se distribuye en un 86 % el transporte terrestre, 8 % la industria, 3 % termoeléctricas, 2 % en los sectores residencial y comercial y 1 % el transporte aéreo [26]. Respecto al aporte industrial, las emisiones atmosféricas procedentes de fábricas de pulpa, papel y cartón contribuyen significativamente a la contaminación del aire comparadas con otros sectores industriales, emitiendo partículas finas, partículas gruesas, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, gases de azufre y componentes organovolátiles [27]. En Colombia, este sector industrial se ubica principalmente en el Valle de Cauca (35,2 %), Bogotá D.C. (23,9 %) y Antioquia (18,6 %) [28].

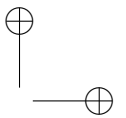
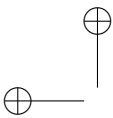
En el Valle del Cauca, los principales contaminantes atmosféricos emitidos por los diferentes sectores industriales son SO_x (16 385 ton/año), material particulado PM10 (11 465 ton/año) y NO_x (3 784 ton/año), siendo la industria del papel y artes gráficas la que contribuye con la mayor emisión de SO_x (43,1 %), NO_x (38,9 %) y PM10 (55,6 %), seguida de la industria de minerales no metálicos y del sector de textiles y confecciones [29]. En Bogotá D.C., las localidades de Puente Aranda, Fontibón y Kennedy concentran el mayor número de empresas con fuentes de emisión; el 32 % de la emisión total de PM10 en la ciudad corresponde al aporte de estas fuentes puntuales, siendo la industria de papel y artes gráficas y la industria química los sectores con mayor contribución [30].

En este reporte de caso se realizó la modelización de la dispersión de los contaminantes SO_2 , NO_2 y PST emitidos por una industria papelería ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, usando el software AERMOD ViewTM, versión 16 216, con el fin de establecer los niveles de calidad de aire y potenciales impactos sobre las poblaciones aledañas. Con los resultados del estudio, también se buscó evidenciar la importancia del uso de la modelización de contaminantes como instrumento de apoyo en la gestión ambiental al interior de las organizaciones productivas y de control o vigilancia por parte de las entidades ambientales y de salud pública.

2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en una empresa productora de papel ubicada en el departamento Valle del Cauca, Colombia, modelando las emisiones de SO_2 , NO_2 y PST provenientes de una caldera de recuperación que emplea como sistema de control de emisiones un precipitador electrostático.

La caldera es usada para recuperar los químicos del proceso de cocción de fibra y para la producción de vapor utilizado en el proceso. Dependiendo del origen de la fibra, esta se dispone en digestores y se somete a un proceso de cocción utilizando presión de vapor, altas temperaturas y una solución de sulfuro de sodio e hidróxido de sodio, denominada licor blanco. Como resultado, se obtiene la transformación de material fibroso en pulpa más licor negro. El licor negro entra a la caldera de recuperación como combustible, donde se quema la fracción orgánica (lignina y otros compuestos azucarados de la fibra vegetal) liberando energía en el proceso de combustión, la cual es aprovechada en forma de vapor para las necesidades de la planta. La fracción inorgánica que no es quemada (sales minerales, sulfuro de sodio, Na_2S , y carbonato de sodio, Na_2CO_3), se recupera después del proceso de combustión para ingresar nuevamente al sistema de digestión. La metodología de la investigación se estructuró en tres etapas: recopilación y procesamiento de información, modelización de la dispersión de contaminantes y definición del impacto sobre asentamientos poblacionales.



2.1. Recopilación y procesamiento de información

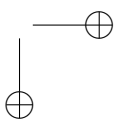
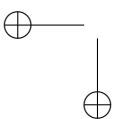
Se recopilaron datos meteorológicos de superficie y de perfil atmosférico vertical de un año, generados por el modelo de pronóstico meteorológico de mesoescala WRF (*the Weather Research and Forecasting*) [18]; se adquirió información en formatos PFL y SFC, generados a partir de archivos UA y SAM respectivamente. Esta información fue adquirida a través de la contratación de un tercero que ha adaptado el modelo WRF a las condiciones del territorio colombiano con las siguientes especificaciones:

- Resolución espacial de 6 km (distancia horizontal entre puntos de grilla) para todo el territorio nacional.
- 32 niveles desde superficie hasta 50 mb con una densidad máxima en superficie.
- Simulación explícita de las nubes con cinco tipos de hidrometeoros (vapor, agua líquida, nieve, hielo y graupel).
- Simulación de la radiación de onda corta y larga separada por once y dieciséis bandas respectivamente.
- Capa límite según teoría de similitud con cierre combinado local y no-local según régimen de estabilidad.
- Cálculo del balance hídrico en superficie, suelo y canopy.

Las variables meteorológicas analizadas fueron: precipitación, nubosidad, radiación solar, temperatura ambiente, dirección del viento, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa y perfil atmosférico vertical. Por ser un modelo regional, se emplearon como datos de entrada atmosféricos los provenientes de un modelo global, más las condiciones de frontera en superficie como los datos de topografía, uso de suelos y temperatura superficial del mar como se expone a continuación.

- Datos atmosféricos: las condiciones atmosféricas iniciales y de frontera se extrajeron de datos del proyecto CFSV2 (*Climate Forecast System Version 2*) [31], usando solo los datos que han sido puestos en coherencia con observaciones reportadas por la red mundial de estaciones meteorológicas.
- Datos de superficie: debido a que el modelo digital de terreno del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) no está validado para el territorio colombiano, se empleó el modelo digital de elevación elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y validado en campo. Los datos de uso de suelo provienen del sensor MODIS a una resolución de 500 metros con fecha de actualización de 2012.

La ubicación topográfica satelital del área de estudio y asentamientos poblacionales expuestos a la contaminación, se establecieron a partir de imágenes satelitales extraídas de Google Earth usando los procesadores AERMAP y AERMOD 3D, como se muestra la Figura 1, en la cual se observa la fuente fija ubicada sobre terreno plano y rodeada por seis asentamientos humanos, además de existir terreno montañoso sobre el lado oeste del área de estudio.



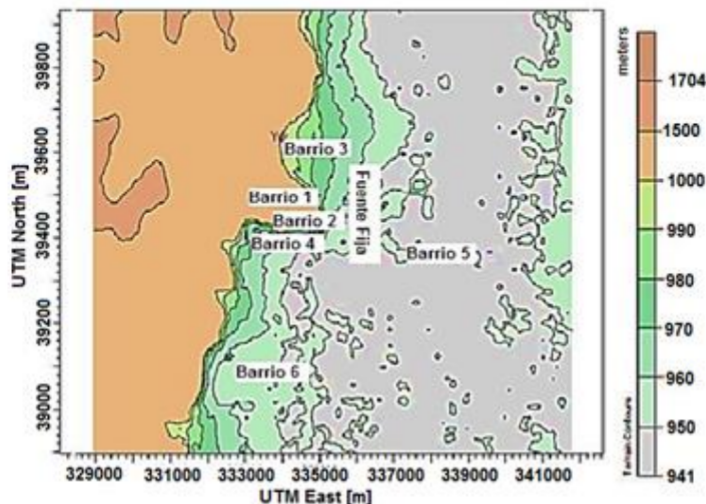


Figura 1. Características topográficas del área de estudio y ubicación de asentamientos poblacionales.

La información específica de la fuente, requerida para la modelización, se obtuvo con planos de diseño de la caldera de recuperación y mediciones isocinéticas. La fuente de emisión se catalogó en el *software* como fuente puntual y presentaron las características y variables descritas en la Tabla I, resaltándose que los datos de emisión de los contaminantes fueron obtenidos a partir de tres muestreos isocinéticos realizados en días consecutivos por un laboratorio acreditado por el IDEAM bajo la norma ISO 17025, usando la metodología estandarizada de la EPA (métodos del uno al siete).

Tabla I. Parámetros de entrada de la fuente fija.

Parámetro	Caldera de recuperación	Unidades
Ubicación UTM	X:335972,33 Y:394120,89	m
Tipo de Fuente	Puntual	-
Emisión del contaminante	PST	0,53
	SO ₂	0,056
	NO ₂	6,89
Diámetro de la chimenea	2,5	m
Área de la chimenea	4,91	m
Altura de la chimenea (descarga)	67	m
Velocidad de salida del gas	18,64	m/s
Temperatura del gas	177,2	°C
Capacidad nominal de vapor	543414	Lb/h
Producción de vapor promedio anual	281,083	Lb/h
Producción de vapor promedio durante el estudio	326,794	Lb/h
Tiempo de operación de la caldera	24	h/día

2.2. Modelización de la dispersión de contaminantes

A partir de la información recopilada se procedió a la sistematización de datos requeridos y la ejecución de los modelos de dispersión para los contaminantes de interés utilizando el *software*

AERMOD ViewTM; esta herramienta informática está compuesta por tres procesadores: AERMOD (procesador que genera el modelo de dispersión usando la topografía y meteorología de la zona), AERMAP (preprocesador topográfico encargado de realizar las curvas de nivel del área a partir de imágenes satelitales) y AERMET (preprocesador meteorológico) [10]. La Tabla II sintetiza la configuración empleada en AERMET v151981.

Tabla II. Configuración empleada en AERMET	
Etapa 1: Extracción	
Upper air	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd)	01/01/16 a 31/12/16
Ubicación de la estación (Grados decimales)	76,48W – 3,56N
Ajuste de tiempo a hora local (ajuste positivo en coord. Oeste)	5
Surface	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd)	01/01/16 a 31/12/16
Ubicación de la estación (Grados decimales)	76,48W – 3,56N
Ajuste de tiempo a hora local (ajuste positivo en coord. Oeste)	0
Etapa 2: Compilación	
MERGE	
Intervalo de tiempo (yy/mm/dd):	01/01/16 a 31/12/16
Etapa 3: Preparación de datos para AERMOD	
SECTORES	Según uso de suelo a 5 km a la redonda de datos de superficie
Numero de sectores:	2
Sector 1	276 ⁰ a 354 ⁰ ; Uso de suelo predominante Residencial de baja densidad
Sector 2	354 ⁰ a 276 ⁰ ; Uso de suelo predominante. Cultivos en hileras
Periodo de sectores:	Mensual

Como datos de entrada para el modelo, se tuvieron en cuenta los siguientes:

- Área de modelización: 5 km de radio alrededor de la fuente fija para cubrir los asentamientos poblacionales.
- Características de la fuente, información meteorológica y elevaciones del terreno: se emplearon datos recopilados y analizados previamente en la primera etapa.
- Receptores: se elaboró una malla de receptores tipo cartesiana, incluyendo seis receptores discretos expuestos a la fuente de emisión.
- Tiempo de modelización: se realizó un modelo de dispersión en frecuencia anual.

2.3. Definición del impacto sobre asentamientos poblacionales

Con los resultados de la modelización se realizó un análisis del impacto generado por la emisión de los contaminantes sobre los asentamientos poblacionales cercanos al área de estudio, en un radio de 5 km alrededor de la fuente de emisión. Se empleó como referencia la Norma Colombiana de

Calidad de Aire, Resolución 610/2010 [15], sobre la cual se realizó la conversión de las condiciones de referencia (25^oC y 760 mmHg) a condiciones locales (24^oC y 676 mmHg) como lo indica la Resolución 601/2006 [13].

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de información meteorológica y topográfica

En el área de estudio predominaron los vientos del oeste-noroeste (WNW) que soplaron hacia el este-sudeste (ESE) con velocidades entre 2,10-11,10 m/s con una frecuencia anual de aparición mayor al 36 %, como se observa en la rosa de vientos y la distribución de frecuencia de velocidades del viento obtenidas con el procesador AERMET (Figura 2, Figura 3). El modelo representa una velocidad y dirección media a partir de datos de velocidad y dirección de un año, sin incluir todos los perfiles.

Teniendo en cuenta que la velocidad y dirección de los vientos influyen considerablemente en la dispersión o dilución de los contaminantes emitidos [32], los resultados obtenidos fueron comparados con las rosas de vientos reportadas anualmente por la entidad ambiental, usando como referencia la estación meteorológica más cercana al área de estudio, observándose que la dirección WNW es una de las más influyentes en esta zona [33].

Respecto a las velocidades de viento, predominaron valores entre 0,5-2,1 m/s con un 39,7 % promedio anual, seguido de velocidades entre 2,10-8,80 m/s con una frecuencia del 40,4 %. Los vientos con velocidad < 0,5 m/s presentaron un bajo porcentaje del 2,8 %, condición favorable para la zona de estudio, puesto que este tipo de vientos de calma, combinados con el crecimiento urbano, uso de combustibles fósiles y presencia de otras fuentes de emisión, pueden comprometer la calidad del aire generando un ambiente nocivo para la población al no favorecer la dispersión de los contaminantes [3].

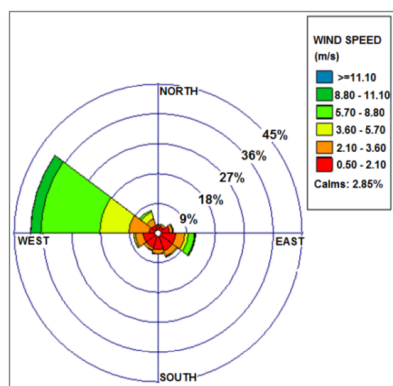


Figura 2. Rosa de los vientos.

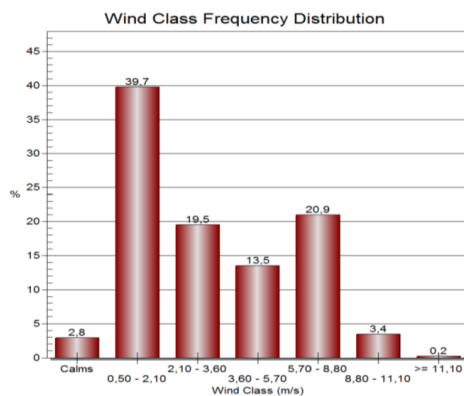


Figura 3. Distribución de frecuencias de velocidad del viento.

La Tabla III describe la variación mensual de la velocidad del viento, la temperatura, precipitación y radiación solar obtenidos a partir de los datos horarios medidos durante un año; se resalta que la velocidad media anual del viento fue de 3,5 m/s, la cual se concentró en una frecuencia del 19,5 % como lo indica la Figura 3.

Tabla III. Variación mensual de datos meteorológicos.

Mes	Velocidad del viento m/s	Temperatura °C			Precipitación acumulada (mm/mes)	Radiación Solar (W/m2)
		Media	Máxima	Mínima		
Enero	2,5	24,3	31,8	19,6	225,0	427,4
Febrero	3,0	24,5	31,7	19,8	120,0	396,2
Marzo	3,7	24,0	31,8	19,3	450,0	386,5
Abril	3,5	24,0	31,8	19,2	170,0	418,5
Mayo	3,4	24,2	31,5	19,5	45,0	370,2
Junio	3,1	24,7	31,7	19,7	70,0	235,0
Julio	4,1	24,3	32,1	18,7	15,0	357,0
Agosto	5,1	25,2	33,0	19,0	40,0	340,8
Septiembre	3,5	25,3	33,7	19,0	100,0	219,6
Octubre	3,2	24,3	31,6	19,2	75,0	356,9
Noviembre	3,3	23,7	29,9	19,6	130,0	352,7
Diciembre	3,4	24,7	32,0	19,0	30,0	332,3
Promedio	3,5	24,4	31,9	19,3	1.470,0*	349,4

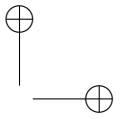
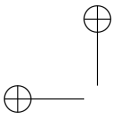
*Precipitación acumulada en el año

En la zona de estudio, la temperatura presentó un valor medio anual de 24,4 °C con un rango de variación entre 19 °C y 33,7 °C y se clasificó como una zona cálida de acuerdo con Unesco-FAO [34] por presentar temperaturas mayores a 15 °C en el mes más frío (noviembre). Cabe anotar que la temperatura influye en la densidad de los gases, la combinación de aire y gas denso puede generar turbulencias que afectan la altura de mezcla y definen la estabilidad atmosférica del lugar, afectando a su vez afecta la dispersión de los contaminantes [32].

Con relación a la precipitación, en Colombia existen dos tipos de régimen: monomodal y bimodal. El primero se caracteriza por presentar una temporada seca y una lluviosa durante el transcurso del año y en el segundo se registran dos temporadas secas alternadas con dos lluviosas [35]. La zona de estudio presentó un régimen bimodal con dos periodos lluviosos entre los meses de enero y abril y septiembre y noviembre, siendo probable que en este periodo los mecanismos naturales de remoción de material particulado y NO_x se vean favorecidos por efecto de arrastre y deposición húmeda [5], [36].

En Colombia, la precipitación mensual en el ámbito local está determinada por los sistemas de nubosidad asociados a la circulación local de cada vertiente y, a su vez, está condicionada por la altitud, la orientación de las montañas y la actividad convectiva de cada localidad; las regiones de mayor precipitación pueden alcanzar valores anuales de 12 700 mm y las regiones más secas valores entre 350-400 mm/año, en general, núcleos secos se acercan a 1000 mm/año [37], por lo que puede decirse que el área de estudio no presenta condiciones secas.

Se observó que la radiación solar presentó un valor medio anual de 349,4W/m², con valores altos en los meses de enero y abril y valores mínimos mensuales en junio y septiembre. Los valores medios anuales de radiación solar y velocidad del viento (3,5 m/s) fueron empleados para



determinar la estabilidad atmosférica en la zona de estudio utilizando la clasificación F.A. Gifford y Pasquill, obteniéndose una categoría C que correspondió a una atmósfera ligeramente inestable. Aunque una de las ventajas del uso de las clases de condición atmosférica P-G es el reducido conjunto de datos meteorológicos necesarios, los cuales facilitan la toma de decisiones con fines regulatorios o respuesta rápida frente a eventos de contaminación [8].

La estabilidad atmosférica influye en la dispersión de contaminantes, siendo por lo tanto una variable de gran relevancia durante la modelización en una atmósfera estable los contaminantes presentarán baja dispersión y, como consecuencia, la concentración de estos aumentará. Esta situación, unida a condiciones meteorológicas y climatológicas desfavorables, puede causar impactos negativos sobre la población [32]. En el área de estudio puede afirmarse que la estabilidad categoría C, favoreció la circulación vertical de la atmósfera, produciendo una mezcla de aire considerable que puede ayudar a la dilución de los contaminantes [5], [8], [9].

Respecto a las características topográficas del área de estudio, se observó que existen dos zonas diferenciadas por la altura sobre el nivel del mar, la primera considerada plana (941-960 msnm) y la segunda montañosa (1000-1500 msnm) ubicada al oeste, condiciones de terreno que pueden influenciar la dispersión y arrastre de elementos contaminantes a través del aire [36]. La topografía, unida a la dirección y velocidad del viento, condiciona la dispersión de los contaminantes, así para zonas de topografía simple se consigue un flujo libre en la dirección predominante del viento y un flujo turbulento en la zona compleja [20].

La zona de montaña ubicada al oeste (W) de la empresa productora de papel presentó una larga extensión hacia el norte y el sur, fue tenida en cuenta para el análisis del impacto sobre los asentamientos humanos, puesto que esta condición topográfica podía resultar un posible obstáculo en el flujo de salida de los contaminantes emitidos por la fuente fija, formando el efecto *downwash*, el cual puede ser modelado por AERMOD [8], [38].

La topografía en general, juega un papel fundamental en el comportamiento de la atmósfera, sirviendo de obstáculo a las corrientes de aire que arrastran contaminantes y pueden acumularse por la obstrucción, además de cambiar la cantidad de radiación solar recibida por la superficie terrestre a lo largo del día, lo que a su vez influye en la generación de diferencias de presión atmosférica que producen movimientos de masas de aire [39], [40].

3.2. Modelización de la dispersión de contaminantes

Para la modelización se empleó como punto de referencia la ubicación geodésica de $3^{\circ}36'34,10''N$, $76^{\circ}31'19,95''W$ correspondiente a la zona de estudio y se extendió el dominio de modelo a 10 km al norte (N) y 10 km al este (E), de esta manera se aseguraron los 5 km alrededor de la fuente de emisión

La ubicación de los asentamientos poblacionales y edificaciones cercanas a la fuente de emisión se realizó mediante la elaboración de una malla de receptores tipo cartesiana conformada por 101 puntos espaciados cada 100 metros a 5 km a la redonda. Se ubicaron seis receptores discretos como se muestra en la Tabla IV.

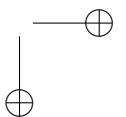
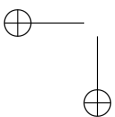


Tabla IV. Asentamientos poblacionales cercanos a la fuente de emisión

Barrio	Ubicación respecto a la fuente de emisión	Distancia a la fuente de emisión (Km)	Georeferenciación	Altura sobre el nivel del mar (m)
N ^o 1	Norte	0,9	3 ^o 34' 14,28" N - 76 ^o 28' 42,34" W	962
N ^o 2	Nor Oeste	1,0	3 ^o 34' 02,13" N - 76 ^o 29' 07,57" W	995
N ^o 3	Nor Oeste	2,5	3 ^o 34' 52,02" N - 76 ^o 29' 34,05" W	995
N ^o 4	Sur Oeste	1,8	3 ^o 33' 47,08" N - 76 ^o 29' 38,61" W	988
N ^o 5	Este	3,0	3 ^o 33' 42,63" N - 76 ^o 26' 59,95" W	949
N ^o 6	Sur Oeste	4,0	3 ^o 31' 51,03" N - 76 ^o 29' 49,56" W	968

Dentro del área de modelización se consideró como edificación o estructura grande la zona montañosa donde el impacto de la dispersión de contaminantes se contempló en el modelo, las edificaciones restantes fueron ubicadas a nivel de suelo por no presentar alturas relevantes. Los resultados de la modelización se sintetizan en la Figura 4, la Figura 5 y la Figura 6 que muestran los mapas de isoconcentraciones, detallando las curvas de concentración (isopletras) en promedio anual de los contaminantes dióxidos de azufre, dióxido de nitrógeno y PST. Los datos promedios anuales son entregados por el modelo, el cual tiene la capacidad de entregar modelos de contaminantes en diferentes sentidos horarios (por hora, cada veinticuatro horas, mensual, anual); en este caso, la resolución temporal de salida de los datos simulados fue anual. Estos datos promedios anuales se obtuvieron a partir de la información meteorológica de un año proveniente del modelo de pronóstico WRF.

El modelo de dispersión de los tres contaminantes presentó una tendencia similar, evidenciándose que los mayores valores de concentración se ubicaron cerca de la fuente de emisión, los cuales fueron disminuyendo a medida que se alejaban de ella por un efecto de dilución de la concentración de contaminantes. Los resultados confirman que el transporte de los contaminantes sigue las direcciones predominantes del viento como se mostró en la rosa de los vientos, la dirección oeste-noroeste (WNW), resultado acorde con lo planteado por algunos autores que afirman que un contaminante emitido a la atmósfera es distribuido por la dirección predominante del viento [32], [41].

Se observó que la zona montañosa del área de estudio influyó en la dispersión de los contaminantes que son arrastrados por el viento en dirección NW, los cuales, al chocar con este obstáculo topográfico, buscan bordearlo y se dispersan en sentido norte y sur, confirmando la influencia de las características topográficas sobre la dispersión y concentración de los contaminantes a nivel del suelo [20], [39], [40].

La Tabla V muestra los valores de las concentraciones máximas obtenidas en la modelización para SO₂, NO₂ y PST comparados con la Norma Colombiana de Calidad del Aire, ajustada a condiciones locales. Las máximas concentraciones de emisión de contaminantes obtenidas con la modelización resultaron muy inferiores a lo establecido en la Norma Colombiana de Calidad del Aire, mostrando que el precipitador electrostático empleado en la caldera, como sistema de control de emisiones, está garantizando una reducción considerable de los contaminantes emitidos, dando cumplimiento a la reglamentación nacional. Adicionalmente, los mapas de isoconcentraciones indicaron que estas concentraciones se localizaron hacia el área menos poblada (lado inferior derecho, ESE), condiciones que reducen los riesgos a la salud de las poblaciones aledañas a la fuente de emisión.

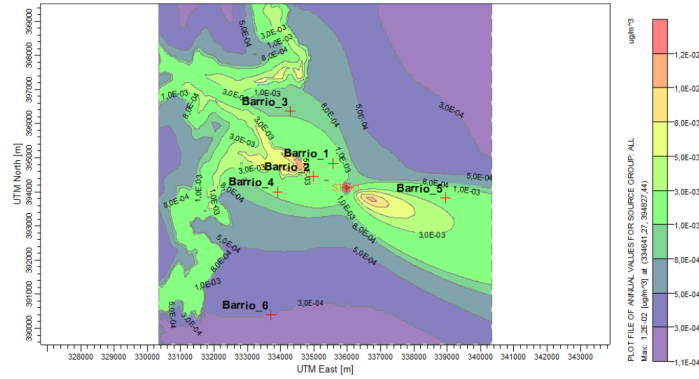


Figura 4. Modelo de dispersión de dióxido de azufre.

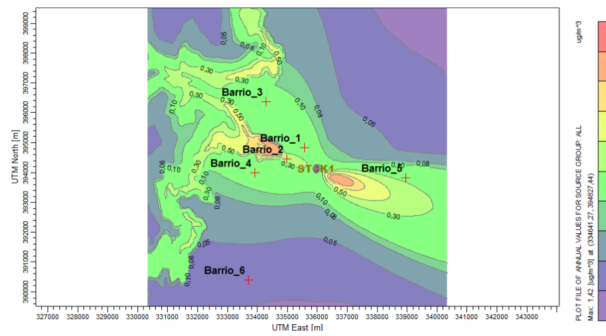


Figura 5. Modelo de dispersión de óxido de nitrógeno.

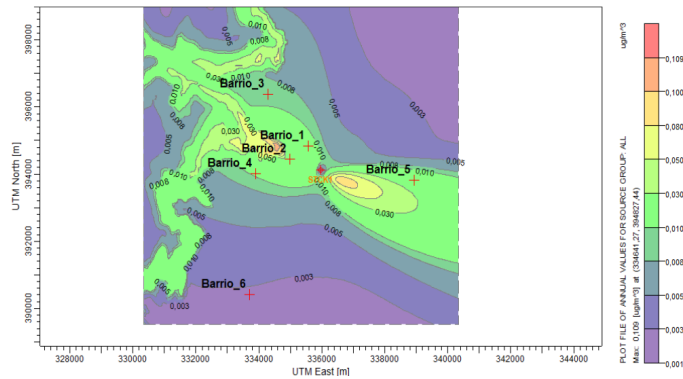


Figura 6. Modelo de dispersión de partículas suspendidas totales.

Tabla V. Máxima concentración obtenida en la modelización comparada con la reglamentación nacional.

Contaminante	Res 610/2010		Resultado de la Modelización	
		Concentración máxima permisible $\mu\text{g}/\text{m}^3$ *	Concentración máxima $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Coordenadas UTM(m)
SO ₂		71,4	0,012	336798,8 X 393639,55 Y
NO ₂	Anual	89,2	1,42	336798,8 X 393639,55 Y
PST		89,2	0,1089	336798,8 X 393639,55 Y

*Valor calculado para condiciones locales [13]

Aunque el modelo AERMOD ha mostrado su aplicabilidad y confiabilidad en la modelación de material particulado [18], tiene una limitación entorno a la modelización de contaminantes gaseosos como NO₂ y SO₂ por no contar con el módulo de reacción, lo que impide modelar las posibles transformaciones químicas en la atmósfera, limitando su predicción a una distancia máxima de 5 km desde el punto de emisión, principalmente en época húmeda [5]. En los estudios de análisis de riesgos en la salud, esta limitación restringe las proyecciones en tiempo, para este tipo de contaminantes, siendo recomendable complementar la modelización con la aplicación de otros modelos que consideren este aspecto, como los modelos eulerianos tridimensionales; estos modelos tridimensionales, además, utilizan múltiples mediciones de viento en las direcciones horizontal y vertical, incluyen efectos de terreno y cizalladura del viento vertical y horizontal y tratan variables de parámetros más realistas como la rugosidad de la superficie, la deposición y la estabilidad atmosférica variable [32].

3.3. Definición del impacto sobre asentamientos poblacionales

Los modelos de dispersión proporcionan una representación confiable de la calidad del aire del sector [41], principalmente para contaminantes particulados, siendo de gran utilidad como estrategia de gestión ambiental en las empresas que emiten contaminantes atmosféricos durante sus procesos productivos, sirviendo a su vez de instrumento de apoyo en la vigilancia y protección de la salud pública. En la Tabla V se enlistan los seis asentamientos o receptores poblacionales identificados a 5 km de la fuente fija, ubicados de mayor a menor impacto y especificando los niveles respirables de los contaminantes evaluados.

El receptor más impactado fue el barrio N^o 2 por estar expuesto a las concentraciones más altas de NO₂, el menos afectado fue el barrio N^o 6, probablemente por ser el asentamiento ubicado a mayor distancia de la fuente fija y no estar influenciado por la dirección de los vientos, lo que favorece la capacidad para diluir la concentración de los contaminantes.

La estabilidad atmosférica de la zona de estudio (clase C, ligeramente inestable) también favoreció la capacidad de la atmósfera para diluir los contaminantes que son descargados sobre ella [48], siendo un fenómeno favorable para los receptores de la zona de estudio, permitiendo mantener bajos niveles de contaminación del aire y ayudando a proteger la salud cardiovascular y respiratoria de la población [9]. Aunque los resultados de la investigación mostraron que no existe un impacto significativo de las emisiones de SO₂, NO₂ y PST sobre los receptores poblacionales identificados en el estudio, es necesario considerar que en esta área existen otras industrias y fuentes fijas que podrían contribuir al deterioro de la calidad del aire sobre los receptores estudiados, siendo recomendable realizar una modelización integral que considere todas las emisiones fijas que actualmente afectan la zona de estudio.

En general, se observó que la modelización de contaminantes resultó una herramienta útil para conocer el estado de la calidad del aire, facilitar la identificación de zonas vulnerables y con mayor potencial de afectación de la salud humana. Esta herramienta permite conocer los contaminantes cuyas concentraciones superan los niveles máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional, su distribución en el tiempo y en el espacio y las fuentes de emisión asociadas a estos, contribuyendo a la formulación de políticas públicas en el ámbito nacional encaminadas a la protección del bienestar de la población, del medio ambiente y sirviendo de apoyo en la toma de decisiones por parte de las empresas y las autoridades ambientales y de salud.

Hay que tener en consideración que, por lo general, los estudios de análisis de riesgo enfatizan sus resultados considerando condiciones atmosféricas neutrales, cuando en la mayoría de los sitios industriales existen condiciones atmosféricas no neutrales; modelos como AERMOD funcionan bajo suposiciones de condiciones meteorológicas uniformes siendo menos eficientes que otros los modelos que pueden simular la dispersión en condiciones no uniformes y espacialmente variables, como CALPUFF [32]. Sin embargo, algunos estudios han mostrado que las estimaciones de dispersión arrojadas por el modelo AERMOD, comparadas con modelos como CALPUFF, resultan más conservadoras, por lo que en términos de reglamentación puede reducir el riesgo a la salud y proteger mejor a la población [18]; adicionalmente, hay que tener en consideración si la emisión es de forma continua o instantánea, en la primera el tiempo de liberación y muestreo se comparan con el tiempo de viaje de la fuente al receptor siendo útil para distancias de menos de 10 km y en la segunda, el tiempo de liberación o el tiempo de muestreo es más corto comparado con el tiempo de viaje, siendo adecuado para distancias mayores a 30 km [32].

Tabla VI. Asentamientos poblacionales potencialmente impactados por la emisión de contaminantes.

Impacto de mayor a menor	Asentamiento Poblacional	Ubicación respecto a la fuente de emisión	Distancia a la fuente de emisión (Km)	Inmisión de SO ₂ (μ/m ³)	Inmisión de NO _x (μ/m ³)	Inmisión de PST (μ/m ³)	Altura sobre el nivel del mar (m)
1	Barrio N ^o 2	Nor-Oeste	1,0	1 x 10 ⁻³	0,3	1 x 10 ⁻²	995
2	Barrio N ^o 1	Norte	0,9	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	962
3	Barrio N ^o 4	Sur-Oeste	1,8	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	995
4	Barrio N ^o 3	Nor-Oeste	2,5	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	988
5	Barrio N ^o 5	Este	3,0	1 x 10 ⁻³	0,1	1 x 10 ⁻²	949
6	Barrio N ^o 6	Sur-Oeste	4,0	1 x 10 ⁻⁴	3 x 10 ⁻²	1 x 10 ⁻³	968

4. Conclusiones

Los resultados de la modelización evidenciaron que los valores de las concentraciones máximas de SO₂ (0,012 μg/m³), NO₂ (1,42 μg/m³) y PST (0,109 μg/m³) son inferiores a lo establecido en la Norma Colombiana de Calidad del Aire, indicando el adecuado funcionamiento del sistema de control de emisiones con el que cuenta la empresa papelera, lo que reduce los potenciales impactos sobre las poblaciones expuestas.

La trayectoria seguida por los contaminantes atmosféricos emitidos se encuentra fuertemente influenciada por las direcciones predominantes de los vientos y afectada por la topografía del lugar.

Adicionalmente, las condiciones de inestabilidad atmosférica favorecieron la capacidad de dilución de los contaminantes descargados a la atmosfera.

El software AERMOD ViewTM resultó una herramienta útil y de fácil manejo para la modelización de la dispersión de los contaminantes PST, SO₂ y NO₂, siendo recomendable para sitios con inestabilidad atmosférica y corta longitud (< 5 km), condiciones que se tuvieron durante el estudio; sin embargo, hay que tener en consideración las limitaciones del modelo para la modelización de contaminantes gaseosos al no simular las transformaciones químicas que puedan tener los contaminantes gaseosos SO₂ y NO₂, al igual que el uso de la clasificación Pasquill-Gilford para el cálculo de la estabilidad atmosférica. Por lo tanto, es recomendable evaluar otros modelos que permitan validar y realizar un análisis comparativo y de este modo seleccionar el modelo más adecuado.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al ingeniero Germán Bolaños por su valiosa colaboración y asesoría técnica durante el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] Organización Mundial de la Salud, *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud* <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/> ↑32
- [2] G. Joanne and S. Sánchez, *La calidad del aire en América Latina: una visión panorámica*. 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.cleanairinstitute.org/calidaddelaireamericalatina/cai-report-spanish.pdf> ↑32
- [3] C. Ubilla and K. Yohannessen, “Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratoria en el niño”. *Rev. Med.Clin.Condes.*, vol. 28, no. 1, pp. 111-118, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003> ↑32, 38
- [4] European Environment Agency, *Modelling*. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC11a/page011.html> ↑33
- [5] K. Seangkiatiyuth *et al.*, “Application of the AERMOD Modeling System for Environmental Impact Assessment of NO₂ Emissions from a Cement Complex”. *J. Env. Sci.*, vol. 23, no. 6, pp. 931-940, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60499-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60499-8) ↑33, 39, 40, 43
- [6] Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales - IDEAM, *Informe de estado de la calidad del aire en Colombia 2007 -2010*. 2012. [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022433/CALIDADDELAIREWEB.pdf> ↑33
- [7] Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales - IDEAM, *Informe de la calidad del aire en Colombia 2011-2015*. 2016. [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe.del.Estado.de.la.Calidad.del.Aire.en.Colombia.2011.2015.vfinal.pdf> ↑33
- [8] M. Caputo, M. Giménez and M. Schlamp, “Intercomparison of Atmospheric Dispersion Models”. *Atmos. Env.*, vol. 37, pp. 2435–2449, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00201-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00201-2) ↑33, 40
- [9] A. Zali, *et al.*, “Public Member Dose Assessment of Bushehr Nuclear Power Plant Under Normal Operation By Modeling The Fallout From Stack Using The HYSPLIT Atmospheric Dispersion Model”. *J. Env. Radioactiv.*, vol. 171, pp. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.01.025> ↑33, 40, 43
- [10] United States Environmental Protection Agency, *Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models*. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models> ↑33, 37
- [11] K. M. Longo, *et al.*, “The Chemistry CATT-BRAMS Model (CCATT-BRAMS 4.5): a Regional Atmospheric Model System For Integrated Air Quality and Weather Forecasting and Research”. *Geosci. Model Dev.*, vol. 6, pp. 1389-1405, 2013. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1389-2013> ↑33

- [12] Ministerio del Medio Ambiente, *Decreto 948 de 1995 por el cual se reglamenta parcialmente la ley 23 de 1973 en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire*. 1995. [En línea]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/54-dec_0948_1995.pdf ↑33
- [13] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Resolución 601 de 2006 Por la cual se establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. 2006. [En línea]. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19983> ↑33, 38, 43
- [14] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 610 del 2010 por la cual se modifica parcialmente la resolución 601 de 2006*. 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf> ↑33
- [15] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Resolución 909 de 2008 por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. 2008. [En línea]. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resoluci%C3%B3n%20909%20de%202008%20-%20Normas%20y%20estandares%20de%20emisi%C3%B3n%20Fuentes%20fijas.pdf> ↑33, 38
- [16] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Resolución 1541 de 2013 por la cual se establecen niveles permisivos de la calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones*. 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/resoluciones/2013/res_1541_2013.pdf ↑33
- [17] M. Mutahharah, H. Mimi and M. Rozainee, "Health Risk Assessment of Emissions from Acoal-Fired Power Plant Using AERMOD Modelling". *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 5, pp. 476-485, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.05.008> ↑32, 33
- [18] D. Tartakovsky, E. Estern and D.M Broday, "Dispersion of TSP and PM10 Emissions from Quarries in Complex Terrain". *Sci Total Environ*, vol. 15, no. 542A, pp. 946-954, 2015. ↑33, 35, 43, 44
- [19] L. Barreto, L. Uribe y N. Suárez, "Evaluación de la calidad del aire del Valle de Sogamoso, respecto a PM10 aplicando el modelo AERMOD como herramienta de planificación". En *IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública Casap.*, Bogotá D.C., 2013, pp. 71-75 ↑33
- [20] A. Arrieta-Fuentes, "Dispersión de material particulado (pm10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos". *Rev. Ing. Inv. Desarrollo.*, vol. 16, no. 2, pp. 43-54, 2016. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445> ↑33, 40, 41
- [21] J. Huertas et al., "Air Quality Impact Assessment of Multiple Open Pit Coal Mines in Northern Colombia". *J. Env. Manage.*, vol. 93, no. 1, pp. 121-129, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.007> ↑33
- [22] J.W. Cely, W.L. Siabato, A. H. Sánchez y A.P. Rangel, "Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental". *Ingeniería*, vol. 7, no. 2, pp. 31- 38, 2002. ↑33
- [23] C.A. Riveros, M. Melgarejo, A. Riveros y L. Alvarado. "Sistema Difuso Evolutivo para la Predicción del Nivel de Contaminación del Aire por Material Particulado: Caso Puente Aranda (Bogotá)". *Ingeniería*, vol. 17, no. 2, pp. 55 – 62, 2012. ↑33
- [24] A. Rincón and N. Rojas, "Aplicación exploratoria del sistema de modelación CCATT-BRAMS para la región metropolitana de Bogotá: representa- ción preliminar de meteorología y de transporte". En *IV Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública Casap.*, Bogotá D.C., 2013, pp. 962-980. ↑33
- [25] M.A. Rincón, *Simulación regional de contaminantes atmosféricos para la ciudad de Bogotá*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en: www.bdigital.unal.edu.co/51092/1/74189961.2015.pdf ↑33
- [26] University College London and Universidad de los Andes, Marco teórico de contaminación atmosférica en Colombia, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Caracterizaci%C3%B3n-de-la-contaminaci%C3%B3n-atmosf%C3%A9rica-en-Colombia1.pdf> ↑33, 34
- [27] D. García y M.L Chas Amil, "La contaminación de la industria de pasta-papel en Galicia: un análisis de flujos de materiales y energía". *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 18, no. 2, pp. 143-158, 2001. ↑34
- [28] A. Cruz y D.P. Perdomo, *Análisis de la competitividad en el sector industrial del papel, cartón y sus productos en Colombia durante el periodo comprendido entre 1997-2007*. Tesis de pregrado, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 2011. [En línea]. Disponible en:

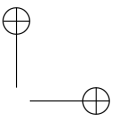
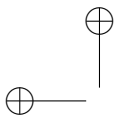
- <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/12488/T10.11%20C889a.pdf?sequence=1> ↑34
- [29] M. Jaramillo, et al., “Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo (Colombia)”. *Ingeniería y desarrollo*, vol. 17, pp. 115-129, 2005. ↑34
- [30] Universidad de los Andes, *Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles*. 2009. [En línea]. Disponible en: <https://uniandes.edu.co/sites/default/files/asset/document/parte-2-inventario.pdf> ↑34
- [31] S. Saha, et al., “The NCEP Climate Forecast System Version 2”. *J. Climate.*, vol. 27, pp 2185 – 2208, 2014 <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1> ↑35
- [32] N. Gopalswami, K. Kakosimos, L.V Echot, T. Olewski, M.S Mannan, “Analysis of Meteorological Parameters for Dense Gas Dispersion Using Mesoscale Models”. *J Loss Prev Process Ind.*, vol. 35, no. 1, pp. 145-156, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.04.009> ↑38, 39, 40, 41, 43, 44
- [33] DAGMA, “Sistema de vigilancia de calidad del aire de Cali–SVCAC”. 2017. http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/38365/sistema_de_vigilancia_de_calidad_del_aire_de_cali_svca/ ↑38
- [34] J. Almorox, “Climatología aplicada a la Ingeniería y Medioambiente”. UNESCO FAO *Clasificación climática Open Course Ware de la Universidad Politécnica de Madrid*. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/clasificacionesclimaticas/unescoFAOclasificacionclimatica.pdf/view?searchterm=unesco> ↑39
- [35] Instituto de Hidrología y Meteorología de Estudios Ambientales, *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual a través de análisis de componentes principales*. 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizaci%C3%B3n+de+la+Precipitaci%C3%B3n+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119> ↑39
- [36] J. Ortega, R. Sbarato and M. Sbarato, *Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmósfera*. Argentina, Encuentro Grupo Editor, Argentina, 2007, pp. 95-130 ↑39, 40
- [37] J. Robledo and B. Chávez, “Distribución de la precipitación en Colombia Analizada mediante conglomeración estadística”. *Cenicafe*, vol. 51, no. 2, pp. 102-113, 2000 ↑39
- [38] M. Kalhor and M. Bajoghli, “Comparison of AERMOD, ADMS and ISC3 for Incomplete Upper Air Meteorological Data (Case Study: Steel plant)”. *Atmos. Pollut. Res.*, in press, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.001> ↑40
- [39] A.H. Sanchez, W.L. Siabato and J.W. Cely, “Modelo de calidad del aire para Bogotá”. *Ingeniería*, vol. 7, no. 1, pp. 65 – 71, 2002. ↑40, 41
- [40] A. Triantafyllou and P. Triantafyllou, “Aspects of atmospheric flow and dispersion of air pollutants in a mountainous basin”. *Sci total environ.*, vol. 297, no. 3, pp. 85-103, 2006. ↑40, 41
- [41] M. Khandadakar and H. Moritomi, “Modeling of Atmospheric Dispersion of Mercury From Coal-Fired Power Plants in Japan”. *Atmos Pollut Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 226-237, 2012. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.025> ↑41, 43

Oscar Andrés Vidal Daza

Cali, Colombia. Químico, Universidad Santiago de Cali. Grupo de investigación GIEMA. Facultad de Ciencias Básicas - Universidad Santiago de Cali. Cali, Colombia.
Correo electrónico: oscarvidal75@hotmail.com

Andrea Pérez Vidal

Ingeniera Sanitaria, Universidad del Valle; magíster y doctora en Ingeniería con énfasis en Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle; docente dedicación exclusiva, grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica, Industrial y Ambiental (GIEIAM). Universidad Santiago de Cali. Facultad de Ingeniería. Cali, Colombia.
Correo electrónico: andrea.perez00@usc.edu.co



Warehouse Sizing based on Material Requirements Planning for a Polyurethane Coating Factory

Dimensionamiento de Almacén a partir de la Planificación de Requerimiento de Materiales en una Fábrica de Revestimiento de Poliuretano

Andrés Mauricio Hualpa Z.¹, Carolina Suárez R.²

¹Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. ²Universidad Cooperativa de Colombia. Sede Bogotá.
Correspondence: amhualpa@unisalle.edu.co, carolina.suarez@campusucc.edu.co

Recibido: 05/04/2017. Modificado: 20/10/2017. Aceptado: 10/11/2017.

Abstract

Context: The design of the warehouse is a key factor in the configuration of logistics systems, as it can facilitate the timely management of materials, intermediate and/or final products, improving the time, cost and levels of customer service. To achieve this, experts help is required to integrate within the design an appropriate combination of storage, manipulation of materials and selection of orders. This level of integration, however, has not yet been achieved since the advances in the subject have been addressed from different aspects of the storage problem, but independently.

Method: The article presents a method for warehouse layout design in two phases. The first phase defines the variables and parameters that are obtained from the planning of the production; the second phase consists of five stages that culminate in the integral design of the warehouse. In this last phase a modified version of an existing mathematical model of sizing is applied, where a new equation is added.

Results: The method is applied to a company that supplies liquid polyurethane in the construction sector. The design generates four options for configuration of shipping and receiving docks and five storage options, where the best option generates an average area, mean real capacity and percentage average of storage utilization of 374,8 m², 360 pallet and 93,8 % respectively. These results are coherent with the dynamics of the company.

Conclusions: The method allows evaluating options of the flow configuration and their respective sizing than may influence decisions of great importance in the operational capacity of the company in the short, medium and long term. In the future research is interesting to include new conditions, for example the compatibility of the method with different distributions to the traditional configuration of parallel shelves.

Acknowledgements: The authors would like to thank the anonymous reviewers and editor for their insightful suggestions so as to improve the quality of the initial draft of the paper.

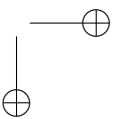
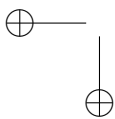
Keywords: Material requirements planning, warehouse layout, warehouse sizing.

Language: Spanish



Cite this work as: C. Suárez, A. M. Hualpa, "Warehouse Sizing based on Material Requirements Planning for a Polyurethane Coating Factory", Ingeniería, vol. 23, no. 1, pp. 48-69, 2018.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.11825>



Resumen

Contexto: El diseño del almacén es un factor clave en la configuración de los sistemas logísticos, pues facilita la gestión oportuna de materiales, productos intermedios o finales, mejorando el tiempo, costo y nivel de servicio al cliente. Para lograrlo se requiere el apoyo de expertos que integren en el diseño una combinación apropiada de almacenamiento, manipulación de materiales y selección de pedidos; sin embargo, tal nivel de integración aún no se ha logrado ya que los avances en el tema han sido abordados desde diferentes aspectos del dimensionamiento y de manera independiente.

Método: Se presenta un método de dimensionamiento de almacenes compuesto de dos fases. En la primera se definen variables y parámetros que son obtenidos a partir del proceso de planeación de la producción; en la segunda, se desarrollan cinco etapas que culminan con el diseño integral del almacén, en la cual se aplica un modelo matemático de dimensionamiento existente que incorpora una nueva ecuación.

Resultados: El método de dimensionamiento de almacenes se aplica a una empresa que abastece poliuretano líquido en el sector de la construcción. Se generan cuatro opciones de configuración de muelles de recepción-envío y cinco opciones de almacenamiento; la mejor opción genera un área promedio, capacidad real promedio y porcentaje de utilización promedio de almacenamiento de 374,8 m², 360 pallet y 93,8 % respectivamente, siendo estos resultados acordes con la dinámica de la empresa.

Conclusiones: El método es funcional en la organización, puesto que permite evaluar opciones de configuración de flujo y su respectivo dimensionamiento, los cuales pueden influir en decisiones de gran importancia, por ejemplo, en determinar la capacidad operativa de la empresa a corto, mediano y largo plazo. Igualmente, para futuras investigaciones es de interés estudiar nuevas condiciones como es la compatibilidad del método propuesto con distribuciones diferentes a la configuración tradicional de estanterías paralelas.

Palabras clave: Dimensionamiento de almacenes, plan de requerimiento de materiales.

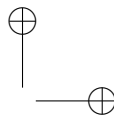
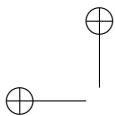
Agradecimientos: Los autores agradecen a los revisores anónimos y al editor por sus sugerencias que permitieron mejorar la calidad del artículo.

Idioma: Español

1. Introducción

El diseño del almacén es un factor clave en la configuración de los sistemas logísticos, ya que promueve la gestión oportuna de materiales, productos intermedios o finales, los cuales a su vez permiten mejorar el tiempo, costo y nivel de servicio al cliente. Por lo tanto, uno de los objetivos de la gestión del almacén es hacer más eficientes los procesos logísticos, pues la edificación de un nuevo centro de almacenamiento requiere de una alta inversión; por esta razón, un almacén que presente la máxima utilización de los espacios, flujos de materiales claros y rápidos puede proporcionar un capital menos exigente. Además, una combinación apropiada de almacenamiento, manipulación de materiales y selección de pedidos puede reducir los tiempos de ciclo, aumentar la visibilidad del inventario y reducir los costos de su mantenimiento [1].

Asimismo, el diseño del almacén es un proceso complejo, requiere de expertos que ayuden a definir métodos para organizar e integrar su configuración. Es claro que este nivel de integración aún no existe, ya que los avances en el tema han sido orientados a resolver aspectos de diseño de almacenes de manera independiente; se requiere entonces una metodología ingenieril integrada que

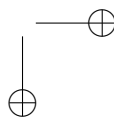
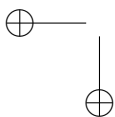


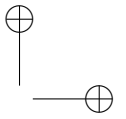
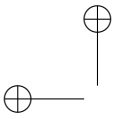
incorpore y de soporte a todas las decisiones de diseño [2]. Un ejemplo claro de lo anterior tiene que ver con los problemas que se presentan en la planeación de la producción, estos se analizan de forma aislada del almacenamiento, siendo este último un proceso final en el sistema de fabricación; una mejora en la utilización de este espacio puede aumentar los niveles de producción. De esta forma, la falta de coordinación entre la planificación de la producción y la gestión del almacén conduce a una ineficiencia significativa [3]. El proceso de almacenamiento no solo es importante en el sistema de fabricación sino en toda la gestión de la cadena de suministro, ya que refleja un vínculo entre el productor y el cliente en el cual las empresas se comprometen a entregar productos en el menor tiempo, siempre y cuando se tenga un número mínimo de existencias; además, permite manejar las cantidades cambiantes y decrecientes de la demanda, siendo esta una característica del día a día de las organizaciones [4].

Del mismo modo, el diseño del almacén se define en cinco grandes decisiones, a saber: la estructura, el dimensionamiento, el diseño interno, la selección de equipos y las estrategias operacionales en las que intervienen políticas de producción en términos de abastecimiento de material [5]. Sin embargo, varios expertos consideran que uno de los elementos críticos en esta etapa de diseño es determinar el dimensionamiento del almacén, debido a que una vez sea definido, se tiene una condición o restricción en las posibles configuraciones que se puedan efectuar posteriormente, es decir, en el caso de incrementar el flujo de materiales, se pueden presentar limitaciones de espacio para recepción, almacenamiento o despacho de materiales, restringiendo las operaciones normales de un centro de distribución, así como las actividades del área de producción. De acuerdo con lo anterior, se puede identificar la importancia que tienen los parámetros de ubicación y dimensionamiento en el diseño de almacenes [6]; es por ello por lo que se han desarrollado herramientas tecnológicas como *Inventory Replenishment Expert System* (IRES), el cual se enfoca en determinar la capacidad que debe tener un almacén de acuerdo con el nivel de servicio que desearía alcanzar [7]. A la vez, se resalta la importancia de que el dimensionamiento no puede ser trabajado en forma aislada, sino que debe integrarse a las funciones logísticas de la cadena.

En la literatura se encuentran diversos avances en el diseño del almacén, en [2] se presenta una metodología jerárquica de diseño, siendo un método poco explorado en esta área de conocimiento; la metodología consiste en la descomposición del problema en la que se aplica un modelo formal que integra las soluciones de estos subproblemas en un espacio de búsqueda exhaustiva. Igualmente, en el artículo [8] se proporciona un conjunto de directrices para llegar a una “buena” configuración de diseño para un almacén, para ello, se emplea una metodología basada en estadística y modelos analíticos, definiendo como variable de respuesta el número de horas de trabajo por cada uno de los diseños; de la misma manera, se postula que el almacén implica dos conjuntos de valores.

Teniendo en cuenta lo anterior, el primer conjunto describe los parámetros que se fijan para un determinado problema del almacén, estos parámetros se refieren a características como el número requerido de ubicaciones de pallets, el número de referencia (SKU), los requisitos de rendimiento, entre otros; en cambio, el segundo conjunto son valores asociados con las opciones de diseño, haciendo referencia a variables de decisión como la forma del área del almacén, la configuración de la puerta del muelle, la disposición del área frontal y el tamaño. También se proporciona un método que genera un diseño tridimensional bajo una disposición en forma de espina de pescado; este método toma la capacidad de almacenamiento deseada e informa la ubicación en los ejes X-Y-Z a



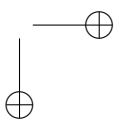
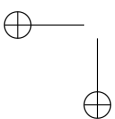


un costo total mínimo. Además, se determina como característica principal de diseño la distancia de viaje, logrando hasta un 20 % de reducción en comparación con los esquemas tradicionales para almacén de carga unitaria [9]. De igual modo, en [10] se propone un diseño del almacén que mejora el proceso de búsqueda y selección de productos, además de aumentar la utilización del espacio; en este diseño se aplica la clasificación del sistema ABC en los pedidos y la técnica de programación lineal, de tal manera que determina nuevas localizaciones para los productos. Es claro que las decisiones de disposición del almacén tales como altura, profundidad del carril, ancho, ubicación de pasillo, entre otros, son importantes, ya que afectan tanto al capital de inversión como los costos operacionales.

En [11] se presenta un modelo matemático apoyado con un algoritmo que decide cuatro de las decisiones más importantes en el diseño de un sistema de estanterías de almacén, las cuales corresponden a la profundidad del carril, número de niveles de almacenamiento, profundidad lateral y ancho longitudinal. Por otra parte, se observan estudios aplicados al proceso de abastecimiento relacionados con el dimensionamiento de lote; por ejemplo, en [12] se explora el concepto de dimensionamiento de lotes en el contexto de la gestión de almacenes, ya que el problema de programación de tamaño de lote se ha centrado principalmente en la unidad de producción, razón por la cual el propósito es decidir el tamaño efectivo de lote que cumpla con las fechas de vencimiento, mientras que transfiere el producto desde el fabricante hasta el minorista a través del almacén. En este problema de dimensionamiento de lotes, el modelamiento utilizado para dar solución eficaz es el algoritmo de recocido simulado rápido (CBFSA), basado en restricciones donde los resultados demuestran la eficacia y la superioridad sobre otros enfoques (GA y SA).

Por su parte, en [13] se presenta un modelo de tamaño de lote dinámico de dos escalones con ventanas de tiempo de entrega, penalizaciones y limitaciones de capacidad en el espacio de almacén, en el que se aplica un algoritmo polinomial que reporta una solución óptima, esta incluye el plan de reposición y el plan de despacho. Este modelo es validado en la industria de la computación donde la capacidad de almacenamiento es limitada, siendo una restricción que debe considerarse explícitamente por la naturaleza de los productos terminados, pues son de alto valor económico. En cambio, los autores del artículo [3] proponen una estrategia que combina el problema de tamaño de lote capacitado con la disposición del almacén, esto con el fin de que el proceso de producción y el almacenamiento se puedan coordinar eficazmente; sin embargo, el problema de la disposición del almacén y del tamaño de los lotes capacitados ha sido abordado por separado en la literatura actual y no han sido considerados juntos en un modelo matemático, es por esta razón que el autor presenta un modelo que no solo combina un problema sobre asignación de ubicación de almacenamiento con un inventario dinámico, sino que también tiene en cuenta la planificación de la producción.

Otros estudios se han orientado a problemas como la reposición de múltiples productos para satisfacer demandas dinámicas cuando la capacidad del almacén es limitada, razón por la cual la sincronización ha de ser escalonado entre la reposición de los tamaños de los lotes y la capacidad, en la que es necesario proporcionar un espacio efectivo compartido [14]. Del mismo modo, se estudia un modelo integrado que busca resolver el problema sobre el número y ubicaciones de los almacenes a abrir, el tamaño de cada almacén que se edificará para satisfacer un nivel de servicio predeterminado, así como el flujo de producto a través de los almacenes abiertos con el objetivo de minimizar los costos totales (transporte, construcción fijos y variables del almacén), donde los re-



sultados muestran que cuando el número de flujo de demanda es pequeño, es mejor usar el enfoque continuo de la variable tamaño del almacén porque presenta una menor brecha de error. En cambio, si el flujo de demanda es grande se recomienda usar el enfoque discreto de la variable tamaño, pues tarda menos tiempo y genera una solución satisfactoria [15].

En el artículo [4] se sugieren modelos que minimicen la distancia total de recorrido de los recolectores en almacenes tipo flujo (*I-Shaped*) y tipo U (*U-Shaped*) para determinar su tamaño, donde el número de muelles es la primera etapa del diseño del almacén al ser uno de los factores que más afectan la distancia media de viaje del selector y el tráfico de entrada y salida de los camiones; por lo tanto, se determinan los tamaños del almacén de acuerdo con los números de muelles (receptores y embarque) para cada tipo de almacén. Además, en el artículo [16] se caracteriza el proceso de almacén presentando un enfoque para seleccionar la estrategia de almacenamiento, ya que esta depende de factores técnicos y organizacionales como es el tipo de tareas básicas, la estructura y el tamaño de las órdenes de los clientes, los costos de manipulación de los materiales, disponibilidad de espacio de almacenamiento, recursos laborales, entre otros.

De manera específica, en la literatura se puede encontrar el diseño de un algoritmo aplicado en el dimensionamiento de almacenes, el cual permite asignar áreas de almacenamiento de manera dinámica en empresas dedicadas a la construcción de instalaciones residenciales. Esta propuesta se desarrolló con el propósito de disminuir el grado de informalidad que tiene este sector [17]. En el artículo [18] se expresa que la mayor parte de la literatura se centra en los almacenes tradicionales, donde el foco principal está en el almacenamiento de productos y la recogida; sin embargo, al operar sistemas de distribución recientes como es el *cross-docking*, se requieren nuevos enfoques para planificar el diseño interno del almacén, es por esta razón que el artículo propone un enfoque de programación matemática, basado en una formulación mínimo-máximo, la cual devuelve el diseño optimizado de un almacén de *cross-docking* que alimenta una operación de distribución *just-in-time*.

De acuerdo con lo anterior, se ha identificado que la gestión del almacén ha sido objeto de investigación por más de dos décadas, durante estas se han obtenido resultados asociados a la aplicación y modelamiento de técnicas cuantitativas, específicamente métodos analíticos, heurísticos, metaheurísticos, simulación discreta o continua y el diseño de experimentos [19]; sin embargo, se identifica que el tema de dimensionamiento como tal es una de las áreas de conocimiento que ha presentado menos investigaciones y que, hasta el momento, no se cuenta con un método de dimensionamiento de almacenes a partir del plan de requerimiento de materiales.

En la Tabla I se presentan algunos aportes y avances relevantes que están relacionados con el dimensionamiento de almacenes.

Varios han sido los estudios desarrollados en el tema gestión de almacenes, donde la aplicación de herramientas cuantitativas como alternativa de solución ha cobrado gran importancia en los últimos años. La programación lineal es uno de los modelamientos más utilizados para establecer el tamaño del almacén, se han encontrado estudios que definen como función objetivo la minimización de costos de operación, almacenamiento, manejo de materiales, entre otros (Tabla I). Asimismo, el dimensionamiento del almacén tiende a ser flexible debido a la dinámica que puede

Tabla I. Avances en el dimensionamiento de almacenes.

Autor(es)	Método	Variables	Resultados	Año
Ballou [20]	Programación lineal	Costo total de manejo de materiales	Dimensionamiento de almacén paletizado bajo escenarios de renta de espacio.	1963
Hung y Fisk [21]	Programación lineal	Comportamientos estacionales de demanda y restricciones de espacio	Dimensionamiento de almacén estático	1984
Cormier y Gunn [22]	Programación lineal	Costo de almacenamiento	Revisión de modelos de asignación de capacidad de almacenamiento en espacio público o privado	1992
Larson, March y Kusiak [23]	Heurística	Disposición de espacio, asignación de material	Modelo de disposición de espacio con reducción de distancia de manejo de materiales	1997
Rao y Rao [24]	Programación dinámica	Costos variables, economías de escala	Dimensionamiento de almacén dinámico	1998
Ghiani, Laporte y Musmano [25]	Modelo matemático basado en geometría	Flujo de material, ancho lateral y central, dimensión unidad de carga	Dimensionamiento de almacén estático sin restricciones de capacidad	2004
Hsieh y Tsai [26]	Herramienta computacional	Índice de rendimiento óptimo, cantidad de pasillos transversales, distancia de recogida de pedidos	Modelo de dimensionamiento y distribución interna del almacén a partir del rendimiento del sistema de preparación de pedidos	2006
Thornton, Francis y Loue [27]	Algoritmo basado en geometría	Área, uso relativo de instalaciones	Modelo de dimensionamiento y distribución rectangular	2007
Muppani y Adil [28]	Programación entera no lineal (Algoritmo <i>Branch and Bound</i>)	Costos de manipulación de materiales (Almacenamiento y preparación de pedidos)	Ubicación de materiales para efectos de reducción de área de almacenamiento	2008
Liong y Loo [29]	Simulación	Tiempo de carga y descarga	Modelo de secuenciación de proceso de carga y descarga de camión como parámetro de dimensionamiento de zona de carga y descarga	2009
Huang, Wang, Batta y Nagi [30]	Programación lineal entera mixta	Costo total de operación de almacenamiento	Determinación de espacio de almacenamiento de acuerdo con nivel de servicio deseado	2015
Zhang, Nishi, Turner, Oga y Li [31]	Programación lineal entera mixta	Costo total de operaciones de producción y almacenamiento	Modelo de optimización integrada que minimiza el costo total de operaciones de producción y almacenamiento	2016

presentar el flujo de materiales, esto hace que las propuestas investigativas estén clasificadas en diseños estáticos, dinámicos y mixtos, debido a que las condiciones de flujo de material hacen que el tamaño de un almacén requiera flexibilidad en su dimensionamiento. En este orden de ideas, la configuración de flujo de material se considera como un parámetro para tener en cuenta en el diseño del almacén, puesto que establece la ubicación de los muelles de recepción y distribución. Existen tres configuraciones genéricas de flujo: *I-Shaped (flow-type)*, *U-Shaped* y *L-Shaped* [32], en la Figura 1 se presentan las características de cada tipo de configuración de flujo en un almacén.

En la Figura 1 se identifica que en las configuraciones *I-Shaped*, *U-Shaped* (a) y *L-Shaped*, las operaciones de recepción y envío se realizan en muelles independientes; en este caso, el proceso

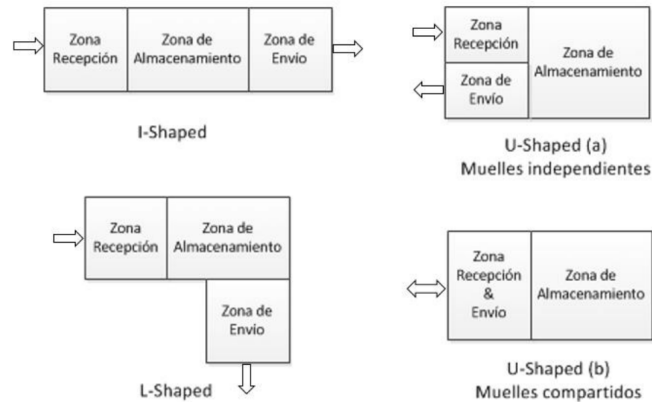


Figura 1. Configuraciones de flujo de material para diseño de almacenes.

de dimensionamiento de las zonas de recepción y envío se realiza de manera individual calculando el número de muelles para cada operación respectiva [4]. Por lo contrario, en la configuración *U-Shaped* (b) el cálculo de muelles se realiza de manera integrada, es decir, se generaliza a un solo movimiento promedio de material que se recibe y envía.

De acuerdo con las anteriores referencias, se han presentado estudios que consideran la reubicación de materiales, la capacidad de equipos para manipulación de material, la capacidad de almacenamiento, la política de inventario, la dimensión de unidades de carga, el costo operativo, disponibilidad de espacio, entre otros; por lo anterior, el propósito de este artículo es brindar un método que facilite el dimensionamiento del almacén desde un enfoque integral, siendo una decisión estratégica y operativa que trasciende a corto, mediano y largo plazo los procesos de abastecimiento de la organización, asimismo, puede ser empleado para evaluar y proyectar nuevas políticas tanto en almacenes nuevos como en lo que se encuentran construidos.

2. Método para el dimensionamiento del almacén

El método de dimensionamiento del almacén propuesto (Figura 2) consta de dos fases. En la primera fase se observa la integración de dos grandes áreas operacionales de la organización: el área de producción y el área de almacenamiento. Es necesario contar con una continua retroalimentación para lograr una sincronización en el flujo de material, asimismo, suministrar información de variables y parámetros que se requieren para el desarrollo del método que se está presentando.

2.1. Fase I identificación de variables y parámetros

La primera fase del método propuesto tiene el objeto de recolectar la información necesaria de las variables y parámetros en el dimensionamiento del almacén; en este caso, los datos de entrada se agrupan en dos categorías principales que son los obtenidos a partir del proceso de planeación de la producción y los requeridos por el modelo de dimensionamiento de almacenes. Las características de cada categoría de datos se describen a continuación.

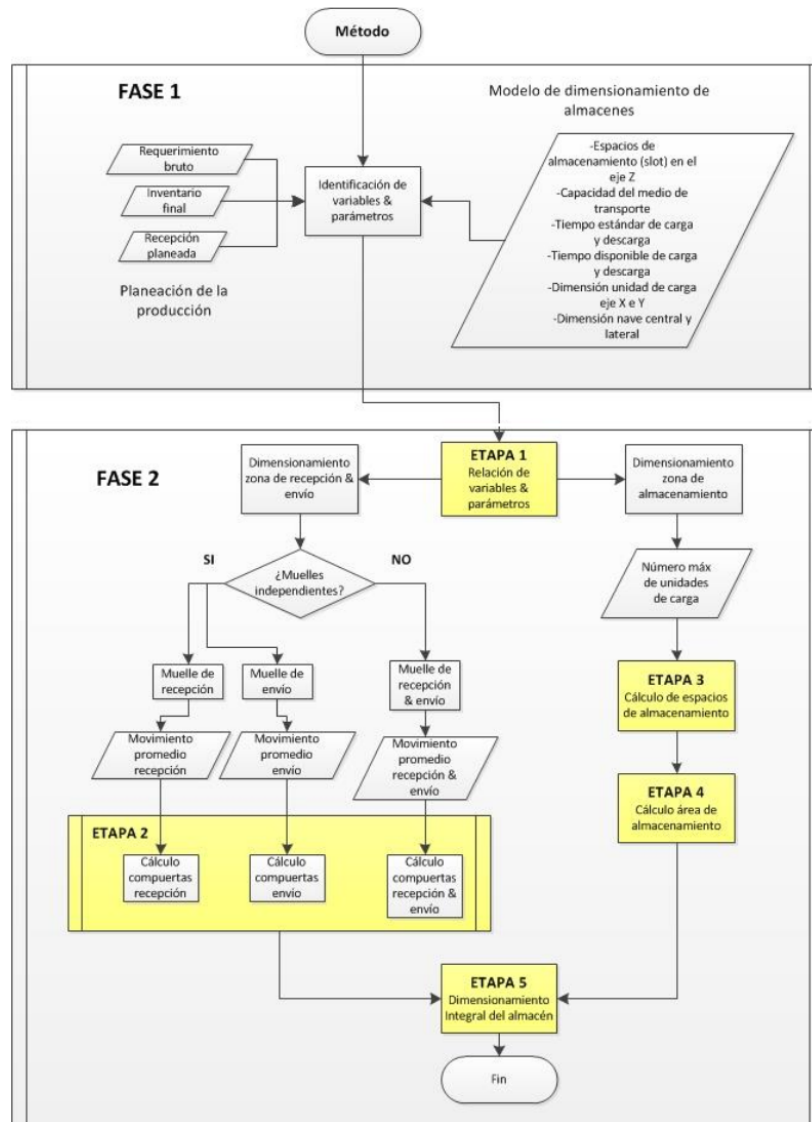


Figura 2. Método de dimensionamiento del almacén.

2.1.1. Variables y parámetros generados por el plan de producción

En el caso del primer grupo de datos, el plan de requerimiento de materiales (MRP) juega un papel muy importante para caracterizar los flujos de abastecimiento (entradas y salidas del sistema). De acuerdo con la literatura, el MRP se convirtió en un destacado enfoque para el manejo del flujo de materias primas y componentes en el proceso de fabricación en el siglo XX, que con la ayuda

de los avances tecnológicos mejoró la toma de decisiones en la gestión de los materiales [19]. El funcionamiento del MRP consiste en la identificación de variables tal como requerimiento bruto, el inventario inicial, el *stock* seguridad, las necesidades netas, la liberación de órdenes planificadas y la recepción de estas [20]; previamente, el plan maestro de producción (MPS) determina la cantidad de productos finales que se pueden fabricar, convirtiéndose en un requerimiento bruto del MRP, además de las restricciones de capacidad del sistema [33]. Esta proyección de unidades de producto es un insumo para realizar la explosión del MRP, en el cual se establecen los programas de reabastecimiento para todos los subconjuntos, componentes y materias primas que integran un producto terminado [34]. Es claro que a partir del proceso de planificación de la producción se obtienen múltiples ventajas en una organización, pues permite una mayor flexibilidad a cambios del entorno, a la vez incrementa la satisfacción del cliente y reduce los niveles de inventario [35].

2.1.2. Variables y parámetros necesarios para el modelo de dimensionamiento del almacén

En el caso del segundo grupo de datos, entre los diferentes modelos y técnicas de dimensionamiento identificados en la literatura se destaca el aporte de Ghiani, Laporte y Musmano [25], siendo uno de los referentes teóricos más importantes que se tienen en cuenta en el diseño del método de dimensionamiento. La Tabla II y la Tabla III relacionan los parámetros y variables que utiliza el modelo de dimensionamiento.

En la ecuación (1) se presenta el modelo inicial que permite dimensionar el número de com-

puertas que integran la zona de recepción o envío; esta ecuación contempla el movimiento promedio de materiales que es definido desde el proceso de planeación de la producción, a la vez considera parámetros previamente determinados por la organización como es el tiempo de carga y descarga del medio de transporte, la capacidad de transporte y el tiempo disponible de servicio en la zona de recepción. En la tabla II se presentan las variables de las que este modelo depende.

$$nD = \frac{dt}{qT} \quad (1)$$

Tabla II. Variables del modelo de dimensionamiento para recepción y envío (1).

Notación

En donde:

nD = Número de compuertas de la zona de recepción.

d = Movimiento promedio de materiales.

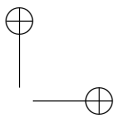
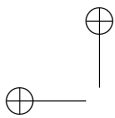
t = Tiempo de carga y descarga del medio de transporte.

q = Capacidad del medio de transporte.

T = Tiempo disponible de servicio en la zona de recepción.

Fuente: [11], [25].

A continuación se presentan las ecuaciones que permiten calcular el número de espacios de almacenamiento (ecuaciones (2) y (3)) para determinar la distancia del almacén sobre el eje X (ancho) y sobre el eje Y (largo), con los cuales se puede obtener a su vez el área del almacén en la que incluye el área de pasillos para el desplazamiento del material. Los parámetros que integran este conjunto de ecuaciones contemplan el tamaño de la unidad de carga, el espacio entre pasillos de acuerdo con el equipo de alistamiento de pedidos y los niveles de altura en relación con el tipo de estantería a utilizar. Los parámetros del modelo se presentan en la Tabla III.

**Tabla III.** Parámetros del modelo de dimensionamiento para zona de almacenamiento (2, 3, 4, 5).

Notación
m = Número de unidades de carga máximo
$\alpha x ; \alpha y$ = Ocupación de área de la unidad de carga en el eje x e y
nz = Número de espacios de almacenamiento en el eje z
nx = Número de espacios de almacenamiento en el eje x
ny = Número de espacios de almacenamiento en el eje y
Wx = Anchura de la nave lateral
Wy = Anchura de la nave central
Lx = Distancia del almacén sobre el eje x (ancho)
Ly = Distancia del almacén sobre el eje y (largo)

Fuente: [11], [25].

$$nx = \sqrt{\frac{m\alpha y}{2nz(\alpha x + \frac{1}{2}\omega x)}} \quad (2)$$

$$Lx = \left(\alpha x + \frac{1}{2}\omega x\right) nx \quad (4)$$

$$ny = \sqrt{\frac{2m(\alpha x + \frac{1}{2}\omega x)}{\alpha ynz}} \quad (3)$$

$$Ly = (\alpha y ny) + \omega y \quad (5)$$

Al momento de diseñar el plano arquitectónico del almacén, se puede presentar la situación de que los resultados calculados mediante las ecuaciones anteriores no coincidan con las respectivas cotas del plano, es decir, si el resultado del cálculo de número de espacios de almacenamiento en el eje X (nx) es un número par, las dimensiones de la cota y la distancia calculada del almacén sobre el eje X (Lx) van a coincidir. En el caso contrario, donde el resultado nx es un número impar, se modifica la ecuación (4) a la expresión matemática que se relaciona en la ecuación (6).

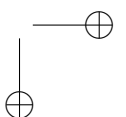
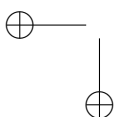
$$Lx = \left(\alpha x + \frac{1}{2}\omega x\right) nx + \frac{1}{2}\omega x \quad (6)$$

Por lo anterior, se indica que la ecuación (6) se aplica siempre y cuando el valor de nx sea un número impar, razón por la cual se presentan una adecuación a la técnica de dimensionamiento original.

2.2. Fase II dimensionamiento integral del almacén

La segunda fase del método de dimensionamiento está compuesta a su vez por cinco etapas que culminan en el dimensionamiento integral del almacén, en las que se integran los datos obtenidos durante la fase anterior. Las características de cada una de las etapas se presentan a continuación.

La primera etapa “relación de variables y parámetros” considera la información recolectada en la primera fase para identificar los datos de entrada que son necesarios en el modelo de dimensionamiento, específicamente el inventario registrado en el MRP es una variable de entrada que determina la cantidad de unidades que se almacena a lo largo de un periodo; posterior a esto, se



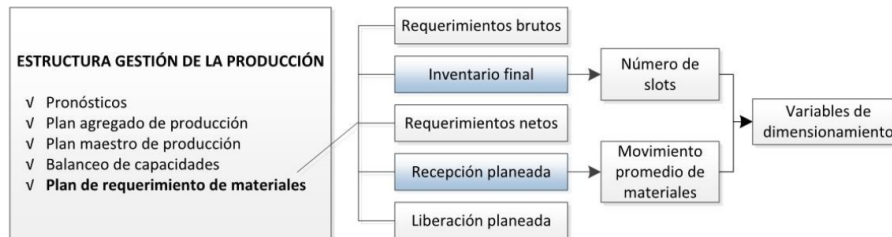


Figura 3. Relación entre las variables MRP y dimensionamiento de almacenes.

aplica un factor de conversión para calcular el número de espacios (*slots*) necesarios para el almacenaje, en el que es necesario contemplar restricciones de disponibilidad de áreas en la zona de almacenamiento y las dimensiones de las unidades de carga (longitud, ancho y alto). Asimismo, el requerimiento bruto como la recepción planeada son variables que determinan el movimiento promedio de materiales en el muelle de carga y descarga (plataforma), que, junto con las características técnicas del medio de transporte (capacidad y tiempo), determina el número de compuertas requeridas en la zona de recepción del almacén. La relación de variables entre el plan de requerimiento de materiales y el modelo de dimensionamiento del almacén se presenta en la Figura 3.

Luego de haber realizado la primera etapa, se puede desarrollar de manera conjunta la segunda y tercera dado que son independientes.

La segunda etapa “cálculo de compuertas de recepción y envío”, mediante la aplicación de la ecuación (1), determina las características dimensionales de los muelles de carga y descarga (Tabla II); los parámetros que intervienen en esta etapa son capacidad del medio de transporte, tiempo estándar de carga y descarga y los tiempos disponibles para estas operaciones que normalmente son definidos bajo las condiciones logísticas de la empresa. La tercera etapa “cálculo de espacios de almacenamiento”, mediante la aplicación de las ecuaciones (2) y (3), determina el número de slots en el eje X y Y (Tabla III), donde el número máximo de unidades de carga es una variable de entrada. Los parámetros que intervienen en esta etapa son de tipo estantería, dimensiones de la unidad de carga y dimensiones para la nave central y lateral del almacén. La cuarta etapa “cálculo área de almacenamiento”, utilizando las ecuaciones (4), (5) o (6), determina la distancia del almacén en el eje X y Y (Tabla III). Una vez calculada la distancia, se obtiene el área del almacén mediante el producto de los dos resultados anteriormente calculados. Finalmente, en la quinta etapa “dimensionamiento integral del almacén” se reúnen los resultados obtenidos en la segunda y cuarta etapa para agrupar en un área general el dimensionamiento del almacén.

3. Resultados del caso de aplicación de método de dimensionamiento

El método de dimensionamiento se aplicó a una empresa que abastece poliuretano líquido en sector de construcción con productos para acabados internos y sellantes. Los componentes de este producto se almacenan en diferentes presentaciones de acuerdo con las condiciones de abastecimiento (Figura 4). Es relevante mencionar que, por tema de confidencialidad de la organización, no

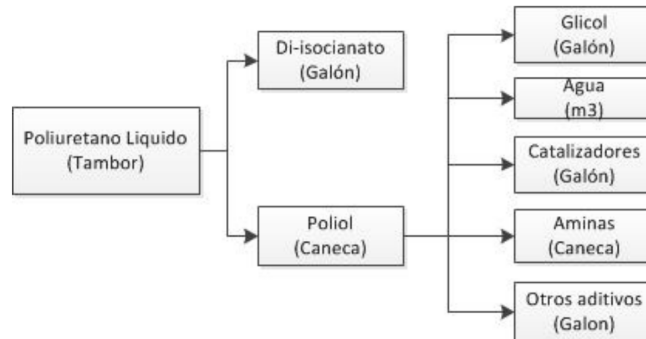


Figura 4. Presentaciones de poliuretano y sus componentes.

se presentan datos específicos relacionados con el sistema de fabricación (mezcla y dosificación) de los componentes.

Para la aplicación del método de dimensionamiento de almacenes se desarrolló cada fase y etapas anteriormente presentadas. Los resultados se presentan a continuación.

3.1. Fase 1: identificación de variables y parámetros

Para la identificación de variables se desarrolló un aplicativo computacional en el que se diseñaron tres módulos de información: pronóstico, plan maestro de producción y plan de requerimiento de materiales. De acuerdo con lo anterior, en el módulo de pronósticos se analizaron los datos de ventas de los dos años anteriores comparando diferentes modelos de proyección. Se identificó que el modelo que más se ajusta al comportamiento de la demanda es la regresión lineal con estacionalidad. Asimismo, en el módulo de plan maestro de producción se registraron los niveles de fabricación para doce meses, se tomó en cuenta el pronóstico en cada periodo y las políticas de inventario de producto final. En el módulo de plan de requerimiento de materiales, se ingresaron los resultados del plan maestro de producción y se tuvo en cuenta la estructura de fabricación de productos finales, las políticas de inventario de materia prima (*stock* de seguridad) y tamaños de lote. En la Tabla IV se presentan los resultados finales del MRP de las variables requerimiento bruto, inventario final, recepción planeada para el producto terminado y algunas materias primas, las cuales determinan el plan de recepción y almacenamiento en todos los componentes, así como la respectiva distribución para el producto terminado.

Tabla IV. Variables generadas por el plan de requerimiento de materiales.

Poliuretano líquido (tambores)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Requerimiento bruto	900	1.200	450	600	300	1.350	1.350	1.050	600	300	600	450
Inventario Final	400	300	150	750	150	900	600	300	300	750	450	900
Glicol (Galones)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inventario Final	3000	841	841	262	682	103	523	944	944	364	364	364
Recepción Planeada	0	0	2000	3000	2000	3000	3000	0	2000	0	0	0
Aminas (Canecas)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Inventario Final	400	185	185	127	69	11	153	95	95	37	37	37
Recepción Planeada	0	0	200	200	200	400	200	0	200	0	0	0

Adicionalmente, la empresa presentó las siguientes especificaciones para la definición de los parámetros del modelo de dimensionamiento (Tabla V).

Tabla V. Especificaciones de entrada para el método de dimensionamiento.

Notación	Variable o parámetro	Indicador	Descripción
T	Tiempo de carga y descarga del medio de transporte	0,25 horas	El tiempo estándar de carga y descarga es de quince minutos por camión.
Q	Capacidad del medio de transporte.	4 pallet	Para el proceso de abastecimiento de los materiales de la empresa se utiliza camiones pequeños.
T	Tiempo disponible de servicio en la zona de recepción.	30 horas	El tiempo planeado de atención para la zona de carga y descarga del almacén es de 30 horas por periodo.
$\alpha x - \alpha y$	Ocupación de área de la unidad de carga en el eje X e Y	1,2 metros-1,0 metros	Los proveedores de materia prima realizan el abastecimiento bajo la unidad de carga estándar Isopallet
Nz	Número de espacios de almacenamiento en el eje z (<i>slots</i>)	3-5 <i>slot</i>	Para el almacenamiento se cuenta con estanterías metálicas de tres a cinco niveles
Wx	Ancho de la nave lateral	2,7 metros	El equipo para utilizar es un montacargas Hyster de horquilla con radio de giro de dos metros. Adicionalmente 0,7 metros de distancia de separación (área de seguridad) de acuerdo con lo que está definido en su respectiva ficha técnica.
Wy	Ancho de la nave central	5,4 metros	Se especifica que la nave central debe tener dos carriles de circulación, siendo el doble de la dimensión de la nave lateral.

Algunos materiales están definidos en unidades de tambor, caneca y galón, cambiando sus empaques como unidades de carga para el almacenamiento; sin embargo, es necesario agrupar estas unidades de carga a pallet para calcular una dimensión general para el almacén. Estos materiales se almacenan manteniendo la relación cuatro tambores/pallet, 36 canecas/pallet y 180 galones/pallet.

3.2. Fase 2: relación de variables y parámetros (etapa 1)

De acuerdo con el método propuesto, la segunda fase se subdivide en cinco etapas. En la primera etapa se totalizaron las diferentes unidades en recepción planeada por cada producto y materiales, para obtener equivalencia a Isopallet como unidad de carga; para este caso, el movimiento promedio de materiales se caracteriza por recibir canecas y galones los cuales se unificarán a pallets. Esta conversión se presenta en la Tabla VI.

Tabla VI. Movimiento promedio de recepción de materiales como resultado del MRP.

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Total Canecas	8200	6.477	1.800	9.540	9.540	10.140	9.540	7.740	1.800	7.740	0	0
Subtotal Pallet	228	180	50	265	265	282	265	215	50	215	0	0
Total galones	31000	30.000	27.000	60.000	27.000	60.000	63.000	0	24.000	30.000	0	0
Subtotal Pallet	173	167	150	334	150	334	350	0	134	167	0	0
Total Pallet	401	347	200	599	415	616	615	215	184	382	0	0

A partir del total de pallet, se calculó el promedio mensual de materiales que ingresan al almacén, que en este caso es de 397 pallet. Los periodos 11 y 12 no se tienen en cuenta ya que registran valor igual a cero, esto hace determinar que en estos periodos el muelle de recepción no es necesario y, por lo tanto, estará cerrado. El resultado es considerado como variable de entrada para el cálculo de número de compuertas de recepción. El procedimiento de totalizar pallets de acuerdo con el factor de equivalencia y obtener el respectivo promedio también se aplica para los datos registrados de requerimiento bruto del producto terminado, dado que este será el promedio de materiales que se enviarán por periodo. Esta conversión se presenta en la Tabla VII.

Tabla VII. Movimiento promedio de distribución de materiales como resultado del MRP.

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Total Tambores	900	1.200	450	600	300	1.350	1.350	1.050	600	300	600	450
Total Pallet	225	300	113	150	75	338	338	263	150	75	150	113

A partir del total de pallet se calculó el promedio mensual de materiales que se envían desde el almacén, que en este caso es de 191 pallet. Por último, se totalizaron las unidades en inventario final para cada producto y material, para obtener equivalencia a Isopallet como unidad de carga. El número máximo de unidades de carga que serán almacenados determina el “plan de almacenamiento” y sus resultados se presentan en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Número máximo de unidades de carga como resultado del MRP.

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Total Tambores	450	602	600	690	620	900	840	900	890	1005	850	902
Subtotal Pallet	113	151	150	173	155	225	210	225	223	252	213	226
Total Canecas	4050	3600	35000	1920	680	980	1020	573	870	640	670	650
Subtotal Pallet	113	100	98	54	19	28	29	16	25	18	19	19
Total galones	17200	15000	19100	16578	27580	12700	18700	21135	16450	11120	21135	17900
Subtotal Pallet	96	84	107	93	154	71	104	118	92	62	18	100
Total Pallet	332	335	355	320	328	324	343	359	340	332	350	345

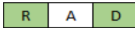



De acuerdo con la Tabla VII, se identificó que el número máximo de pallet en el plan de almacenamiento es de 359 pallet, al igual este número es una variable de entrada considerada para el modelo matemático de dimensionamiento de la zona de almacenamiento. Se selecciona el número máximo como capacidad necesaria y a su vez se fija a lo largo del periodo de planeación, debido a que esta se ajustaría a cualquier capacidad necesaria de otro periodo

3.3. Fase 2: cálculo número de compuertas (etapa 2)

Para el cálculo del número de compuertas se tiene en cuenta la configuración de flujo. En este caso se evaluarán las cuatro opciones de acuerdo con la Figura 1, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla IX.

Los resultados de la Tabla IX generan el número de compuertas de recepción y envío para cuatro opciones de configuración de flujo. Se aproximaron los resultados al entero siguiente debido a que se identificó una tendencia positiva que va incrementando el flujo de material para periodos de

Tabla IX. Número de compuertas para cada configuración de flujo.

Configuración de flujo de material		Compuertas de recepción	Compuertas de envío	Total de compuertas
<i>I-Shaped flow</i>		0,83 ≈ 1	0,26 ≈ 1	2
<i>U-Shaped Flow</i> (Muelles independientes)		0,83 ≈ 1	0,26 ≈ 1	2
<i>U-Shaped Flow</i> (Muelles compartidos)		0,89 ≈ 1		1
<i>L-Shaped Flow</i>		0,83 ≈ 1	0,26 ≈ 1	2

tiempo futuros; en este caso, se obtiene un total de dos compuertas para las configuraciones de flujo en las que se tiene muelles independientes. Por el contrario, en la configuración de muelles compartidos las actividades de recepción y envío se alternan en una sola compuerta. La selección de configuración de flujo de material finalmente dependerá de las restricciones de espacio para construir el almacén, recomendando principalmente para este caso la configuración *U-Shaped flow* con muelles compartidos, dado que requiere menor inversión por ser necesaria una sola compuerta.

3.4. Fase 2: cálculo de espacios de almacenamiento (etapa 3)

Los espacios necesarios de almacenamiento (*slots*) determinan la capacidad total de almacenamiento, el cálculo de estos se obtiene mediante la aplicación de la ecuación (2) y (3). Los resultados obtenidos integran decimales que deben ser aproximados. En este caso, el diseñador debe ajustar al máximo o al mínimo dependiendo de la capacidad de almacenamiento que desee, es decir, evitar subdimensionamiento o sobredimensionamiento del almacén de acuerdo con las tendencias de demanda de los productos. Para el cálculo de la capacidad de almacenamiento se aplica la ecuación (7) en la que interviene los *slots* en los tres ejes *X-Y-Z*.

$$\text{Capacidad almacen} = nx * ny * nz \quad (7)$$

En la ecuación (7), la variable *nz* va a depender del tipo de estantería a utilizar, ya que su nivel de altura (*slots* en el eje *z*) modificaría la capacidad de almacenamiento, así como el área necesaria. A partir de lo anterior, el proceso de ajuste máximo-mínimo así como la determinación de los niveles de altura de almacenamiento, establecerán el número de *slots* en eje *X* e *Y*. La Tabla X presenta el proceso de ajuste o aproximación de acuerdo con la capacidad necesaria (359 *slot*) identificada en la Tabla VII, teniendo en cuenta además la variación de uno a cinco niveles de altura.

Los resultados en la Tabla X presentan diferentes alternativas de configuración que pueden adoptarse al diseñar la zona de almacenamiento. Al aplicar las opciones de aproximación, es evidente que algunas deben ser descartadas, por ejemplo, en las primeras cuatro filas que corresponden a la asignación de un *slot* en el eje *Z*, la tercera y cuarta aproximación generan una capacidad real de almacenamiento de 344 y 336 *slot* estando por debajo de la capacidad necesaria (359 *slot*). Por esta razón, serán una opción de descarte debido a que para algunos periodos no habría espacio para

Tabla X. Número de compuertas para cada configuración de flujo.

Opción de aproximación	Slots nx-ny calculados		Slots nx-ny aproximados		Slots en el eje Z	Capacidad almacén	Diferencia con la capacidad necesaria de Almacenamiento	Utilización 12 periodos
	nx	ny	nx	ny				
nx+ ny+	8,39	42,79	9	43	1	387	28	87,3 %
nx+ ny-			9	42		378	19	89,4 %
nx- ny+			8	43		344	-15	-
nx- ny-			8	42		336	-23	-
nx+ ny+	5,93	30,26	6	31	2	372	13	90,8 %
nx+ ny-			6	30		360	1	93,8 %
nx- ny+			5	31		310	-49	-
nx- ny-			5	30		300	-59	-
nx+ ny+	4,84	24,70	5	25	3	375	16	90,1 %
nx+ ny-			5	24		360	1	93,8 %
nx- ny+			4	25		300	-59	-
nx- ny-			4	24		288	-71	-
nx+ ny+	4,20	21,39	5	22	4	440	81	76,8 %
nx+ ny-			5	21		420	61	80,4 %
nx- ny+			4	22		352	-7	-
nx- ny-			4	21		336	-23	-
nx+ ny+	3,75	19,14	4	20	5	400	41	84,4 %
nx+ ny-			4	19		380	21	88,9 %
nx- ny+			3	20		300	-59	-
nx- ny-			3	19		285	-74	-

almacenar materiales. Por lo contrario, la primera y segunda aproximación genera una capacidad superior a la capacidad necesaria, obteniendo un 87 % y 89 % de utilización proyectada para doce periodos. A partir de lo anterior, la configuración seleccionada para el almacén con un slot de altura ($nz = 1$) es $nx = 9$ slot, $ny = 42$ slot, debido a que es la que presenta mejor utilización proyectada. En la Tabla XI se presentan los resultados finales que establecen la configuración seleccionada de almacenamiento para cada nivel nz .

Tabla XI. Número de compuertas para cada configuración de flujo.

Slot en el eje X "nx"	Slot en el eje Y "ny"	Slot en el eje Z "nz"	Capacidad real almacenamiento	% Utilización
9	42	1	378 slots	89,4 %
6	30	2	360 slots	93,8 %
5	24	3	360 slots	93,8 %
5	21	4	420 slots	80,4 %
4	19	5	380 slots	88,9 %
Promedio			380 slots	89,3 %

En la Tabla XI se puede identificar que la configuración correspondiente a 2 y 3 slot de altura genera el mismo porcentaje de utilización y además el mayor entre todos. Para este caso, la selección se determina finalmente a la configuración que requiera menor inversión o a la mayor compatible con las restricciones de espacio físico que limiten la construcción del almacén.

Fase 2: etapa 4 cálculo área de almacenamiento

El área del almacén se considera un resultado muy importante para definir cuánto espacio se requiere para su construcción. Este resultado depende de la longitud del almacén en el eje X y Y,

Tabla XII. Área de almacenamiento para cada nivel de altura.

Slot en el eje Z "nz"	Capacidad real almacenamiento	Lx	Ly	Área
1	378 slots	22,9 m	47,4 m	1087,8 m ²
2	360 slots	15,3 m	35,4 m	541,6 m ²
3	360 slots	12,7 m	29,4 m	374,8 m²
4	420 slots	12,7 m	26,4 m	336,6 m ²
5	380 slots	10,2 m	24,4 m	248,8 m ²
Promedio				517,9 m²

para ello se aplican las ecuaciones (5), (6) y (7). Las áreas obtenidas para cada uno de los niveles de altura experimentados se presentan en la Tabla XII.

De acuerdo con la Tabla XI, las mejores configuraciones eran las que correspondían a 2 y 3 slot de altura; sin embargo, en la Tabla XII se puede identificar que por área necesaria se escogería la configuración de 3 slot de altura, debido a que requiere menor área proyectando una menor inversión en su infraestructura. El promedio general, teniendo en cuenta todos los posibles niveles de altura, es de 517,9 m².

Fase 2: etapa 5 dimensionamiento integral del almacén

En la etapa final de la segunda fase, se integran los resultados obtenidos en la segunda, tercera y cuarta etapa; para este caso, el número de compuertas calculadas se integra con el área de almacenamiento que a su vez depende del total de slots definidos. Existen varias opciones de diseño debido a que los resultados pueden combinar cada uno de los modelos de configuración de flujo con cinco niveles de almacenamiento que alternarían su capacidad y área requerida. Para efectos de culminar con el dimensionamiento integral, se toma como referente el mejor nivel de slots obtenidos en la etapa cuatro, para combinarlos con cada una de las configuraciones de flujo, garantizando menor inversión en infraestructura, menor ocupación de espacio y mayor utilización de la zona de almacenamiento. En este orden, se selecciona la asignación de tres slots de altura en el área de almacenamiento cuya área requerida es de 374,8 m² y una utilización proyectada de 93,8 %. El resultado de la aplicación del método de dimensionamiento integral en el caso de estudio se resume mediante la siguiente ficha técnica.

La información presentada en la Tabla XIII se clasifica en tres conjuntos de resultados. El primero de ellos "variables y parámetros", relaciona las especificaciones de entrada presentadas en la Tabla V. Esta información es identificada en la primera fase del método de dimensionamiento. Por otra parte, se integra los resultados obtenidos a partir del MRP como lo es el movimiento promedio de materiales para carga y descarga, así como la capacidad necesaria de almacenamiento, correspondientes a la segunda fase, primera etapa respectivamente.

El segundo conjunto de resultados "dimensionamiento" presenta los datos obtenidos en la segunda fase, segunda, tercera y cuarta etapa, en la que se resume el número de compuertas para recepción y envío, el número de espacios, capacidad, utilización y área necesaria de la zona de almacenamiento.

Tabla XIII. Ficha técnica para dimensionamiento del almacén.

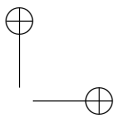
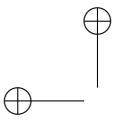
Variables y parámetros		Layout		
Capacidad del medio de transporte	4 pallet			
Tiempo promedio de carga/descarga	0,25 horas			
Tiempo disponible para cargue y descarga	30 horas/t			
Dimensión Unidad de carga eje X / Y	1,2m / 1m			
Ancho nave lateral / central	2,7m / 5,4m			
Slots en el eje Z	3 slot			
Movimiento promedio materiales muelle carga	191 pallet			
Movimiento promedio materiales muelle descarga	397 pallet			
Capacidad necesaria de almacenamiento	359 slot			
Dimensionamiento				
Número de compuertas para recepción y envío	2 (A,B,C) 1(D)			
Número de slots en el eje X / Y	5 / 24		Capacidad real de almacenamiento	360 pallet
Longitud en el eje X	12,75 m		Utilización de la capacidad	93,8 %
Longitud en el eje Y	29,4 m		Área de la zona de almacenamiento	374,8m ²

Finalmente, el tercer conjunto “layout” incluye los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la quinta etapa “dimensionamiento integral” que parametrizan las opciones de dimensionamiento del almacén. Para este caso se presentan cuatro diseños: *I Shaped flow* (A), *L Shaped flow* (B), *U Shaped flow* con muelles independientes (C) y *U shaped flow* con muelles compartidos (D), presentando así opciones de implementación que se ajusten a posibles restricciones de espacio o de flujo.

4. Discusión

El plan de requerimiento de materiales es una herramienta de planeación de la producción que tiene muchas variaciones en su aplicación, es decir, pueden modificarse sus estrategias de inventario, políticas de abastecimiento, *lead time*, entre otros. Debido a que estos datos son parámetros iniciales de entrada, su variabilidad genera cambios representativos en el dimensionamiento final del almacén. De acuerdo con las condiciones de la empresa en estudio, no se tiene un nivel de *stock* de seguridad y se trabaja con la política de abastecimiento por lotes; por ejemplo, experimentos aplicados previamente con el método demostraron que al cambiar la política de dimensionamiento a “lote a lote”, el área requerida para el almacenamiento disminuye comparada con los resultados presentados en la Tabla XIII. Lo anterior se justifica debido a que esta segunda política se enfoca al inventario cero, en la que se abastece únicamente lo que se requiere para cumplir una orden de pedido.

Otra opción experimentada está relacionada con el tipo de estantería en la que se evaluaron cinco niveles de altura de acuerdo con la infraestructura que dispone la empresa; en los resultados presentados en la Tabla XII se puede identificar que entre mayor sean los niveles de altura (n_z),



menor será el área necesaria de almacenamiento, demostrando que este parámetro y resultado son inversamente proporcionales. El anterior análisis permite a la compañía evaluar las condiciones de infraestructura que requiere menor inversión en área de almacenamiento, manteniendo las mismas características de flujo de material. Es conveniente experimentar con diversos sistemas de almacenamiento, por ejemplo, sistemas automatizados de autorecuperación (AS/RS), en los que dependiendo de su diseño se puede utilizar mayor espacio en la altura. Si se tomara esta opción, es necesario condicionando la unidad de carga a una diferente de *Isopallet*.

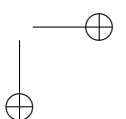
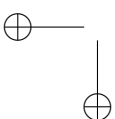
El método de dimensionamiento de la zona de almacenamiento está restringido a ciertas configuraciones de diseño, su restricción se debe a que inicialmente es aplicable en almacenes de carga unitaria (*unit-load*) ya que involucra las dimensiones de una sola unidad de carga; teniendo en cuenta que también existen condiciones de flujo de material que integran diferentes unidades de carga (*multiload*), el método debería acondicionarse para este caso a cada una de ellas, es decir, si el almacén maneja *Isopallet* y *Europallet* a la vez, se debe calcular espacios y áreas de almacenamiento por separado y al final integrar a un área común que sea flexible para cualquier tipo de material.

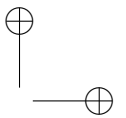
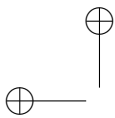
Para el caso particular de configuración interna de la zona de almacenamiento, estudios han demostrado que las distribuciones en V y *Fishbone* (espina de pescado) analizadas por [36] presentan mejores comportamientos en el proceso de alistamiento de pedidos, logrando una disminución de tiempo aproximada al 20 % con respecto a la distribución tradicional de estanterías paralelas. En este sentido, el método de dimensionamiento propuesto se restringe a este tipo de distribuciones, ya que en ellas se utilizan ecuaciones de dimensionamiento diferentes a las utilizadas en el método propuesto; además, se ha validado que estas distribuciones generan buen comportamiento solo en los casos en el que el almacén esté sujeto a un pequeño número de elementos en la lista de pedido [37]. En este orden, puede considerarse la adaptación de este tipo de distribuciones como una posible extensión al método de dimensionamiento.

5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados del caso de estudio, se puede concluir que el método es funcional en la organización, pues permite evaluar opciones de dimensionamiento que trascienden en decisiones de gran importancia como lo es la capacidad operativa de la empresa. Dicha funcionalidad es argumentada desde el referente teórico, conceptual y matemático de las variables y sus relaciones que previamente fueron explicadas. Es relevante mencionar que en el método presentado se integran dos áreas del conocimiento: la planeación de la producción y el dimensionamiento del almacén, cuya relación permite una mejor sincronización en datos relacionados con recepción, almacenamiento y distribución siendo estas operaciones primarias en este tipo de instalaciones.

La definición de las fases y etapas del método de dimensionamiento de almacenes permite evaluar diferentes políticas de planeación del sistema de producción y almacenamiento. Los resultados obtenidos y las políticas de la organización generan cuatro opciones de configuración de flujo de material, recomendando así la combinación *U-Shaped flow* con muelles compartidos y con tres *slots* de altura, logrando un buen indicador de utilización para los periodos proyectados siendo del 93,8 % de la capacidad disponible de almacenamiento como se demuestra en la tercera etapa y un



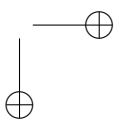
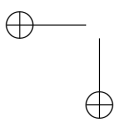


área de 374,8 m² obtenida en la cuarta etapa, para una capacidad real de almacenamiento de 360 pallet identificada en la primera etapa.

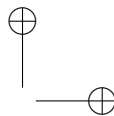
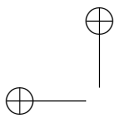
Se identificaron restricciones con el método de dimensionamiento relacionadas con la adaptación en almacenes que manejan múltiples unidades de carga, así como la compatibilidad con distribuciones diferentes a la configuración tradicional de estanterías paralelas. Estas restricciones generan opciones de extensión del método para futuras investigaciones, logrando así diseñar almacenes desde la caracterización de su proceso de abastecimiento hasta la configuración interna que garantice la reducción de tiempos de alistamiento y sus costos respectivos.

Referencias

- [1] I. Sulírová, L. Závodská, M. Rakyta, V. Pelantová, “State-of-the-Art Approaches to Material Transportation, Handling and Warehousing”. *Procedia Engineering*, vol. 192, pp. 857-862, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.148> ↑49
- [2] T. Sprock, A. Murrenho, L. F. McGinnis, “A Hierarchical Approach to Warehouse Design”. *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 21, pp. 6331-6343, octubre, 2016 <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1241447> ↑50
- [3] G. Zhang, T. Nishi, S. D.O. Turner, K. Oga, X. Li, “An Integrated Strategy for a Production Planning and Warehouse Layout Problem: Modeling and Solution Approaches”. *Omega*, vol. 68, pp. 85-94, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.06.005> ↑50, 51
- [4] E. Cakmak, N. S. Gunay, G. Aybakan, M. Tanyas, “Determining the Size and Design of Flow Type And U-Type Warehouses”. in 8 th International Strategic Management Conference, 2012, pp. 1425–1433. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.1127> ↑50, 52, 54
- [5] G. Jinxiang, M. Goetschalckx, L. F. McGinnis, “Research on Warehouse Design and Performance Evaluation: A Comprehensive Review”. *European Journal of Operational Research*, vol. 203, no. 3, pp. 539-549, 2010 <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.07.031> ↑50
- [6] A. M. Hualpa, C. Suárez, “Ubicación y dimensionamiento como parámetros en el diseño de almacenes: revisión del estado de arte”. *Ingeniería*, vol. 18, no. 1, pp. 65-83, 2013. ↑50
- [7] Chachelson, L. C., *Metodologías de diseño de Almacenes: Fases, Herramientas y mejores prácticas*. Donostia-San sebastian, España, 2013. ↑50
- [8] L. M. Thomas, R. D. Meller, “Developing design guidelines for a case-picking warehouse”. *Int. J. Production Economics*, vol. 170, pp. 741-762, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.011> ↑50
- [9] L. F. Cardona, D.F. Soto, L. Rivera, H. J. Martínez, “Detailed Design of Fishbone Warehouse Layouts with Vertical Travel”. *Int. J. Production Economic*, vol. 170, pp. 825-837, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.03.006> ↑51
- [10] K. Y. Tippayawong, A. Sopadang, P. Patitad, “Improving Warehouse Layout Design of a Chicken Slaughterhouse using Combined ABC Class Based and Optimized Allocation Techniques”. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, 2013. ↑51
- [11] V. Rakesh, G.K. Adil, “Layout Optimization of a Three-Dimensional Order Picking Warehouse”. *IFAC – Papers on Line*, vol. 48, no.3, pp. 1155 - 1160, 2015. ↑51, 56, 57
- [12] N. Mishra, V. Kumar, N. Kumar, M. Kumar, M.K. Tiwari, “Addressing Lot Sizing and Warehousing Scheduling Problem in Manufacturing Environment”. *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 11751-11762, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.03.062> ↑51
- [13] W. Jaruphongs, S. Cetinkaya, C.Y. Lee, “Warehouse Space Capacity and Delivery Time Window Considerations in Dynamic Lot-Sizing for a Simple Supply Chain”. *Int. J. Production Economics*, vol. 92, pp. 169-180, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.10.012> ↑51
- [14] S. Minner, “A Comparison of Simple Heuristics For Multi-Product Dynamic Demand Lot-Sizing with Limited Warehouse Capacity”. *Int.J. Production Economics*, vol. 118, pp. 305-310, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.08.034> ↑51



- [15] S. Huang, Q. Wang, R. Batta, R. Nagi, "An Integrated Model for Site Selection and Space Determination of Warehouses". *Computers & Operations Research*, vol. 62, pp. 169-176, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.015> ↑52
- [16] M. Klodawski, M. Jacyna, K. Lewczuk, M. Wasiak, "The Issues of Selection Warehouse Process Strategies". *Procedia Engineering*, vol. 187, pp. 451-457, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.399> ↑52
- [17] A. M. Hualpa, C. A. López, "Algoritmo de dimensionamiento de almacenes para empresas de edificación en el sector de la construcción". *Ingeniería*, vol. 20, no. 1, pp. 189-208, 2015. ↑52
- [18] M. Horta, F. Coelho, S. Relvas, "Layout Design Modelling for a Real World Just-In-Time Warehouse". *Computers & Industrial Engineering*, vol. 101, pp. 1-9, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.013> ↑52
- [19] R. A. Gómez, A. A. Correa, "Métodos cuantitativos utilizados en el diseño de la gestión de almacenes y centros de distribución". *Revista Avances en Sistemas e Informática*, vol. 7, no. 3, pp. 109-117, 2010. ↑52, 56
- [20] R. Ballou, "The Consideration of Angular Pallet Layout to Optimize Warehouse Space Utilization". 1963. Master's Thesis. The Ohio State University. ↑53, 56
- [21] M. S. Hung, J. C. Fisk, "Economic Sizing of Warehouses: a Linear Programming Approach". *Computers & Operations Research*, vol. 11, no. 1, pp. 13-18, 1984. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(84\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0305-0548(84)90003-0) ↑53
- [22] G. Cormier, E. Gunn, "A Review of Warehouse Models". *European Journal of Operational Research*, vol. 58, pp. 3-13, 1992. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90231-W](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90231-W) ↑53
- [23] T. N. Larson, H. March, A. Kusiak, "A Heuristic Approach to Warehouse Layout with Class Based Storage". *IEE Transactions*, vol. 29, no.4, pp. 337-348, 1997. <https://doi.org/10.1080/07408179708966339> ↑53
- [24] A.K. Rao, M. R. RAO, "Solution Procedures for Sizing of Warehouses". *European Journal of Operational Research*, vol. 108, no. 1, pp. 16-25, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00159-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00159-8) ↑53
- [25] G. Ghiani, G. Laporte, R. Musmanno, "Designing and Operating a Warehouse". in *Introduction to Logistics Systems Planning Control*, J. Wiley, Ed. England: 2004, pp. 157 - 166 ↑53, 56, 57
- [26] L. Hsieh, L. Tsai, "The Optimum Design of a Warehouse System on Order Picking Efficiency". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, no. 5, pp. 626-637, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2404-0> ↑53
- [27] D. Thornton, R. Francis, T. Loue, "Rectangular Layout Problems With Worst -Case Distance Measures". *AIIE Transactions*, vol.11, no.1, pp. 2 - 11, 1979. <https://doi.org/10.1080/05695557908974394> ↑53
- [28] R.M. Venkata, K. A. Gajendra, "A branch and bound algorithm for class based storage location assignment". *European Journal of Operational Research*, vol. 189, no. 2, pp. 492-507, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.050> ↑53
- [29] L. Choong, L. Careen, "A simulation study of warehouse loading and unloading systems using Arena". *Journal of Quality Measurement and Analysis*, vol.5, no. 2. pp. 45-56, 2009. ↑53
- [30] S. Huang, Q. Wang, R. Batta, R. Nagi, "An Integrated Model for Site Selection and Space Determination of Warehouses". *Computers & Operations Research*, vol. 62, pp. 169-176, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.015> ↑53
- [31] G. Zhang, T. Nishi, S. Turner, K. Oga, L. Xindan, "An Integrated Strategy for a Production Planning and Warehouse Layout Problem: Modeling and Solution Approaches". *Omega*, vol. 68, pp. 85-94, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.06.005> ↑53
- [32] J. Bartholdi, S. Hackman, *Warehouse & Distribution Science*. The Supply Chain and Logistics Institute. Georgia Institute of Technology, Release 094, pp. 219-222. 2011 ↑53
- [33] D. Cárdenas, A. Urquiaga, "Administración de la producción". *Revista de Ingeniería Industrial*, vol.25, no. 3, 2004. ↑56
- [34] Z. Xiande, L. Kokin, "Lot-Sizing Rules and Freezing the Master Production Schedule in Material Requirements Planning Systems". *Int. J. Production Economics*, vol. 53, no.3, pp. 281-305, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(97\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(97)00111-4) ↑56
- [35] Y. Hernández, "Aplicación del método de estudio de la gestión de la producción a un sistema productivo de medicamentos". *Revista de Ingeniería Industrial*, vol. 30, no.1, pp. 1 - 8, 2009. ↑56
- [36] Gue, K., Meller, R. D., "Aisle Configurations for Unit-load Warehouses". *IEE Transactions*, 41, 3, 171-182, 2009. <https://doi.org/10.1080/07408170802112726> ↑66
- [37] Celik, M., Sural, H., *The Order Picking Problem in Fishbone Aisle Warehouses*. Research Thesis. Georgia Insti-



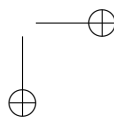
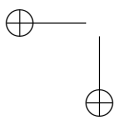
tute of Technology. Atlanta, USA, 2012. ↑66

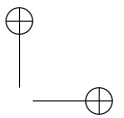
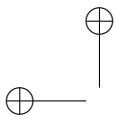
Andrés Mauricio Hualpa Z.

Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente Investigador programa de Ingeniería Industrial de la Universidad de La Salle, vinculado al Grupo GIII.
Correo electrónico: amhualpa@unisalle.edu.co

Carolina Suárez R.

Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente Investigador, programa de Ingeniería Industrial de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Bogotá, vinculado al Grupo Ingenio Induspyme.
Correo electrónico: carolina.suarez@campusucc.edu.co





Case report

3D Printing as a Didactic Tool for Teaching some Engineering and Design Concepts

Impresión 3D como Herramienta Didáctica para la Enseñanza de Algunos Conceptos de Ingeniería y Diseño

Edwin Blasnilo Rúa R.¹, Fernando Jiménez D.¹, German Andrés Gutiérrez A.¹ Nelson Iván Villamizar¹

¹Grupo de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Nuevas Tecnologías (GIDINT), Universidad Santo Tomas, Tunja.

Correspondence: edwin.rua@usantoto.edu.co, fernando.jimenez@usantoto.edu.co, german.gutierrez@usantoto.edu.co, nelson.villamizar@usantoto.edu.co

Recibido: 18/08/2017. Modificado: 27/11/2017. Aceptado: 05/12/2017.

Abstract

Context: 3D printing can be used for a wide range of tasks such as the design and testing of prototypes and finished products in a shorter time. In mechanical engineering, prototype designs are continuously generated in academic class activities and final coursework projects by students and teachers. However, students show limitations while understanding the abstract concepts represented with such designs.

Method: Firstly, a large scale 3D printer with improved technical specifications compared to traditional market options and similar price, was fabricated. By means of free software and hardware tools and easy-to-obtain alternative manufacturing materials, it was possible to decrease its manufacturing and operating costs. Then a set of study cases utilising the 3D printer in three different subject classes were designed and tested with two cohorts of students of Mechanical Engineering programme.

Results: It was feasible to fabricate a cost-effective and practical 3D printer for constructing prototypes and pieces that benefit teaching and learning concepts in engineering and design areas. The experiments carried out in three subjects of engineering courses with second-year students, showed a similar trend of improving the average course grades, as it was observed in two cohorts in different terms.

Conclusions: This type of low cost 3D printer obtained academic advantages as a didactic tool for the learning process in engineering and design subjects. Future work will consider applying this tool to other courses and subjects to further evaluate its convenience and effectivity.

Keywords: Engineering teaching, 3D printing, learning process, rapid prototyping

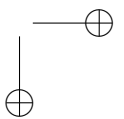
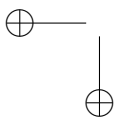
Language: Spanish



Cite this work as: E. B. Rúa, F. Jimenez, G. A. Gutierrez, N. I. Villamizar, "3D Printing as a Didactic Tool for Teaching some Engineering and Design Concepts", Ingeniería, vol. 23, no. 1, pp. 70-83, 2018.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12248>



Resumen

Contexto: La impresión 3D se puede utilizar para una amplia gama de tareas, como el diseño y prueba de prototipos y productos terminados, en un tiempo más corto. En ingeniería mecánica, los diseños de prototipos se generan continuamente en actividades de clase académica y proyectos de cursos finales por parte de estudiantes y docentes. Sin embargo, los estudiantes muestran limitaciones en la comprensión de los conceptos abstractos representados por dichos diseños.

Método: En primer lugar, se fabricó una impresora 3D a gran escala con especificaciones técnicas mejoradas en comparación con las opciones de mercado tradicionales y precios similares. Mediante herramientas de hardware y software gratuitas y materiales de fabricación alternativos fáciles de obtener, fue posible disminuir sus costos de fabricación y operación. Se preparó un conjunto de casos de estudio que utilizan la impresora 3D en tres clases de asignaturas diferentes los cuales fueron evaluados en dos cohortes de estudiantes de un programa académico de Ingeniería Mecánica.

Resultados: Se mostró la factibilidad de fabricar una impresora 3D práctica y rentable para la construcción de prototipos y piezas que beneficien el aprendizaje y la enseñanza en áreas de ingeniería y diseño. Los experimentos llevados a cabo en tres asignaturas de cursos de ingeniería con estudiantes de segundo año, mostraron una tendencia similar de mejorar las calificaciones promedio del curso, observada durante dos cohortes en diferentes semestres.

Conclusiones: Este tipo de impresora 3D de bajo costo representa un beneficio académico como herramienta didáctica para el proceso de aprendizaje en temas de ingeniería y diseño. El trabajo futuro considerará la aplicación de esta herramienta a otros cursos y asignaturas para evaluar aún más su conveniencia y efectividad.

Palabras clave: Enseñanza de ingeniería, impresión 3D, proceso de aprendizaje, creación rápida de prototipos

Idioma: Español

1. Introducción

Tradicionalmente, el estudio y la enseñanza están limitadas a la unilateralidad de la información y a la bidimensionalidad del papel o, en escenarios más modernos, a la de una pantalla, olvidando que gran parte de las temáticas tratadas son representaciones de eventos y elementos que pertenecen a un universo tridimensional; estudiantes y docentes, aun los que dominan las temáticas de sus clases, no consiguen formar una imagen mental del tema porque desconocen elementos físicos con qué relacionarlos, dificultando la recepción y retención del mensaje, causando, cuando más, un recuerdo provisional del contenido tratado.

Es importante, sobre todo en las ingenierías y las áreas de diseño, contar con material didáctico para ofrecer a los estudiantes problemas y situaciones reales con los que interactúen y tengan que analizar y dar una respuesta a ello; este material fortalece habilidades mecánico-espaciales y asociativas, además de fomentar la educación basada en problemas, que es, a su vez, educación basada en el estudiante, rompiendo la unilateralidad de la información. Se pretende que el docente, indistintamente de su área de conocimiento, disponga de una máquina que pueda fabricar este material didáctico, que en sí misma sea un elemento de trabajo y que sus características le permitan evolucionar, fortaleciendo significativamente la forma en que se enseña al estimular el aprendizaje significativo y romper el círculo vicioso de enseñar como generalmente se enseña.

La fabricación digital y el diseño digital integrados a la producción física se han vuelto un componente medular en la educación de un arquitecto, artista y diseñador, sin embargo, las habilidades técnicas inherentes al *software* CAD/CAM estándar la mayoría de las veces son tomadas como un tema avanzado [1]. Las herramientas CAD/CAM, son compatibles con los formatos que se necesitan para exportar e imprimir en 3D.

Uno de los principales retos en el uso de las tecnologías como apoyo a la educación es superar la resistencia al cambio por parte de los profesores de educación convencional, pero no se trata de re-futar con las nuevas tecnologías antiguos programas educativos, sino de diseñar y aplicar modelos pedagógicos de innovación que orienten a los alumnos hacia las competencias que necesitarán para adaptarse en un mundo que ya es digital [2]; con esta tecnología, el docente podrá crear nuevas herramientas didácticas de aprendizaje y el estudiante podrá comprender fácilmente muchos temas que quizás son abstractos o difíciles de comprender.

En el ámbito educativo, la impresión 3D ya se ha incorporado en varios proyectos de investigación y entornos de laboratorio. De aquí a los próximos cuatro o cinco años, las impresoras 3D se utilizarán cada vez más en el arte, el diseño, la fabricación y las ciencias para crear modelos en 3D que ilustren conceptos complejos o arrojen luz sobre ideas y diseños novedosos, incluso moléculas químicas y orgánicas [3].

El Reino Unido (UK), en particular Inglaterra, entre sus políticas ha incluido el fomento del prototipado rápido por impresión 3D, ver por ejemplo el informe del Departamento de Educación “Reforming qualifications and the curriculum to better prepare pupils for life after school” [4], en el cual específicamente se propone la impresión 3D para impulsar la enseñanza de la ciencia, la tecnología, la ingeniería, las matemáticas y el diseño (STEM, por sus siglas en inglés) [4].

Michael Gove, el secretario de estado para la educación en Reino Unido en el periodo 2010-2014, se refirió a la revolución que la impresión 3D está causando a nivel industrial y la necesidad de incluirla en el plan de estudios, pero en las pruebas con instituciones piloto se destacó el potencial que tiene en la enseñanza y aprendizaje de las ciencias como la física, las matemáticas, la química, entre otras, al permitir hacer realidad un concepto o idea en poco tiempo, haciendo de esta tecnología una herramienta poderosa, capaz de aumentar el interés por las matemáticas y otras ciencias al evidenciar su relación con el diseño [5].

Inglaterra no es en el único país en que se invierte esfuerzo y recursos en la propagación del uso del prototipado rápido con fines formativos, también se están llevando a cabo este tipo de iniciativas en instituciones educativas de menor cobertura como *Bulimba Creek State High School en Carindale*, Australia, como respuesta a la situación pedagógica sociocultural consecuencia de la reforma educativa australiana *Digital Education Revolution*, que orienta a la apropiación tecnológica de la educación; esta iniciativa pedagógica busca que los estudiantes sean los gestores de su propio conocimiento a través de la exploración de sus intereses, la experimentación y la socialización de las experiencias, mediante el modelamiento y la simulación, pero para poder brindar esa experimentación tangible se requiere tecnología de impresión 3D, llevándolos a escenarios de autoaprendizaje basados en “qué pasa si”, fortaleciendo su curiosidad contrarrestando los efectos perjudiciales de la enseñanza basada estrictamente en libros [6].

Park Hyeong Yeol habla de cómo Corea, a pesar de ser un país densamente poblado, pequeño y con falta de recursos naturales, ve en la educación la clave de su futuro, pues ha sido el modo en que este país ha logrado hacer crecer su economía; aparentemente lo rígido del sistema educativo centrado en el aprendizaje de memoria está disminuyendo la creatividad y la curiosidad de los alumnos, según Yeol esto va a cambiar y las impresoras 3D van a estar involucradas. El doceavo *Education Korea Expo* en enero de 2015, cuyo tema de este año era *A Guide to New Education* (una guía para nueva educación), apoyado por el Ministerio de Educación de Corea y el Instituto de Diseño Sustentable y Ambiente Educacional de Corea, por primera vez en su historia incluyó entre sus pabellones la impresión 3D, al estar siendo tenida en cuenta significativamente por el gobierno coreano con fines industriales y comerciales; sin embargo, Corea quiere recuperar la creatividad y la curiosidad perdidas debido a su modelo educativo estimulando estos aspectos desde la infancia, ya que son esenciales en el aprendizaje de las ciencias, la tecnología, ingeniería y matemáticas, donde la impresión 3D puede tener un rol decisivo para este proceso [7], [8].

Por otra parte, en Colombia la impresión 3D ya se conoce, pero no a profundidad como en otros lugares del mundo; por lo tanto, en general se desconoce el potencial que esta tecnología tendría a largo plazo [9]. Desde la academia colombiana se empieza a identificar a la impresión 3D como una tecnología con un potencial alto de impacto en la enseñanza de la ingeniería, entre otras tecnologías [10]. En la Universidad Nacional, en el libro *Aprendizaje basado en problemas en ingeniería: teoría y práctica*, se reporta a la impresión 3D como perteneciente a un conjunto de tecnologías emergentes que determinará hacia dónde la ingeniería debería cambiar y evolucionar; además, cómo esto indudablemente modificará los planes de estudio de ingeniería y la manera de educar a los futuros ingenieros [11]. Sin embargo, es difícil encontrar en la literatura científica, reportes de uso de esta tecnología como generadora de herramientas didácticas. En la Universidad Distrital, se reporta un caso interesante de aplicación de sólidos impresos en 3D en el aprendizaje de la asignatura de dibujo en ingeniería, y se reportan mejoras significativas en el aprendizaje y desempeño de los estudiantes [12]. En Colombia es más frecuente la utilización de la impresión 3D desde emprendimientos que ofrecen los servicios de prototipado y capacitación en el uso de esta tecnología.

Se describen tres casos puntuales de la utilización de una impresora 3D para la generación de material didáctico y experiencias didácticas en las asignaturas de: Dibujo I, Lógica de Programación y Cálculo, que hacen parte del currículo de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás. Además, se presentan los resultados obtenidos de las experiencias, con los que se puede observar una tendencia de mejora en el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

2. Materiales y métodos

El propósito de esta investigación de tipo descriptivo es demostrar los beneficios de la inclusión de la impresión 3D y el prototipado rápido en el aula de clase, lo anterior para el desarrollo y afianzamiento de conceptos de ingeniería y áreas de diseño. En esa medida, se utilizan dos impresoras 3D implementadas en experiencias de investigación anteriores desarrolladas por parte del semillero de investigación en prototipado rápido y manufactura digital, una de ellas es una impresora tipo Mendel Max con un volumen de impresión de $20 \times 20 \times 15$ cm y la otra es una impresora con un diseño más robusto una topología cartesiana construida con perfiles de aluminio dispuesta en forma

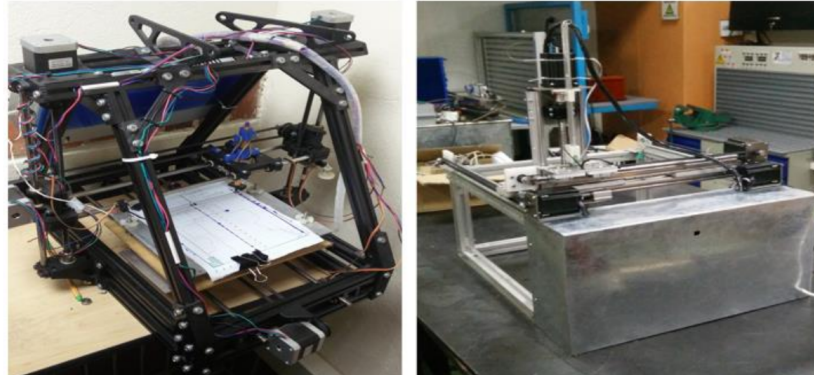


Figura 1. (a) Impresora 3D MendelMax, (b) Robot cartesiano para prototipado 2D y 3D.

cúbica que permite un mayor volumen de impresión ($35 \times 35 \times 30$ cm) y la facilidad de intercambio de herramientas, no solo para impresión 3D sino también para corte y fresado. La Figura 1 muestra la máquina fabricada para el desarrollo del proyecto.

El proceso de investigación se resume en dos etapas: generación y empleo de material didáctico y la evaluación de la experiencia.

2.1. Generación y empleo de material didáctico

En primer lugar, se capacitó a los docentes de las asignaturas mencionadas en el diseño y fabricación de material didáctico empleando impresión 3D y posibilidades de generación de experiencias didácticas con la herramienta; esta capacitación se centró en la utilización de herramientas CAD y en la utilización de las impresoras, que incluye interacción en la interfaz de usuario, la calibración y ajuste de los parámetros de impresión, entre otros. Los docentes diseñaron y generaron material didáctico y talleres de experiencias didácticas para contenidos específicos en las materias Dibujo 1: geometría descriptiva, Cálculo integral: sumas de Riemann y Lógica de Programación. A continuación, se describe el ejercicio desarrollado en cada asignatura.

2.1.1. Dibujo 1: geometría descriptiva

Esta asignatura es de segundo semestre del programa de ingeniería mecánica y contaba para el semestre 2017-1 con 30 estudiantes. Los contenidos objeto del experimento fueron los asociados con geometría descriptiva, donde se orienta a los estudiantes cómo representar objetos del espacio tridimensional en superficies bidimensionales haciendo uso de técnicas geométricas. Esta materia en la institución tradicionalmente se ha desarrollado haciendo uso de papel y modelos CAD; sin embargo, el desarrollo de memoria espacial, capacidad de abstracción y asociación no se ve muy estimulado por estos recursos, ya que no existe interacción con los objetos reales. La propuesta fue hacer uso de la impresión 3D para fabricar los modelos a escala real y entregarlos a los estudiantes para identificar las formas y medidas reales, generando así las proyecciones en dos dimensiones de manera adecuada y, con esto, componer un modelo 3D para realizar el ensamble de las piezas. Los modelos empleados para la actividad son los mostrados en la Figura 2.

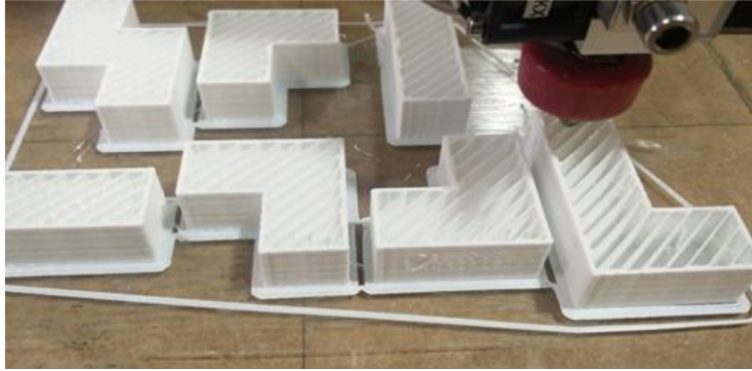


Figura 2. Material didáctico impreso en 3D para la asignatura de Dibujo 1: geometría descriptiva.

2.1.2. Cálculo Integral: sumas de Riemann y la definición de integral

La integración es un concepto fundamental del cálculo, la cual se basa en la posibilidad de concebir la suma de manera generalizada como una infinidad de áreas o volúmenes infinitamente pequeños. Una forma simple de definir la integral de una función sobre un intervalo es a través de la integral de Riemann, que consiste en la descomposición de un área definida bajo una función en secciones rectangulares y cómo el ancho de estas secciones incide de manera directa en la precisión del área obtenida frente al área real. Este contenido tiene repercusiones directas en teorías de control digital que son tratados en octavo semestre, y comúnmente es necesario reforzar este tema conllevando un atraso en el cronograma de actividades. La propuesta para este contenido fue diseñar un programa en OpenScad que genera material didáctico para imprimir en 3D sumas de Riemann para ecuaciones bidimensionales; un ejemplo del material fabricado está exhibido en la Figura 3, con aproximaciones de 5, 10, 20, 50 y 100 rectángulos de la función expresada en la ecuación 1, los modelos fueron diseñados y fabricados a escala 1:1 empleando milímetros como unidad.

$$y(x) = (x^2)/20 \quad (1)$$

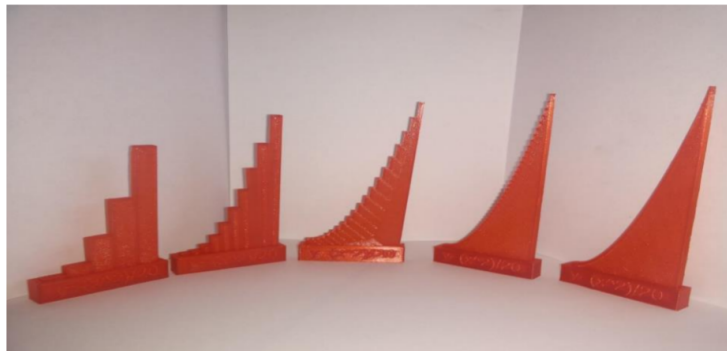


Figura 3. Modelos didácticos de sumas de Riemann impresos en 3D.

Estos modelos son llevados al aula, donde en lugar de realizar una explicación previa del tema, se entrega el material y se pide a los estudiantes que calculen el área de cada uno de los rectángulos y la suma de estas para los diferentes casos; posteriormente, concluir qué sucede con el área individual de cada rectángulo y realizar una comparación entre el área calculada por los estudiantes en cada caso con el área real para, al final, construir la definición del tema.

2.1.3. Lógica de Programación para Ingeniería Mecánica: introducción a la algoritmia y nociones de control numérico

Esta asignatura hace parte del programa de ingeniería mecánica en su segundo semestre; el objetivo de este contenido es desarrollar la capacidad de usar instrucciones ordenadas para obtener resultados deseados. La propuesta para este contenido es que los estudiantes, siendo de ingeniería mecánica, usen GCODE propio de máquinas de control numérico para realizar un trazado correspondiente a un diseño propuesto por el docente; para esto, fue necesario diseñar con ayuda del *software* de diseño OpenScad, para posteriormente fabricar, un utensilio simple que permitiera convertir una impresora 3D en un *plotter* 2D con ayuda de un plumón como se muestra en la Figura 4.

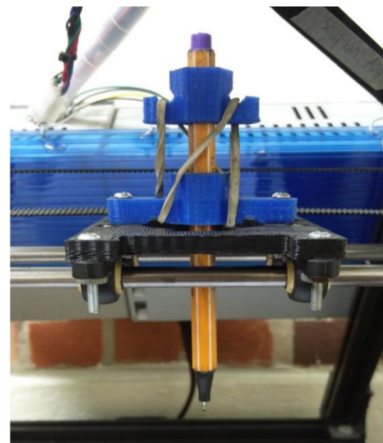


Figura 4. Adaptador para plumón para impresora 3D.

2.2. Evaluación de la experiencia

Para validar los resultados de la propuesta, se realizó una comparación entre los resultados académicos de los contenidos tratados previos a la inclusión de las herramientas didácticas (2016-2), en confrontación con los obtenidos después de la utilización de las herramientas (2017-1 y 2017-2), teniendo en cuenta el promedio general, la mortalidad académica y las observaciones del docente en cuanto a su experiencia. Por otra parte, se aplicó un cuestionario-encuesta a los estudiantes que cursaron las asignaturas de Cálculo Integral, Lógica de Programación para Ingeniería Mecánica y Dibujo 1, para así medir el grado de aceptación y el impacto de la impresión 3D y el prototipado rápido en el ámbito académico.

El grupo objetivo de los estudios fueron los estudiantes de segundo semestre de la Facultad de Ingeniería Mecánica matriculados en las tres asignaturas: once estudiantes de Lógica de Programación, catorce de Dibujo I y veintiséis de Cálculo Integral, para un total de 51 en el periodo 2017-1. Para el semestre 2017-2 se evaluaron 27 estudiantes de Lógica de Programación, 33 de Dibujo I y 33 de Cálculo Integral, para un total de 93 inscritos. Se diseñó un cuestionario estructurado en diez ítems, con el fin de conocer la percepción y apreciación sobre esta herramienta didáctica.

Esta encuesta fue aplicada en junio de 2017 y en noviembre de 2017, Las preguntas de la encuesta fueron cerradas y se contestaba marcando “sí” o “no”. Adicionalmente, se dejaba un espacio al final de la encuesta para que el estudiante expresara sus comentarios generales sobre el uso de esta herramienta o la estrategia didáctica utilizada. Los resultados se analizaron a través del programa Excel, que permite realizar estadística descriptiva, visualizar el análisis de forma gráfica y numérica.

Encuesta realizada a los estudiantes de ingeniería mecánica (Universidad Santo Tomás, Tunja)

1. ¿Considera que la impresión 3D es útil en su formación profesional?
2. ¿Cree usted que la impresión 3D se puede aplicar como apoyo en asignaturas de ingeniería mecánica?
3. ¿La impresora 3D es indispensable para las asignaturas de diseño?
4. ¿El uso de la impresión 3D le permitió comprender mejor los temas de la asignatura?
5. ¿La impresión 3D motiva a su imaginación para llegar a la innovación?
6. ¿Cree usted que el uso de la impresión 3D, le sirve de herramienta didáctica al profesor?
7. ¿Este tipo de herramienta satisface sus expectativas como estudiante al compararla con otros métodos?
8. ¿Considera útil la impresora 3D para los proyectos finales de asignatura?
9. ¿Considera que la impresora 3D disponible es la adecuada como herramienta didáctica para las asignaturas de diseño?
10. ¿Le gustaría el próximo semestre seguir utilizando la impresora 3D para las asignaturas de diseño?

3. Resultados

3.1. Dibujo 1: geometría descriptiva

Para los periodos 2017-1 y 2017-2, la actividad se desarrolló en dos sesiones. La primera, los estudiantes tomaron las piezas individuales que conforman un cubo y realizaron los dibujos de las vistas con sus cotas como se muestra en la Figura 5.

En la Figura 6 se observa el modelo CAD de cada pieza desarrollada por uno de los estudiantes a partir de los sólidos impresos en 3D; este proceso se realizó en el *software* Inventor y la visualización de los resultados en OpenScad.

En la segunda sesión, los estudiantes ensamblaron las piezas modeladas digitalmente con ayuda del *software* Autodesk Inventor para formar un cubo. Los estudiantes se apoyaron en el modelo físico para construir su asociación con el digital.

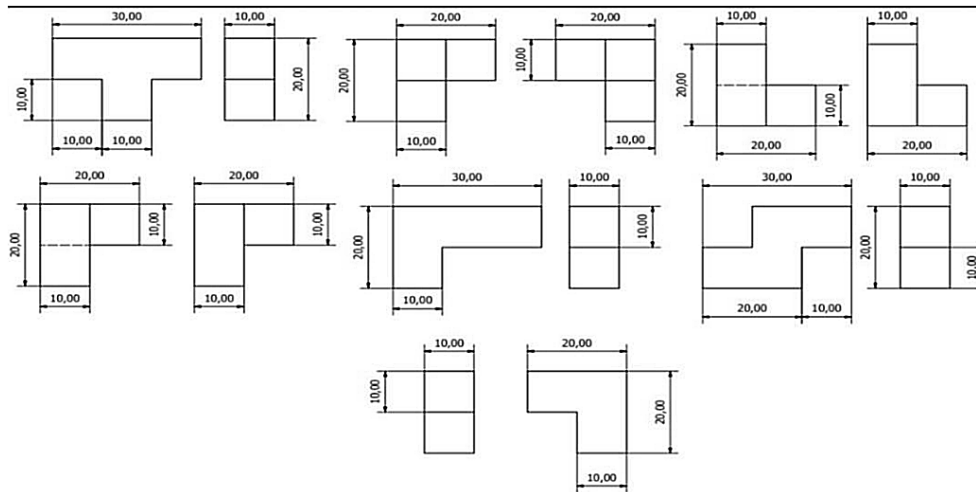


Figura 5. Vistas de las piezas con cotas.

En la discusión con el docente que dirigió la práctica sobre su experiencia, tanto en 2017-1 como en 2017-2, se resaltó que la actividad mostró resultados interesantes, pues en comparación con semestres previos a la incorporación de la herramienta, los estudiantes se mostraron más receptivos y con pocas dudas conceptuales, resultando más fácil alcanzar las competencias básicas propuestas para el tema a través del uso del material didáctico. Se observó que los estudiantes lograron construir sus propios conceptos, garantizando significativamente la apropiación de estos conocimientos. Los resultados fueron similares en el periodo 2017-2 para la misma actividad, sin embargo, la actividad se desarrolló de forma más fluida debido a la experiencia previa del docente al momento de dar las instrucciones iniciales y el apoyo durante la ejecución.

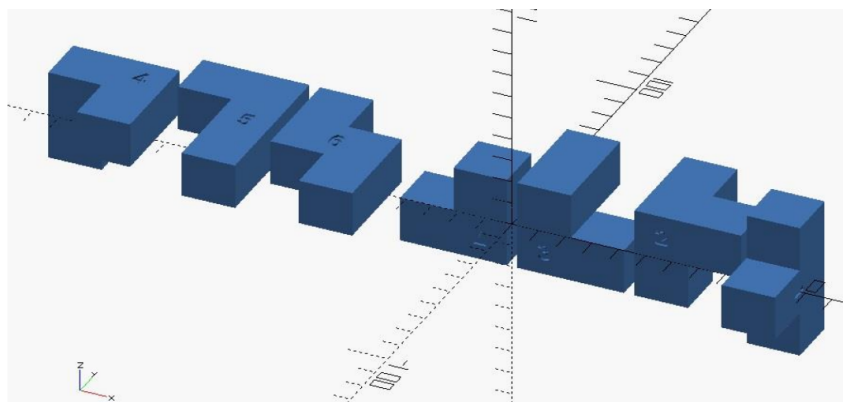


Figura 6. Modelos digitales en 3D de la herramienta didáctica.

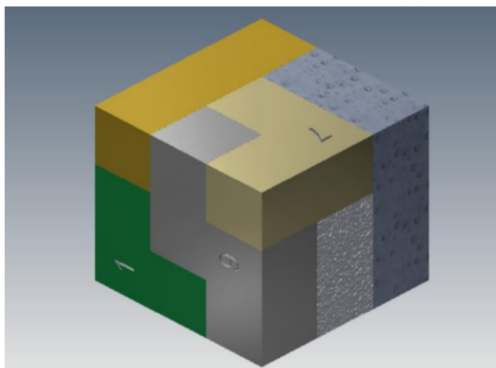


Figura 7. Cubo ensamblado digitalmente.

Por otra parte, observando el histórico de calificaciones de los grupos para segundo corte en los tres periodos académicos, se observa una mejora en la calificación promedio de los estudiantes como se observa en la Tabla I.

Tabla I. Promedio grupal por periodo académico, Dibujo 1

	2016-2	2017-1	2017-2
Número de estudiantes	30	14	33
Promedio grupal a segundo corte	3.2	3.5	3.8

3.2. Cálculo Integral: sumas de Riemann y la definición de integral

Comparando las calificaciones obtenidas en promedio por los estudiantes en el corte correspondiente a la realización de la actividad, no se observa un efecto importante sobre estas; sin embargo, el docente manifiesta interés de los estudiantes por su desarrollo. En la Tabla II se observan los promedios de calificación para la asignatura en los periodos comparados.

Tabla II. Promedio grupal por periodo académico, Cálculo Integral

	2016-2	2017-1	2017-2
Número de estudiantes	28	26	33
Promedio grupal a segundo corte	3.3	3.4	3.3

3.3. Lógica de Programación para Ingeniería Mecánica: introducción a la algoritmia y nociones de control numérico

Para los periodos 2017-1 y 2017-2, la metodología de aplicación de la actividad se realizó de forma individual brindando cinco minutos por persona en cada sesión durante dos sesiones, tiempo aproximado que le toma a la impresora realizar el trabajo; en la primera sesión, ejecutaron las instrucciones que previamente tenían preparadas e identificaron los errores cometidos en la secuencia de instrucciones, los cuales debían ser corregidos para la segunda sesión. La calificación de la actividad se basó en el número de errores cometidos en la segunda actividad con respecto a la primera.

La Figura 8 muestra la impresora 3D funcionando como *plotter* 2D durante la ejecución de la actividad.

Una vez familiarizados con el uso de una máquina de control numérico, se realizó una práctica similar pero con la máquina cartesiana de mayor volumen, capaz de soportar diversas técnicas de fabricación como fresado, corte láser, corte de plasma e impresión 3D, en este caso se efectuó corte de plasma de modo similar a la actividad del plumón (Figura 9); para esto, se adaptó la antorcha de una cortadora de plasma manual y se controló la operación de la misma a través de una salida a relé a la que cuenta la impresora. En esta actividad los estu-

diantes mostraron un elevado interés en el ejercicio.

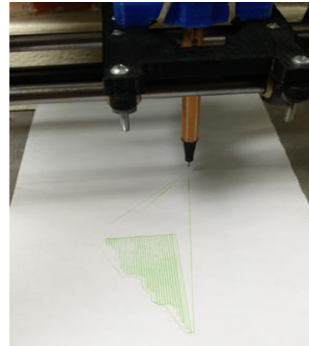


Figura 8. Impresora 3D funcionando como *plotter* 2D.

En relación con el desempeño académico, este experimentó mostrar resultados similares al ejercicio de geometría descriptiva, donde se aprecia una tendencia de mejora en los promedios obtenidos por los estudiantes en los dos semestres donde se utiliza la impresora como herramienta de enseñanza (Tabla III).

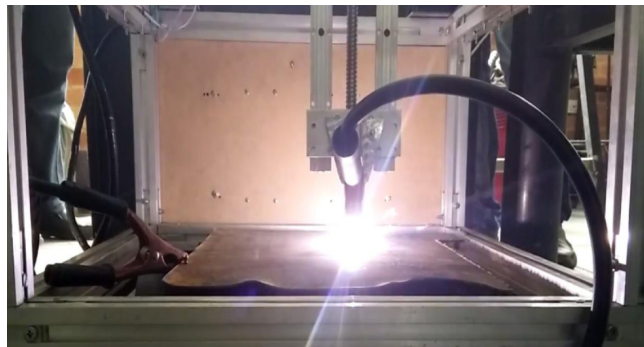


Figura 9. Corte de plasma con impresora 3D multifuncional.

Tabla III. Promedio grupal por periodo académico. Lógica de Programación para ingeniería mecánica.

	2016-2	2017-1	2017-2
Número de estudiantes	29	26	27
Promedio grupal a segundo corte	3.2	3.8	4.3

3.4. Análisis del cuestionario-encuesta

Del cuestionario-encuesta el resultado obtenido de las diez preguntas se compiló en la Figura 10, donde se puede ver de eje vertical las respuestas dadas en porcentaje y en eje horizontal las diez preguntas del cuestionario.

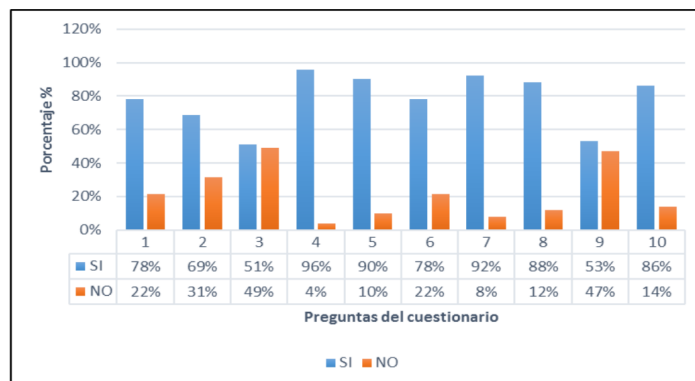


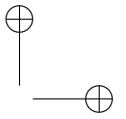
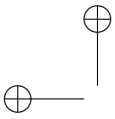
Figura 10. Análisis gráfico de los resultados del cuestionario-encuesta.

En la primera pregunta, el 78 % de los estudiantes respondió que sí consideran que la impresión 3D es útil en su formación profesional y solo el 22 % no la considera útil; la mayoría considera que sí es importante ya que se proyectan o consideran que pueden utilizar esta herramienta en un futuro en su vida profesional. En la segunda pregunta, el 69 % de los estudiantes considera que la impresión 3D se puede aplicar en asignaturas de ingeniería mecánica y el 31 % considera que no; algunos estudiantes consideran que no se puede aplicar, quizá porque no conocen completamente el plan de estudios ni el contenido temático de las asignaturas, otros consideran que solo se puede aplicar en asignaturas de diseño mecánico.

En la tercera pregunta, el 51 % de los estudiantes considera que sí es indispensable la impresora 3D para las asignaturas de diseño y el 49 % que no. En la cuarta pregunta, el 96 % de los estudiantes considera que el uso de la impresión 3D le permitió comprender mejor los temas de la asignatura y solo al 4 % no, esto indica que sí fue relevante el uso de la impresora para el aprendizaje. En la quinta pregunta, el 90 % de los estudiantes considera que la impresión 3D motiva a su imaginación para llegar a la innovación, esto es muy importante para los estudiantes que pertenecen a los semilleros de investigación y para los que se perfilan como futuros investigadores e innovadores.

En la sexta pregunta, el 78 % de los estudiantes considera que el uso de la impresión 3D sí le sirve de herramienta didáctica al profesor, ya que le facilita la enseñanza y la comprensión —por parte de los estudiantes— de algunos temas complejos. En la séptima pregunta, el 92 % de los estudiantes considera que esta herramienta sí satisface sus expectativas como estudiante al compararla con otros métodos, ya que conlleva a que la clase sea dinámica, el estudiante interactúe con sus compañeros y el docente logre sacar sus dudas al mostrar y permitir manipular los objetos vistos en sus clases teóricas. En la octava pregunta, el 88 % de los estudiantes considera que sí es útil la impresora 3D para los proyectos finales de asignatura, ya que en muchos casos necesitan elementos o piezas difíciles de conseguir y en la impresora fácilmente las pueden construir.

En la novena pregunta, el 53 % de los estudiantes considera que la impresora 3D disponible sí es la adecuada como herramienta didáctica para las asignaturas de diseño y el 47 % considera que no; de acuerdo a las observaciones dadas por algunos estudiantes, existen impresoras más grandes, di-



versidad de materiales y de fácil acceso. En la décima pregunta, el 86 % de los estudiantes responde que sí le gustaría el próximo semestre seguir utilizando la impresora 3D, para las asignaturas de diseño, seguir construyendo nuevos productos, innovar y perfeccionar el manejo de esta máquina.

4. Discusión y conclusiones

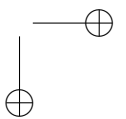
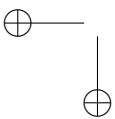
Las experiencias de aula empleando impresión 3D en los periodos 2017-1 y 2017-2, crearon un precedente en la forma de obtener y utilizar material didáctico especializado en la Universidad Santo Tomás, abriendo puertas para la formación de una cultura de generación de material didáctico y productos de clase entre los docentes de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Para 2018 se esperan incorporar al proyecto las asignaturas de Procesos de Manufactura I y II, Biomecánica, Dibujo II e Instrumentación y Control, aunque en las dos últimas asignaturas, más que material didáctico para la orientación de contenidos, los estudiantes tendrán la posibilidad de fabricar prototipos para prótesis, órtesis, estructuras para actuadores electromecánicos, entre otros.

Con respecto a los resultados obtenidos durante los experimentos realizados para Cálculo Integral en la temática sumas de Riemann y la definición de integral, el experimento no consiguió alterar el generalizado bajo rendimiento de los estudiantes que cursan esta materia, lo que abrió la discusión sobre la modificación de la metodología de aplicación y la inclusión de más temáticas apoyadas en la impresión 3D como operaciones entre funciones y su integral, sólidos de revolución, que involucra aproximación por discos y cascarones cilíndricos. El primer cambio a la metodología de aplicación de la estrategia didáctica será involucrar a los estudiantes con el diseño de los modelos y su fabricación, para esto se dispondrá de impresoras 3D compactas y portátiles que se encuentran en desarrollo con este único propósito.

El equipo investigador decidió utilizar encuestas y entrevistas para la medición de efectos y resultados de la aplicación de este tipo de recursos didácticos durante 2017-1 y 2017-2, pues fueron los únicos docentes involucrados de forma permanente con la propuesta; sin embargo, para etapas futuras del proyecto se está organizando la realización de exámenes diagnósticos iniciando el periodo inmediatamente siguiente al de la aplicación de la herramienta, aunque hacerlo ha implicado superar obstáculos como los cronogramas de actividades propuestos para cada semestre con el fin de realizar los test, la participación de los docentes ajenos del proyecto didáctico, la permanencia de los docentes que aceptan participar en los experimentos, entre otros.

Referencias

- [1] Gannon, M., & Brockmeyer, E., *Teaching CAD/CAM Workflows to Nascent Designers*. 2014. ↑72
- [2] E. Rua, "Aprendizaje interactivo de termodinámica de fluidos apoyado en las tecnologías de la información y comunicación". *Revista respuestas*, Vol. 19, N° 2, 2014, pp 41-50. ↑72
- [3] NMC Horizon Report, "Edición sobre educación superior". 2013. *La impresión 3D*, [En línea]. Disponible en: go.nmc.org/app. ↑72
- [4] UK Department for Education and The Rt Hon Michael Gove, *New 3D printers to boost STEM and design teaching*. 2013, October, 19. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/news/new-3d-printers-to-boost-stem-and-design-teaching> ↑72



- [5] UK Department for Education, *3D printers in schools: uses in the curriculum (Enriching the teaching of STEM and design subjects)*, 2013. ↑72
- [6] Fisher, T., *The Professional Practice of Educators. Cyber-learning – Modelling & simulation*. Australia, 2014. ↑72
- [7] Yeol, P. H., *3D printing teaches Korean educators at the KoreaEdu expo*. 2015, February 7. [En línea]. Disponible en: <http://3dprintingindustry.com/2015/02/07/3d-printing-teaches-korean-educators-koreaedu-expo/> ↑73
- [8] Yeol, P. H., *3D printing teaches Korean educators at the KoreaEdu expo*. 2015, February 7. [En línea]. Disponible en: <http://3dprintingindustry.com/2015/02/07/3d-printing-teaches-korean-educators-koreaedu-expo/> ↑73
- [9] Solis, M., “Uso didáctico de impresoras 3D en el ámbito educativo en Colombia”. *Revista RedES*, vol. 2, 2016. ↑73
- [10] Mariño, O., “Fortalecimiento de la enseñanza de la ingeniería con las tecnologías de información y comunicaciones”. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, vol. 39, 2013, pp. 46-49 ↑73
- [11] Rodríguez, F., *Aprendizaje basado en problemas en ingeniería: Teoría y práctica*. Aalborg, Aalborg Universitetsforlag, 2017. ↑73
- [12] Tristanchó, J., Contreras, L. y Vargas, L., “Propuesta y aplicación de nuevas herramientas para el desarrollo de habilidades espaciales en la asignatura Dibujo de Ingeniería”. *Revista Universidad Católica del Norte*, vol. 46, 200-216, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://revistavirtual.ucn.edu.co/index.php/RevistaUCN/article/view/709/1236> ↑73

Edwin Blasnilo Rua R.

Ingeniero Mecánico, Universidad Francisco de Paula Santander; magíster en Termodinámica de Fluidos, Universidad Rovira i Virgili de Tarragona; magíster en Gerencia de Empresas mención Industria de San Cristóbal; doctorando en Proyectos, con énfasis en Energías Alternativas; docente en la Universidad Santo Tomas, Tunja; experiencia docente de doce años como docente investigador desde el 2008; actualmente es coordinador del laboratorio de ingeniería mecánica donde realiza coinvestigación de este proyecto en desarrollo.
Correo electrónico: edwin.rua@usantoto.edu.co

Fernando Jiménez Diaz

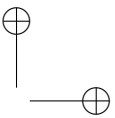
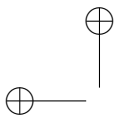
Ingeniero electrónico, Universidad Santo Tomas, Tunja; especialización en Automatización Industrial en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; se desempeñó como Joven investigador e innovador de Colciencias en la Universidad Santo Tomás durante un año; ejerció como docente investigador en el área de lógica de programación orientada a microcontroladores en la Universidad Santo Tomás; actualmente se desempeña como docente en las áreas de lógica de programación y electrónica en la Universidad Santo Tomás de Tunja, Colombia; investigador del grupo GIDINT donde realiza estudios sobre impresión 3D, prototipado rápido y fabricación digital.
Correo electrónico: fernando.jimenez@usantoto.edu.co

German Andrés Gutiérrez Arias

Ingeniero electrónico, Universidad Santo Tomás, Tunja; especialista en Ingeniería Mecánica y magíster en ingeniería de manufactura, Universidad Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México; actualmente se desempeña como docente investigador en la Universidad Santo Tomas, Tunja, con una experiencia docente de 7 años; es investigador del grupo GIDINT, donde realiza estudios sobre impresión 3D, prototipado rápido y fabricación digital.
Correo electrónico: german.gutierrez@usantoto.edu.co

Nelson Iván Villamizar

Ingeniero Mecánico, Universidad Antonio Nariño; especialización en Gerencia en Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander; estudiante de maestría en Gerencia de Mantenimiento, Universidad Industrial de Santander, Colombia.
Correo electrónico: nelson.villamizar@usantoto.edu.co



Perspective

A Conceptual Exploration of Pattern Formation in Social Self-Organized Systems

Una Exploración Conceptual de la Formación de Patrones en Sistemas Sociales Autorganizados

David Anzola^{*,1}

¹Centro de Innovación, Escuela de Administración, Universidad del Rosario

*Correspondence email: david.anzola@urosario.edu.co

Received: 06-09-2017. Modified: 23-11-2017. Accepted: 30-11-2017

Abstract

Context: The concept of self-organization plays a major role in contemporary complexity science. Yet, the current framework for the study of self-organization is only able to capture some of the nuances of complex social self-organizing phenomena.

Method: This article addresses some of the problematic elements in the study of social self-organization. For this purpose, it focuses on pattern formation, a feature of self-organizing phenomena that is common across definitions. The analysis is carried out through three main questions: where can we find these patterns, what are these patterns and how can we study these patterns.

Results: The discussion shows that there is a high level of specificity in social self-organized phenomena that is not adequately addressed by the current complexity framework. It argues that some elements are neglected by this framework because they are relatively exclusive to social science; others, due to the relative novelty of the studies on social complexity.

Conclusions: It is suggested that interdisciplinary collaboration between social scientists, complexity scientists and engineers is needed, in order to overcome traditional disciplinary limitations in the study of social self-organized phenomena.

Keywords: Self-organization, social complexity, pattern formation, agent-based modelling.

Language: Spanish.

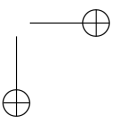
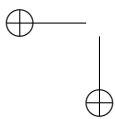
Open access



Cite this work as: D. Anzola, "A Conceptual Exploration of Pattern Formation in Social Self-Organized Systems", Ingeniería, vol. 23, no. 1, pp. 84-102, 2018.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12407>



Resumen

Contexto: El concepto de autoorganización juega un papel fundamental en las ciencias de la complejidad; sin embargo, dado el carácter diverso y decididamente práctico de dichas ciencias, el aparato teórico-metodológico que se ha desarrollado para la comprensión de la autoorganización no articula adecuadamente todos los elementos necesarios para el estudio de fenómenos sociales complejos.

Método: Este artículo ejemplifica algunas de las limitaciones del marco de la complejidad para el estudio de la autoorganización, centrándose en la formación de patrones, una característica transversal a las definiciones de autoorganización en diferentes áreas de conocimiento. La discusión se desarrolla a partir de tres preguntas básicas: ¿dónde están los patrones?, ¿qué son los patrones? y ¿cómo se estudian estos patrones?

Resultados: Para cada una de las preguntas anteriores, se muestra que existe un alto nivel de especificidad en los fenómenos sociales autoorganizados, que no es adecuadamente abarcado por el marco actual de las ciencias de la complejidad. Tal especificidad se encuentra relacionada, por un lado, con aspectos que no se han discutido dentro de las ciencias de la complejidad porque son exclusivos de las ciencias sociales y, por el otro, con aspectos que no han sido analizados robustamente, dada la novedad histórica de los estudios en complejidad social.

Conclusiones: Es necesario entablar una colaboración interdisciplinaria que involucre investigadores dentro de las ciencias sociales, las ciencias de la complejidad y la ingeniería, con el fin de superar las limitaciones tradicionales para la comprensión de los fenómenos sociales complejos autoorganizados.

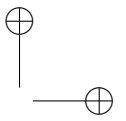
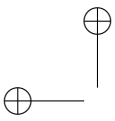
Palabras clave: Autoorganización, complejidad social, formación de patrones, simulación basada en agentes

Idioma: Español.

1. Introducción

El concepto de autoorganización juega un papel fundamental dentro del marco teórico-metodológico de las ciencias de la complejidad, ya que, junto con el concepto de emergencia, permite explicar transiciones micro-macro en los sistemas complejos. Dado el carácter interdisciplinario de las ciencias de la complejidad, no hay, naturalmente, una definición monolítica del concepto de autoorganización. Sin embargo, Gilbert *et al.* [1] sugieren que la mayoría de definiciones encontradas en la literatura de diferentes áreas disciplinares incluyen cuatro propiedades básicas en la articulación del concepto: formación de patrones, autonomía, robustez/resiliencia y dinámica. El concepto de autoorganización se usa para explicar cómo, en fenómenos complejos, la interacción *autónoma* de entidades en un nivel inferior produce, a partir de la *dinámica* del sistema, *patrones robustos* en un nivel superior.

Este artículo presenta un análisis crítico de la noción de autoorganización en ciencias sociales. El objetivo es mostrar que, si bien las cuatro propiedades identificadas por Gilbert *et al.* [1] son relativamente claras cuando se describen de manera general dentro del marco de las ciencias de la complejidad, su aplicación en áreas disciplinares específicas puede resultar problemática. Por limitaciones en extensión, el análisis se centrará solo en una de las propiedades mencionadas: formación de patrones. La selección se realizó bajo los supuestos, primero, de que la formación de patrones es la más básica de las cuatro propiedades, dado que los fenómenos autoorganizados son inicialmente identificados por los patrones que exhiben y, segundo, de que el análisis de dicha pro-



iedad permite, al mismo tiempo, explorar similitudes y diferencias entre las ciencias sociales y otras áreas disciplinares dentro del marco de la complejidad.

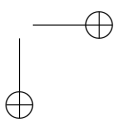
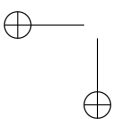
El texto sugiere que hay varios interrogantes sobre la formación de patrones en fenómenos sociales autoorganizados para los que no se encuentra una respuesta satisfactoria dentro del actual marco teórico-metodológico de las ciencias de la complejidad. Con el fin de abordar estos interrogantes, el texto se divide en seis secciones. La sección 2 discute la relación entre autoorganización, complejidad y ciencias sociales. A partir de esta discusión, la secciones 3, 4 y 5 analizan la formación de patrones por medio de tres preguntas básicas: ¿dónde están los patrones?, ¿qué son los patrones? y ¿cómo se modelan los patrones? Estas preguntas exploran desde diferentes ángulos la especificidad de las ciencias sociales dentro del marco de la complejidad y la autoorganización. La sección 6 finaliza el texto con algunas conclusiones. Algunas recomendaciones respecto al posible rol de la ingeniería en la comprensión y producción de fenómenos sociales autoorganizados son presentadas.

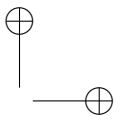
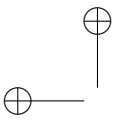
2. Rastreado la noción de ‘autoorganización’ en ciencias sociales

Dado que este artículo se centra en sistemas sociales complejos, el análisis se enfoca en los usos de ‘autoorganización’ que surgen o se emplean dentro del marco de las ciencias de la complejidad. Naturalmente, no puede plantearse un vínculo unívoco ente autoorganización y complejidad. Inicialmente, puede preguntarse por la historia. El concepto de autoorganización precede al de complejidad y sus orígenes son difíciles de rastrear. Algunos autores consideran que los cimientos básicos de la noción de la autoorganización provienen de los griegos [2]. Otros, por el contrario, prefieren referirse a autores modernos, como Descartes y, particularmente, Kant, quien fue el primero en usar el término en una acepción muy similar a la actual [3]. Independientemente de dónde se ubique el surgimiento histórico del concepto de autoorganización, es claro que ya estaba parcialmente articulado para la mitad del siglo veinte, momento para el cual, según diversas fuentes, se inserta dentro del marco de las ciencias de la complejidad [1], [4].

Los referentes disciplinares para el concepto de autoorganización en complejidad varían en la literatura; sin embargo, los autores mencionados regularmente pueden distinguirse porque, además de su trabajo en autoorganización, hacen referencia a otros elementos disciplinares importantes. Un ejemplo recurrente es Ashby [5], quien uso el término ‘autoorganización’ para referirse a la posibilidad de producir cambio autoinducido en la organización de una máquina. Dentro de la literatura en complejidad, Ashby es uno de los primeros referente disciplinares para el concepto de autoorganización, primero, por el énfasis que puso en la noción de sistema y su comportamiento componencial y, segundo, por la importante influencia que la cibernética tuvo en el desarrollo del marco teórico-metodológico de las ciencias de la complejidad.

Si bien el concepto de autoorganización antecede históricamente al desarrollo del marco teórico-metodológico de la complejidad, es dentro de este marco donde el concepto está más robustamente articulado. La vinculación del concepto de autoorganización con las ciencias de la complejidad tiene consecuencias distintivas en la comprensión del mismo, debido a dos características particulares del macro de las ciencias de la complejidad. Inicialmente, estas ciencias están poco integradas



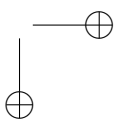
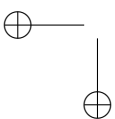


teóricamente: las diferentes áreas de estudio son decididamente empíricas, dejando a un lado la construcción teórica y filosófica. De igual forma, están centradas más en el uso de modelos, que, en comparación con teorías, son contextuales y generalmente involucran un alto contenido subjetivo [6]–[8]. Por otro lado, la agenda filosófica de la complejidad es, en gran medida, exclusiva y en pocos casos se ha estudiado comparativamente. La literatura sobre complejidad usualmente discute el carácter paradigmático de las ciencias de la complejidad y el evidente rompimiento que se genera con los supuestos filosóficos de la ciencia clásica [9]–[11]. Sin embargo, no se ha hecho mucho esfuerzo en delimitar lo que constituye novedad para las diferentes ramas del saber. El énfasis en el rol del investigador, por ejemplo, por su posible impacto en la medición, no es novedoso para las ciencias sociales, si bien puede serlo para otras áreas de estudio [12], [13].

Como resultado de las características distintivas del marco de la complejidad anteriormente mencionadas, se puede evidenciar, primero, que la noción de autoorganización dentro de este marco está fragmentada y depende de manera significativa del objeto y método de estudio y, segundo, que la noción es, en parte, exclusiva y poco conocida fuera de este marco. Esta exclusividad en la comprensión del concepto de autoorganización fue evidenciada, para el caso de las ciencias sociales, por el estudio realizado por Anzola *et al.* [14]. En este artículo, los autores presentan una revisión sistemática del concepto de autoorganización en ciencias sociales. Según ellos, los usos de la noción de ‘autoorganización’ en ciencias sociales pueden agruparse en tres grandes categorías. En la primera, se encuentran aquellos usos del concepto que se refieren al término en su significado etimológico más sencillo, es decir, por la unión del prefijo ‘auto’ y ‘organización’. La segunda categoría agrupa los usos que adelantan o están enmarcados dentro de un marco teórico-metodológico propio de una investigación específica, pero no el de la complejidad. En la tercera categoría, finalmente, se incluyen los usos que hacen referencia directa al marco de la complejidad.

Una de las conclusiones más importantes de la revisión es que hay muy pocos trabajos que pueden incluirse dentro del tercer grupo, es decir, aquel que referencia explícitamente las ciencias de la complejidad. Esto, aclaran los autores, no significa que las ciencias sociales no se hayan preocupado históricamente por el problema de la autoorganización. La ausencia de fertilización cruzada entre las ciencias de la complejidad y las ciencias sociales tradicionales, aseguran, se debe, más bien, a que, en ciencias sociales, la preocupación por la autoorganización está enmarcada dentro del uso de conceptos que han jugado un rol disciplinarizante, como ‘orden’ en sociología y ‘equilibrio’ en economía, o conceptos que en las últimas décadas han adquirido un considerable carácter interdisciplinar en ciencia social, como ‘organización’ e ‘institución’.

En el caso de las ciencias sociales, puede citarse una razón adicional, relacionada con la forma como estas disciplinas se han acercado históricamente al problema de la complejidad. A diferencia de las ciencias naturales, biológicas o artificiales, donde la complejidad está necesariamente asociada al paradigma de la computación [15], [16], las ciencias sociales han incorporado una parte significativa del aparato filosófico de la complejidad, particularmente en ontología y epistemología, sin necesariamente comprometerse con todos los elementos metodológicos que son comunes en otras áreas del conocimiento, entre ellos, la simulación computacional. El movimiento postmodernista en ciencias sociales, por ejemplo, reconstruye (y deconstruye) la complejidad como el rompimiento con la ciencia clásica, pero lo hace siempre desde el punto de vista teórico y filosófico [17]. Por otra parte, en algunas áreas de las ciencias sociales donde el enfoque es procesual o basado en casos, la



complejidad ha tenido un importante impacto metodológico, pero el acercamiento a los fenómenos de interés todavía hace uso de herramientas propias de ciencias sociales, mayormente cualitativas, que no son comunes en otras áreas de conocimiento dentro de las ciencias de la complejidad [18], [19].

Esta separación entre ciencias sociales y ciencias de la complejidad ha limitado parcialmente la aplicación del concepto de autoorganización en el estudio de fenómenos sociales, pues hay importantes desarrollos teórico-metodológicos de las ciencias de la complejidad que, a pesar de su utilidad potencial, no se han transferido a la ciencia social tradicional, pero hay, también, preguntas con respecto a la autoorganización en sistemas sociales complejos que no se han respondido dentro del marco de las ciencias de la complejidad, dado que son interrogantes, hasta cierto punto, exclusivos a las ciencias sociales e.g. que los seres humanos pueden percibir los patrones, reflexionar y reaccionar a ellos. En la siguiente sección se muestra cómo la fragmentación teórico-metodológica del concepto de autoorganización dentro del marco de la complejidad ha evitado, hasta ahora, abordar preguntas que son importantes para el estudio y comprensión de sistemas sociales complejos.

3. ¿Dónde están los patrones?

Los fenómenos autoorganizados generalmente se identifican a partir de la presencia de patrones a nivel macro, que surgen de la interacción en un nivel inferior. Hay varias preguntas relacionadas con la formación de patrones en fenómenos sociales complejos sobre las que, en principio, podría generarse una amplia discusión. La primera de estas preguntas se centra en dónde se encuentran estos patrones. Inicialmente, puede hacerse una distinción entre patrones en los fenómenos y en los datos. Los patrones en fenómenos pueden, al mismo tiempo, dividirse entre patrones en la estructura o en la dinámica del fenómeno. En el caso de las ciencias sociales, los patrones en la estructura pueden dividirse también entre elementos estructurales asociados con la acción y elementos estructurales externos, como tiempo y espacio. Eventualmente, podrían generarse una gran cantidad de tipologías. Las categorías mencionadas anteriormente (representadas gráficamente en Figura 1), sin embargo, reflejan, quizá, los aspectos más básicos de la formación de patrones en ciencias sociales.

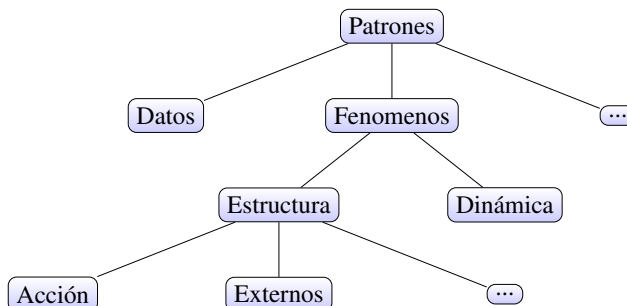
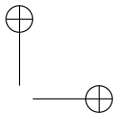
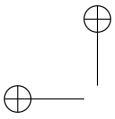


Figura 1. Patrones en sistemas sociales autoorganizados

La pregunta sobre los elementos estructurales involucrados en la formación de patrones en sistemas sociales complejos cobra relevancia para la presente discusión si se tiene en cuenta el énfasis histórico, casi exclusivo, que las ciencias sociales han puesto en la acción y los actores [20], [21].

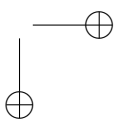
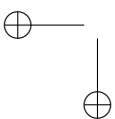


En lo que se refiere a la última distinción: entre aspectos estructurales que se relacionan directamente o son externos a la acción, es claro que varios fenómenos auto-organizados surgen de las propiedades o acciones de los individuos que componen el sistema. Un caso frecuente de estudio en complejidad social son los fenómenos de difusión e.g., de opinión, innovaciones, preferencias de mercado, entre otros [22]. El carácter autoorganizado de dichos fenómenos es ejemplificado por el popular modelo de dinámicas de opinión de Hegselmann y Krause [23]. Estos autores emplean una simulación basada en agentes en la que una población es creada con valores aleatorios en una variable numérica de intervalo, que representa una opinión. Cuando se ejecuta el modelo, los agentes cambian su opinión a partir del promedio de opiniones que se encuentran entre un intervalo limitado de confianza. Es decir, los agentes solo consideran opiniones que no son tan distantes cognitivamente de su propia opinión. Dependiendo del tamaño de los intervalos de confianza, el modelo produce tres posibles resultados: pluralidad, polarización y consenso (Figura 2). En el primero, una gran cantidad de opiniones subsisten; en el segundo, la población converge en solo dos opiniones, que, generalmente, son distantes en el espectro de opinión; en el tercero, todos los agentes se adhieren a una única opinión. En los fenómenos de difusión, los patrones que surgen del proceso de autoorganización son patrones en la distribución de opiniones dentro de la población.

Se encuentran, no obstante, varios casos en los que los patrones no están relacionados con actores, sus propiedades y sus acciones. La segregación espacial, que en la literatura ha sido ampliamente trabajada a través del modelo de segregación de Schelling [24], es un fenómeno bastante conocido. El modelo de Schelling, usualmente modelado con autómatas celulares, consta de una población dividida en dos grupos, distribuidos aleatoriamente en una matriz. En cada turno, cada individuo evalúa su vecindario, generalmente las ocho celdas que lo rodean, y, dependiendo de un porcentaje deseado de similitud (esto es, de vecinos que pertenecen al mismo grupo), decide si moverse a un espacio libre de la matriz o quedarse donde está. El modelo se popularizó porque patrones claramente identificables de segregación espacial aparecían entre las dos poblaciones, incluso cuando el modelo es corrido con porcentajes deseados de similitud generalmente bajos (Figura 2). Aunque el modelo supone la interacción entre los agentes, el patrón de interés en este caso es espacial. Este patrón depende de la interacción de los agentes, pero también de la configuración espacial y el principio subyacente de asimetría espacial entre los agentes.

Si bien ambos modelos, el de Hegselmann y Krause y el de Schelling, generan patrones de agrupación/segregación, el primero lo hace en un espacio cartesiano, mientras el segundo lo hace en un espacio físico. Como se dijo anteriormente, este tipo de distinción en el contexto de fenómenos complejos autoorganizados cobra importancia para las ciencias sociales por la tendencia a explicar el mundo social en términos de acciones o estados cognitivos de los actores, dejando a un lado lo material y lo natural. Una de las ventajas importantes proporcionadas por los métodos empleados en el estudio de sistemas complejos es que estos métodos permiten incorporar varios elementos que trascienden a los actores y sus acciones. La simulación basada en agentes, por ejemplo, permite crear un mundo artificial con correspondencia ontológica entre los objetos del modelo y los del mundo real, en el que tanto la producción humana, como los diferentes elementos naturales, pueden ser modelados [25].

La comprensión de los elementos constitutivos de los fenómenos sociales autoorganizados, entonces, probablemente requiera un mayor diálogo teórico y metodológico entre las ciencias sociales



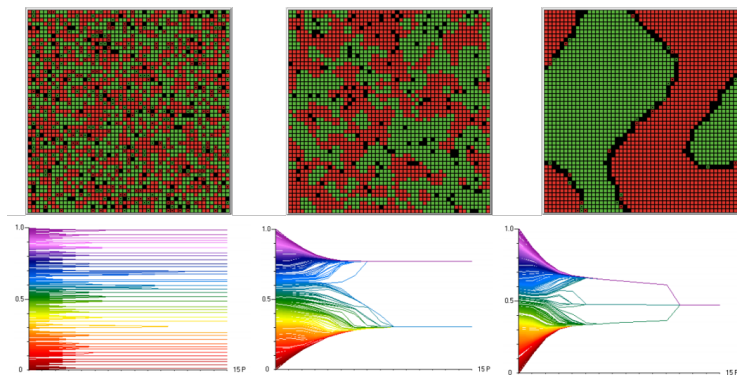
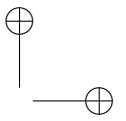
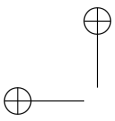


Figura 2. Arriba: el modelo de Schelling [24] (gráficos generados por Netlogo [26], [27]). Población inicial (izquierda), resultados con similitud deseada en 30 % (centro) y similitud deseada al 70 % (derecha). Abajo: el modelo de Hegselmann y Krause [23]. Pluralidad (izquierda), polarización (centro) y consenso (derecha).

tradicionales y las ciencias de la complejidad. Mientras estas últimas pueden contribuir con elementos metodológicos que facilitan la representación de los patrones, las primeras pueden aportar un conocimiento disciplinar que, por el carácter interdisciplinar de las ciencias de la complejidad, está actualmente ausente en la conceptualización del concepto de autoorganización. Dado el carácter material de los métodos computacionales empleados para la aproximación a los fenómenos complejos, la comprensión computacional también depende de los avances en materia ingenieril. Varias de las extensiones con las que se ha mostrado la robustez del mecanismo subyacente de asimetría espacial del modelo de Schelling hacen uso de modelos en donde hay una representación espacial con alto nivel de realismo [28]. Generar estas representaciones, sin embargo, requirió inicialmente de un avance ingenieril en términos del desarrollo de sistemas híbridos que combinan modelos basados en agentes y sistemas de información geográfica [29].

Con respecto a la distinción entre patrones en la estructura y la dinámica de los fenómenos, de nuevo, puede verse en la literatura que hay sistemas que se consideran autoorganizados por su resultado, como la segregación espacial en el modelo de Schelling, explicado anteriormente. También otros fenómenos en los que patrón autoorganizado se asocia con la dinámica. Axelrod [30], por ejemplo, empleó un modelo basado en un dilema de prisionero iterado, en el que diferentes estrategias creadas por expertos en teoría de juegos fueron enfrentadas entre sí en dos torneos de todos contra todos, en rondas de 600 iteraciones. El modelo se popularizó gracias al inesperado ganador: una técnica bastante simple, denominada *tit-for-tat* (en español puede traducirse como ‘ojo por ojo’), que cooperaba en el primer turno y, a partir de ahí, replicaba la elección de su contrincante en el turno anterior. Los modelos de juegos iterados producen autoorganización como resultado del proceso de interacción que, eventualmente, permite a estrategias altruistas obtener los mejores resultados acumulados. A partir de este énfasis en la dinámica es que Axelrod [31] concluyó que las estrategias más efectivas eran aquellas que no eran las primeras en desertar y las que podían perdonar al oponente después de una deserción. Aquellas que no cumplían con estas dos características, corrían el riesgo de entrar en cadenas largas o interminables de deserción, reduciendo de manera significativa el puntaje al final del juego. Es posible que un patrón en la estructura tenga un correlato o pueda convertirse a un patrón en la dinámica y viceversa. No obstante, la distinción no



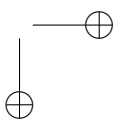
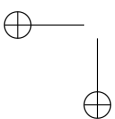
es trivial, ya que la manera como decida reconstruirse este patrón tiene efectos en las decisiones metodológicas, así como en la narrativa que se construye sobre el proceso de autoorganización del fenómeno en cuestión. Estos dos elementos se trabajarán con mayor detalle en las próximas secciones.

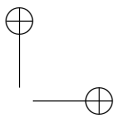
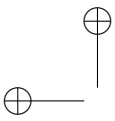
Finalmente, la distinción entre patrones en los fenómenos y patrones en los datos cobra relevancia en el contexto de construcción de los hechos científicos. Hay varios patrones autoorganizados en fenómenos complejos: las células de Bénard, los bancos de peces, los sistemas planetarios o los grafos aleatorios, que se identifican perceptualmente en el fenómeno de interés. La segregación espacial es un caso en las ciencias sociales: se organiza geográficamente a partir de interacciones entre individuos que generan reubicación espacial de los agentes insatisfechos con su situación. En las disciplinas sociales, los patrones en los fenómenos son interesantes porque los participantes, por sus características cognitivas, pueden responder a ellos. La segregación espacial está relacionada con diversos aspectos, como el acceso desigual a bienes y servicios públicos y sociales, y puede, también, generar segregación en niveles emergentes superiores, por ejemplo, cuando la institución educativa a la que se asiste es determinada por la ubicación de residencia [32]. Las personas que son afectadas por esta segregación pueden responder a sus efectos, entre otras cosas, cambiando de lugar de residencia para acceder a mejores colegios, cambiando así las características del patrón generado por una interacción previa.

Entre tanto, existen varios patrones que no están necesariamente caracterizados por elementos o propiedades perceptibles del fenómeno de interés. Un ejemplo paradigmático de estos patrones, bastante popular en las ciencias de la complejidad, son los atractores [7]. Los atractores, como su nombre lo sugiere, son conjuntos de valores sobre los cuales un sistema tiende a converger. La noción de atractor es tan importante dentro del contexto de la complejidad que el poder generativo de la autoorganización, consideran algunos autores, está ligada a la presencia de ciertos tipos de atractores [33], [34]. A diferencia de los patrones mencionados anteriormente, sin embargo, los atractores son patrones en un hiperespacio, es decir, se autoorganizan con relación a trayectorias de las mediciones del sistema.

Los patrones en datos exhibidos por muchos fenómenos complejos autoorganizados se encuentran en lo que Suppes [35] denomina como ‘modelos de datos’. Según él, no solamente las teorías están basadas en modelos. Los datos que se extraen de los fenómenos, igualmente, requieren de un tipo particular de modelo, pues no se construyen ni se interpretan a partir de un análisis de primer orden. Los datos también requieren del empleo de modelos que permitan articularlos en una forma coherente. Para realizar inferencias, es necesario construir un modelo que involucre desde actividades sencillas, como limpiar los datos, por ejemplo, para descontar casos extremos, hasta construir estructuras matemáticas que den cuenta de las supuestas relaciones entre estos datos. Muchos de los patrones que usualmente se consideran autoorganizados, tanto en ciencias sociales, como en otros fenómenos estudiados bajo el marco de la complejidad, son, en realidad, patrones en los datos, pues no dependen directamente de la percepción del fenómeno.

La percepción como criterio de demarcación puede considerarse problemática, pues, dependiendo del área, ambos tipos de modelos pueden ser difíciles de separar. El condensado Bose-Einstein es un reconocido fenómeno autoorganizado en física, que presenta una clara transición de fase [36].





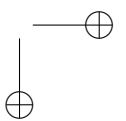
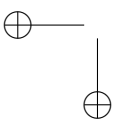
Dadas las dimensiones de las partículas físicas, este no es un fenómeno accesible a la percepción humana directa. Es reconstruido tecnológicamente, haciendo uso de datos y teorías que trascienden el campo de la física. El diseño y la ingeniería tienen un rol importante en la comprensión y (re)producción de fenómenos complejos autoorganizados, primero, porque algunos de estos fenómenos no son directamente perceptibles, segundo, porque el acceso a estos fenómenos es indirecto: a través de modelos, y, tercero, porque algunos elementos técnicos de estos modelos, por ejemplo, la visualización, se han hecho imprescindibles para la explicación [25], [37].

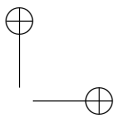
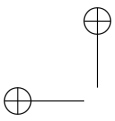
El carácter material del estudio de fenómenos complejos autoorganizados pueden llevar a cuestionar, hasta cierto punto, la separación entre perceptible en principio y en práctica y entre percepción directa y mediada por herramientas. No obstante, la distinción entre patrones en fenómenos y en datos es útil porque, como se verá en las siguientes secciones, por un lado, la percepción del investigador es fundamental para la conceptualización de la autoorganización y, por el otro, el proceso de modelado involucra una gran cantidad de conocimiento tácito e intuiciones sobre el fenómeno de interés, ligados, entre otras cosas, con la percepción. En las ciencias sociales, además, la distinción entre patrón en el fenómeno y en los datos es útil porque los patrones en datos no son necesariamente patrones que los agentes participantes puedan reconocer y frente a los cuales puedan reaccionar.

4. ¿Qué son los patrones?

La discusión de la sección anterior hace evidente que los juicios sobre qué tipo de patrones se asocian con fenómenos autoorganizados están mediados por una diversidad de cuestiones metafísicas que se encuentran poco estandarizadas. La pregunta sobre el carácter ontológico de los patrones en fenómenos autoorganizados es fundamental por dos razones. Inicialmente, la respuesta a esta pregunta depende de interpretaciones particulares, ligadas, generalmente, al área de estudio. Los patrones generados por fenómenos complejos son descritos de diferente forma en la literatura: como un incremento en la coordinación, una reducción de la entropía, un movimiento de estructuras simples a complejas, una reducción en los grados de libertad, entre otros [1]. Las variaciones en la definición de lo que es el patrón producido en procesos de autoorganización usualmente está ligada a la naturaleza del fenómeno que se está trabajando y al aparato teórico-metodológico empleado para su estudio.

En algunos casos, las cuestiones metafísicas son abarcadas o respondidas por medio del uso de aparatos conceptuales de carácter comprensivo. El concepto de entropía, por ejemplo, se originó en termodinámica, pero ha sido exitosamente adecuado a otras áreas de conocimiento, como la teoría de la información o la mecánica cuántica. Existen otras áreas dentro de las ciencias de la complejidad, sin embargo, donde la aplicación del concepto de entropía estaría limitada. Si bien se podría analizar un fenómeno social en términos de entropía, el empleo del concepto sería metafórico (e.g. [38]) o implicaría una reducción conceptual, por un lado, de lo social, con el fin de adecuar el problema a los modelos generados en otras áreas, como la termodinámica (e.g. [39]), o del concepto de entropía, que se usaría sin contenido semántico, con referencia exclusiva a la formulación de un modelo específico (e.g. [40]). Esto necesariamente impone restricciones en la manera como la noción de autoorganización es conceptualizada. En ciencias sociales, el uso del concepto de entropía requiere responder preguntas importantes, entre ellas, sobre formalización, que no son necesariamente problemáticas en otras áreas de conocimiento, donde existe consenso sobre las teorías

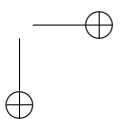
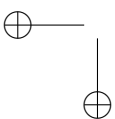


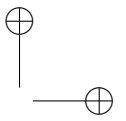
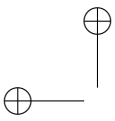


de la medición y las propiedades, reflejada, entre otras cosas, en un marco matemático generalizado para el estudio de los fenómenos de interés.

Dado el bajo nivel de formalización de la teoría social, muchos de los juicios sobre ontología en fenómenos sociales son resueltos metodológicamente. La metodología, por un lado, se usa para instanciar ciertas intuiciones metafísicas sobre los fenómenos de interés y, por el otro, para articular elementos disciplinares idiosincráticos dentro de la conceptualización de estos fenómenos. La literatura en complejidad, como se mencionó anteriormente, tiende a enfatizar las similitudes entre diferentes áreas problemáticas que convergen bajo este marco, con el fin de establecer diferencias entre las ciencias de la complejidad y la ciencia tradicional. Sin embargo, es claro que la complejidad está lejos de ser un paradigma robustamente unificado. Hay todavía varios elementos disciplinares que permean desigualmente la comprensión de los diferentes fenómenos complejos. Metafísicamente, la comprensión de fenómenos autoorganizados en cada área disciplinar tiene un alto nivel de especificidad que, generalmente, responde al desarrollo histórico de los métodos de investigación en las diferentes áreas disciplinares tradicionales. Incluso herramientas metodológicas que son hasta cierto grado exclusivas de la complejidad, como la simulación basada en agentes, exhiben estos elementos idiosincráticos de cada área de conocimiento. En ciencias sociales, por ejemplo, la noción computacional de ‘agente’ está influenciada por diferentes desarrollos en áreas como la psicología y la filosofía, generando un acercamiento metodológico a este tipo de simulación computacional que difiere filosóficamente del acercamiento en otras áreas de las ciencias de la complejidad [25]. En la simulación social, entre otras cosas, es visible una mayor preocupación por la arquitectura de los agentes, dado que algunos autores consideran que uno de los retos más importantes para la simulación por agentes en ciencias sociales es capturar en la simulación la mayor capacidad cognitiva de los seres humanos [8], [41].

En sistemas sociales complejos, además, las preguntas sobre la ontología de los patrones autoorganizados están relacionadas con intuiciones que involucran una gran cantidad de conocimiento tácito, que no ha sido sistemáticamente explorado. En ciencias sociales, la conceptualización de lo que es un proceso autoorganizado se encuentra mediada, hasta cierto punto, por las intuiciones relacionadas con el rol de la producción en los fenómenos sociales. La noción de producción aparece en teorías de causalidad para describir vínculos causa-efecto en donde, como su nombre lo indica, la relación causal está mediada por la producción o generación del efecto, no por probabilidades estadísticas o contrafácticos [42]. La teoría social introduce ontológicamente la noción de producción en la discusión sobre la acción y su efecto en la emergencia del mundo social. Intuiciones sobre producción, sin embargo, no pueden explorarse con varios métodos, particularmente de carácter cuantitativo, que no incluyen representaciones explícitas de agentes o instituciones, ni sus acciones. En comparación, la literatura sobre simulación basada en agentes generalmente se acerca a los fenómenos de interés en términos de producción. Es claro para los practicantes de simulación social, por ejemplo, que el patrón espacial en el modelo de Schelling depende de formas particulares de interacción: la decisión de los agentes de moverse tiene efectos directos en el porcentaje de similitud deseada de sus vecinos, generando ciclos de retroalimentación que pueden rastrearse retrospectivamente a partir de las acciones de cada agente. Aunque el modelo se interpreta sin hacer referencia a la producción, hay una comprensión implícita de la interdependencia entre las decisiones de los agentes, reconstruida en términos de emergencia, causalidad descendente, consecuencias inesperadas de la acción, entre otros. [43].

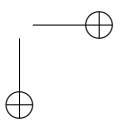
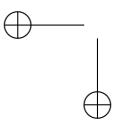


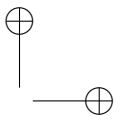
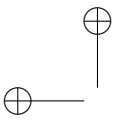


La segunda razón por la que la pregunta sobre ontología es importante es porque la autoorganización depende de manera significativa de la función atribuida al fenómeno de interés y de la perspectiva del investigador. Es poco probable que pueda siempre encontrarse una respuesta única y unívoca a lo que caracteriza metafísicamente al patrón de interés. Dependiendo de cómo se mire, un fenómeno se puede organizar frente a unos aspectos, pero desorganizarse en otros [14], [44]. Influye, inicialmente, la granularidad escogida para determinar, por un lado, niveles micro y macro del fenómeno y, por el otro, lo que se considera como estados del sistema. Igualmente, la función asociada con el sistema cumple un papel relevante. Cada función está particularmente ligada a un conjunto de variables que se considera de interés. El resto de variables son eventualmente relegadas a un segundo plano, construyendo una idea particular de lo que es el fenómeno, en general, y el patrón de interés, en particular. Gershenson y Heylighen [44] proponen el comportamiento de enjambre como un caso ejemplificante. Este comportamiento puede estudiarse en términos de la velocidad y la posición de los agentes. En este tipo de fenómenos se observa que, con el tiempo, los agentes ajustan sus velocidades para conservar una estructura espacial. Los estados del sistema, entonces, se concentran en el plano espacial, pero se hacen mucho más variables en el plano de la velocidad. Si el énfasis es en la posición, el sistema se autoorganiza; si es, por el contrario, en la velocidad, el sistema se desorganiza.

La granularidad y la función encuentran varios correlatos en el contexto social. En algunos casos, involucrando una amplia cantidad de variables, en diferentes niveles. La estratificación social, por ejemplo, se considera usualmente como un proceso autoorganizativo relacionado con la producción de jerarquías sociales. Estas jerarquías están asociadas con una gran cantidad de funciones económicas, políticas y sociales. La jerarquización política, entre otras cosas, permite el control social, a partir de la generación de instituciones formales de gobierno y la selección de personas que se dediquen tiempo completo a gobernar. Si bien las jerarquías políticas son, a nivel social, un proceso autoorganizativo que incrementa la eficiencia y la eficacia en el control político, a nivel individual, usualmente, genera diferentes formas de desigualdad, como salarial, educativa o residencial. Si el enfoque se pusiera en el nivel micro, difícilmente se podrían identificar los patrones autoorganizados producidos por procesos de estratificación social a nivel macro.

Los sistemas sociales complejos tienen una dimensión adicional relacionada con la función, que no es común en otros sistemas complejos. En fenómenos sociales, como se mencionó anteriormente, los agentes también pueden adscribir o percibir una función y reaccionar a ella. Esto tiene dos implicaciones importantes para las dinámicas de autoorganización. Por un lado, varias organizaciones humanas son creadas con una función específica, que puede estar formulada explícitamente y obtener reconocimiento, formal e informal, por parte de individuos dentro y fuera de la organización. Las empresas son, quizá, el ejemplo paradigmático. La explicitación de una función y el reconocimiento formal, usualmente, están asociados con intentos de control de las dinámicas de autoorganización en estas organizaciones [45]. Por otro lado, la función en algunos fenómenos también puede verse afectada por esfuerzos conscientes de cambio. Condiciones persistentes de inequidad política pueden generar apatía dentro de la población y, eventualmente, una disminución en la participación política, facilitando un cambio informal de la función de las organizaciones, por ejemplo, para beneficiar el enriquecimiento de los servidores públicos [46] o pueden, también, incrementar los niveles de insatisfacción al punto de promover el surgimiento de políticas contenidas que cambien formalmente la función de la organización [47].



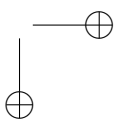
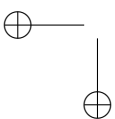


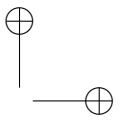
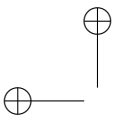
Funcionalmente, las características y conceptualización de patrones en fenómenos sociales auto-organizados depende, no solamente de la perspectiva del investigador, sino también de los participantes, pues estos pueden generar intentos de control o cambio del patrón y su dinámica que no son comunes en otras áreas del conocimiento. Es interesante, sin embargo, que los investigadores en las ciencias de la complejidad no han prestado mucha atención a esta forma particular de dinámicas adaptativas, probablemente, porque son distintivamente sociales. En teoría de juegos, por ejemplo, se ha explorado muy poco los efectos de cambiar con el tiempo la estructura de recompensa, a pesar de que es algo técnicamente trivial y reflejaría, de alguna manera, los cambios de interacción que uno podría esperar en sistemas sociales complejos. En este tipo de aspectos es, quizá, donde la fertilización cruzada con las ciencias sociales tradicionales pueda ser útil para las ciencias de la complejidad, pues lo que se requiere en este caso no son avances teórico-metodológicos en complejidad, sino información sobre las bases morales y cognitivas de los acuerdos interpersonales [14].

5. ¿Cómo se modelan los patrones?

Los aspectos ontológicos, dado el enfoque decididamente práctico de las ciencias de la complejidad, se manifiestan mayormente durante el proceso de modelado. Dentro de las ciencias de la complejidad se emplea una gran cantidad de formas de modelado que no necesariamente responden a la misma lógica. A través de las diferencias técnicas entre estas formas de modelado se hacen explícitas diferencias ontológicas que no son tan claras conceptualmente. Como se mencionó anteriormente, los conceptos de emergencia y autoorganización se usan de manera intercambiable en varios contextos. Sin embargo, hay una clara diferencia conceptual: ‘emergencia’ es normalmente usado para explicar el carácter no reducible o cualitativamente novedoso de los patrones a nivel de sistema¹, mientras ‘autoorganización’, por su parte, es utilizado para referirse al carácter no centralizado de la interacción que permite el surgimiento de los patrones. La razón por la que en muchos casos no se diferencian es que, conceptualmente, la mayoría los fenómenos que cumplen con una de estas características cumplen también con la otra. Metodológicamente, sin embargo, las diferencias entre emergencia y autoorganización pueden hacerse explícitas. La dinámica de sistemas, por ejemplo, es un tipo de modelado computacional en el que, a través de un sistema de ecuaciones diferenciales, se exploran procesos de flujos, niveles y ciclos causales de retroalimentación que, gráficamente, pueden interpretarse como patrones autoorganizados. La dinámica de sistemas, sin embargo, modela un único nivel. No hay un nivel micro en el que se genere interacción, por lo que sería una forma de modelado en la que no puede representarse la emergencia. La simulación basada en agentes, por el contrario, es una forma de simulación en la que hay una representación explícita de los agentes y su interacción con otros agentes o el entorno. Esta característica metodológica permite capturar, en oposición a la dinámica de sistemas, tanto la emergencia como la autoorganización.

¹La noción de emergencia es particularmente intrincada conceptualmente. Normalmente, se define a partir de un conjunto de atributos (por ejemplo, ‘novedad, impredecibilidad, superveniencia, relacionalidad y causalidad descendente’ [48] o ‘novedad radical, coherencia, comportamiento inter niveles, dinamismo y ostensividad’ [49]), que se articulan en varios supuestos de nivel ontológico, epistemológico y metodológico. Si bien no hay una definición monolítica y hay variaciones importantes respecto a sus implicaciones filosóficas, la idea de transición intranivel con algún grado de novedad es, quizá, el rasgo más distintivo.



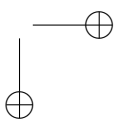
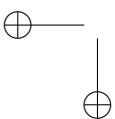


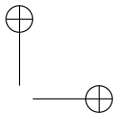
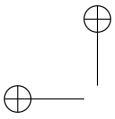
Además de las características técnicas, la narrativa construida alrededor de los modelos juega un papel fundamental. La dinámica de sistemas y la simulación basada en agentes son técnicas que permiten explorar de manera explícita el proceso que genera los patrones en fenómenos autoorganizados. Hay otros métodos, sin embargo, que han sido usados para estudiar la formación de patrones autoorganizados, pero no dan realmente cuenta de la dinámica que los genera. Las redes sociales son un método que permite estudiar sistemas en términos de agentes y sus relaciones. Muchas veces, los patrones representados con las redes se interpretan en términos de procesos autoorganizados, si bien el método no proporciona una representación explícita del proceso. Será importante para las ciencias sociales analizar todas estas posibilidades metodológicas, teniendo en cuenta ventajas y desventajas. La dinámica puede introducirse fácilmente en un análisis de redes, entre varias alternativas, si el modelo se implementa en una simulación basada en agentes. Dada la diversidad metodológica en ciencias sociales y la influencia mucho más rica del marco de la complejidad en las disciplinas sociales tradicionales, también podría ser interesante explorar formas de integración metodológica, como la combinación de métodos matemáticos o computacionales con métodos cualitativos centrados en el estudio de procesos: métodos histórico-comparativos o el rastreo de procesos.

Un análisis crítico de los diferentes métodos para el estudio de la formación de patrones autoorganizados en sistemas sociales puede también ayudar a avanzar la discusión sobre modelado científico, con relación a conceptos importantes como realismo o simpleza. Los autómatas celulares han sido históricamente una de las herramientas más famosas en el estudio y comprensión de la autoorganización, y la complejidad, en general. Obras clásicas, como la de Mandelbrot [50], ayudaron a identificar el carácter autoorganizativo de los fenómenos complejos. Más recientemente, Wolfram [51] fue más allá, al afirmar que los autómatas celulares son el fundamento para una nueva forma de ciencia. Sin embargo, a pesar del entusiasmo con el que los autómatas son empleados en varias áreas de las ciencias de la complejidad, en ciencias sociales, los autómatas son vistos más como una curiosidad computacional o como un ejercicio de pensamiento, pues las restricciones metodológicas, en términos de tiempo y espacios discretos y reglas simples de interacción, generalmente son consideradas muy fuertes para la comprensión de fenómenos sociales, en los que intervienen agentes con complejas estructuras cognitivas intrincadas y contextos complejos de interacción.

Es posible que la renuencia a usar cierto tipo de modelos se deba, en parte, a una limitada comprensión de las posibilidades y restricciones de las diferentes herramientas metodológicas que se han popularizado dentro del marco de la complejidad. No es claro de qué forma, ni hasta qué punto, diferentes métodos puedan capturar las intuiciones y creencias más importantes sobre la ontología de fenómenos sociales complejos. El modelo de Schelling, por ejemplo, es un autómata celular cuyos resultados han sido confirmados por diferentes replicaciones y extensiones que han incluido una cantidad mucho mayor de información empírica [28], [32]. Si bien el modelo original es extremadamente sencillo, es útil porque captura el mecanismo subyacente de asimetría espacial, que es el mismo con el que operan modelos mucho más robustos e intrincados de segregación espacial. No solamente es la regularidad con la que los resultados se confirman, sino también el carácter contraintuitivo de estos resultados iniciales.

El modelo de Schelling mostró que la segregación espacial puede ocurrir en poblaciones con opiniones moderadas con respecto a la segregación. A pesar de sus limitaciones para generar pre-

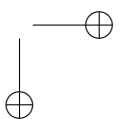
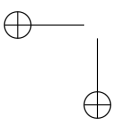


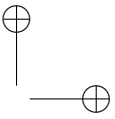
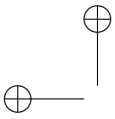


dicción y control, el modelo influenció significativamente la discusión sobre políticas residenciales, dado que permite entender de manera sencilla el funcionamiento de un fenómeno social complejo. La utilidad de un modelo, por su carácter contextual y subjetivo, está ligada más a la satisfacción de los objetivos establecidos para su diseño, operación y comunicación, que a la capacidad de representar robusta y fidedignamente un fenómeno de interés [52]. Una representación realista solo es necesaria para lograr ciertos objetivos, como la predicción, pero no todos. Esto es algo en lo que las ciencias sociales, y quizá también las ciencias de la complejidad, tienen que avanzar un poco más. Una noción, hasta cierto punto, positivista del modelado todavía domina los supuestos respecto a los criterios con los que se juzga si un modelo es bueno [25].

Las herramientas computacionales, que juegan un rol clave en las ciencias de la complejidad, también son interesantes porque muestran las limitaciones del intelecto humano, incluso cuando existen altos niveles de experticia. En principio, podría parecer sorprendente que la estrategia *tit-for-tat* haya resultado ganadora en el segundo torneo realizado por Axelrod, dado que los participantes contaban con los resultados del primer torneo. Sin embargo, si se tiene en cuenta la cantidad de información que los expertos habrían tenido que procesar para evaluar la calidad de sus estrategias, el resultado es, en parte, comprensible. A pesar de que la teoría de juegos precede la simulación de Axelrod por varias décadas, nadie había explorado las condiciones del surgimiento del comportamiento cooperativo en juegos iterados, debido a las limitaciones en computación que tienen los seres humanos. Sería difícil para alguien sin la ayuda de un computador explorar la gran cantidad de posibilidades que pueden darse en términos estratégicos, dependiendo de las características estructurales del juego, y prever que, en un juego iterado, la emergencia de la cooperación puede ser un resultado natural de la interacción [53].

La relación entre la ontología de los procesos sociales autoorganizados y su modelado es, quizá, uno de los interrogantes más importantes mirando hacia el futuro. Históricamente, se ha considerado que la complejidad de las sociedades humanas está ligada a la complejidad cognitiva (e.g. [54]) o comunicativa (e.g. [55]) de los seres humanos. Sin embargo, como se discutió anteriormente, los modelos de Schelling y Axelrod, entre otros, se han convertido en paradigmáticos porque el nivel de realismo de un modelo no necesariamente determina su utilidad. En parte, esto se debe a que las herramientas metodológicas tradicionales no permitían comprender adecuadamente el efecto de la interacción que, por lo que han mostrado los diferentes desarrollos en las ciencias de la complejidad, es clave para la comprensión de la emergencia y la autoorganización. Al mismo tiempo, también será necesario que los científicos sociales reevalúen la necesidad de que los modelos representen fidedignamente la realidad. Modelos de mercados financieros utilizando agentes sin inteligencia, por ejemplo, han logrado reproducir varias de las dinámicas más importantes de estos mercados [56], lo que lleva a la pregunta sobre qué es, con certeza, metafísicamente importante en estos fenómenos. Si las características cognitivas y comunicativas de los seres humanos juegan un rol menos importante del que normalmente se les atribuye en procesos de autoorganización, sería necesario reevaluar los principios filosóficos con los que operan varios de los métodos de investigación en ciencia social.





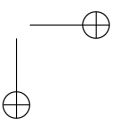
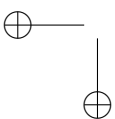
6. Conclusiones

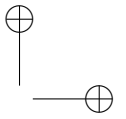
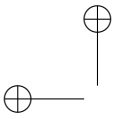
La formación de patrones ha sido identificada como una de las propiedades más importantes de los fenómenos complejos autoorganizados. Este texto exploró críticamente este concepto para el caso de las ciencias sociales, bajo la creencia de que hay, al mismo tiempo, desarrollos teórico-metodológicos de las ciencias de la complejidad que no se han transferido a la ciencia social tradicional y preguntas relacionadas con la autoorganización en sistemas sociales complejos que no se han respondido dentro del marco de las ciencias de la complejidad. Para esto, la segunda sección discutió la relación entre los conceptos autoorganización y complejidad en ciencias sociales. Se afirmó que, dado que las ciencias de la complejidad están poco integradas teóricamente y su agenda filosófica es relativamente exclusiva, la conceptualización de la noción de autoorganización dentro del marco de la complejidad está fragmentada, pero es, al mismo tiempo, poco conocida fuera de este marco.

Para ejemplificar esta afirmación se discutió la formación de patrones desde tres aspectos diferentes. En el primer caso, se analizó en qué se enfocan los investigadores cuando identifican un sistema complejo autoorganizado. La literatura muestra gran variabilidad vinculando los patrones en fenómenos sociales complejos con diversos elementos, como la estructura, la dinámica, el fenómeno o su reconstrucción empírica. Para el caso de las ciencias sociales hay una tipología adicional, relacionada con la cuestión de si el patrón está vinculado con agentes y acciones o con elementos externos. El análisis presentado muestra que los patrones autoorganizados no pueden asociarse unívocamente con alguno de los elementos de las diferentes tipologías. Sugiere, sin embargo, que la forma en que se identifiquen los patrones tiene implicaciones importantes sobre la forma en que los patrones son conceptualizados metafísicamente.

La cuarta sección exploró algunas de estas implicaciones ontológicas. Mostró, inicialmente, que la manera como se respondan preguntas ontológicas sobre qué es un patrón en un fenómeno autoorganizado depende, primero, del área de estudio y su tradición teórico-metodológica particular y, segundo, de los objetivos del modelo y la perspectiva del investigador. En lo que se refiere al área de estudio, si bien hay aspectos ontológicos transversales dentro del marco de la complejidad, todavía existe un alto nivel de especificidad. En ciencias sociales, se afirmó, la discusión sobre 'agencia' es mucho más elaborada que en otras áreas, pues conecta con los desarrollos de disciplinas como la psicología y la filosofía. Frente a la función del modelo y la perspectiva del investigador se sugirió que la autoorganización es una propiedad que depende de dos aspectos: la granularidad y los niveles analizados, ya que un fenómeno puede organizarse en unos aspectos, pero desorganizarse en otros, y de la función que se le adscriba al fenómeno, pues esa función dará pautas sobre a cuáles elementos prestarle más atención. En el caso de las ciencias sociales, además, la función también puede ser creada, percibida y cambiada por los agentes.

La última sección estudió de qué manera las cuestiones ontológicas se manifiestan durante el proceso de modelado, dado el enfoque mayormente práctico de las ciencias de la complejidad. Se discutió, por un lado, cómo las características técnicas y la narrativa generada alrededor de un cierto tipo de modelo permite instanciar de maneras particulares intuiciones o supuestos ontológicos sobre lo que es un fenómeno autoorganizado y, por el otro, cómo una reflexión crítica sobre las ventajas y desventajas de los diferentes métodos popularizados dentro del marco de la complejidad



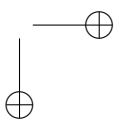
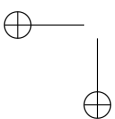


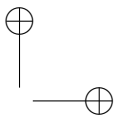
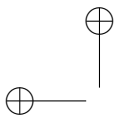
puede ayudar a construir una mejor ontología de lo social, con relación a los conceptos de interacción y proceso y a la práctica general de modelado científico.

Las tres preguntas abarcadas en el texto muestran que, si bien dentro del marco de la complejidad hay un aparato teórico-metodológico parcialmente desarrollado para el estudio de la autoorganización, junto con varios ejemplos empíricos que confirman la aplicabilidad de este marco, hay aspectos de los sistemas sociales complejos que son pobremente abarcados por este aparato general de la complejidad. Varios de estos aspectos no se han discutido dentro de las ciencias de la complejidad porque son exclusivos de las ciencias sociales, otros no han sido completamente analizados dada la novedad histórica de los estudios en complejidad social. Es probable que, para responder satisfactoriamente estos interrogantes sobre fenómenos sociales autoorganizados, sea necesario un incremento en la fertilización cruzada entre ciencias de la complejidad y ciencias sociales tradicionales. Para esto, hay varios retos que deben superarse, como que la mayor parte de la discusión sobre autoorganización en ciencias sociales tradicionales no use el término ‘autoorganización’ [14] o que mucha de la producción sobre complejidad social no permee las ciencias sociales tradicionales [57]. Si bien estos retos suponen una cantidad significativa de trabajo, es claro que el desarrollo potencial, tanto en teoría como en métodos, es incentivo suficiente para los investigadores en ambos bandos se esfuercen por entablar un diálogo.

Una mayor fertilización cruzada con diversas ramas de la ingeniería también podría tener un efecto importante en el acercamiento a fenómenos sociales autoorganizados. Como se mencionó antes, en parte, la posibilidad de estudiar ciertos fenómenos sociales depende de las características técnicas de las herramientas de modelado. Hacia el futuro, por ejemplo, el estudio de la autoorganización social podría beneficiarse significativamente de los progresos en capacidad de computación. Cuanto más robusta sea la infraestructura tecnológica, más diversas las posibilidades de modelado de estos fenómenos. De la misma forma, la epistemología y la ontología en ciencias de la complejidad están fuertemente permeadas por metodología, así que es probable que los avances técnicos tengan, al mismo tiempo, efectos sobre el acercamiento filosófico a estos fenómenos.

Adicionalmente, los desarrollos ingenieriles pueden impactar, directa o indirectamente, las posibilidades de control y cambio de fenómenos sociales autoorganizados. Los desarrollos tecnológicos pueden influir en procesos autoorganizados de tres maneras fundamentales. Inicialmente, es claro que varios fenómenos sociales autoorganizados ocurren en sistemas socio-técnicos. La comunicación humana, por ejemplo, está mediada en la mayoría de los contextos por diversas herramientas tecnológicas, que han cambiado de manera significativa el carácter de estos fenómenos (e.g. [40]). En este primer caso, la tecnología es medio y recurso en el proceso de autoorganización. Hay una segunda instancia donde la tecnología puede tomar un rol más agencial y articularse de manera directa un proceso autoorganizativo o afectar su función. Los sistemas para el soporte de las decisiones en las empresas, entre otros, son tecnologías que, a través de mecanismos puramente automatizados o híbridos, se articulan en procesos autoorganizativos en varios niveles, con el fin de facilitar el control (e.g. [58]). Finalmente, hay desarrollos en ingeniería que pueden transferirse al terreno de lo social, para facilitar el control y cambio de fenómenos autoorganizados. En algunas ramas de la ingeniería, por ejemplo, se habla de autoorganización guiada, haciendo referencia a mecanismos que permiten, como su nombre lo indica, guiar el proceso de autoorganización hacia ciertos patrones o resultados (e.g. [59]). Estas técnicas, que en ingeniería han sido ampliamente





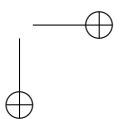
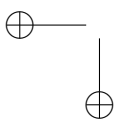
exploradas, apenas se mencionan en el contexto social. Dada la importancia que el cambio y el control tienen en algunas organizaciones humanas, sería interesante explorar qué tan efectivas pueden resultar estas técnicas en lo social.

Agradecimientos

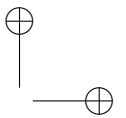
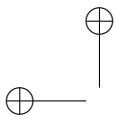
Agradecimientos a Nelson Gómez por los comentarios a una versión anterior de este artículo.

Referencias

- [1] N. Gilbert, D. Anzola, P. Johnson, C. Elsenbroich, T. Balke, and O. Dilaver, "Self-Organizing Dynamical Systems," in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, J. Wright, Ed. Oxford: Elsevier, 2015 ↑. [85](#), [86](#), [92](#)
- [2] G. Kirk, "Natural Change in Heraclitus," *Mind*, vol. 60, no. 237, pp. 35–42, 1951. <https://doi.org/10.1093/mind/LX.237.35> ↑. [86](#)
- [3] E. Keller, "Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part One," *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 38, no. 1, pp. 45–75, 2008. <https://doi.org/10.1525/hsns.2008.38.1.45> ↑. [86](#)
- [4] —, "Organisms, Machines, and Thunderstorms: A History of Self-Organization, Part Two. Complexity, Emergence, and Stable Attractors," *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 1–31, 2009 <https://doi.org/10.1525/hsns.2009.39.1.1> ↑. [86](#)
- [5] W. Ashby, "Principles of the Self-Organizing Dynamic System," *The Journal of General Psychology*, vol. 37, pp. 125–128, 1947 <https://doi.org/10.1080/00221309.1947.9918144> ↑. [86](#)
- [6] J. Miller and S. Page, *Complex Adaptive Systems*. New Jersey: Princeton University Press, 2007 ↑. [87](#)
- [7] M. Mitchell, *Complexity: A Guided Tour*. Oxford: Oxford University Press, 2009 ↑. [87](#), [91](#)
- [8] P. Davidsson, F. Klügl, and H. Verhagen, "Simulation of Complex Systems," in *Springer Handbook of Model-Based Science*, L. Magnani and T. Bertolotti, Eds. Berlin: Springer, 2017 ↑. [87](#), [93](#)
- [9] P. Coveney and R. Highfield, *Frontiers of Complexity: The Search for Order in a Chaotic World*. New York: Ballantine Books, 1996 ↑. [87](#)
- [10] M. Reed and D. Harvey, "The New Science and the Old: Complexity and Realism in the Social Sciences," *Journal for the Theory of Social Behaviour*, vol. 22, no. 4, pp. 353–380, 1992 <https://doi.org/10.1111/j.1468-5914.1992.tb00224.x> ↑. [87](#)
- [11] J. Urry, *Global Complexity*. London: Blackwell, 2003 ↑. [87](#)
- [12] G. Delanty, "The Foundations of Social Theory," in *The New Blackwell Companion to Social Theory*, B. Turner, Ed. London: Wiley-Blackwell, 2009 ↑. [87](#)
- [13] G. Mobus and M. Kalton, *Principles of Systems Science*. Berlin: Springer, 2015 <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1920-8> ↑. [87](#)
- [14] D. Anzola, P. Barbrook-Johnson, and J. Cano, "Self-Organization and Social Science," *Computational and Mathematical Organization Theory*, vol. 23, no. 2, pp. 221–257, 2017 <https://doi.org/10.1007/s10588-016-9224-2> ↑. [87](#), [94](#), [95](#), [99](#)
- [15] C. Cioffi-Revilla, *Introduction to Computational Social Science*. Berlin: Springer, 2016 ↑. [87](#)
- [16] K. Mainzer, *Thinking in Complexity*. Berlin: Springer, 2007 ↑. [87](#)
- [17] P. Cilliers, *Complexity and Postmodernism*. London: Routledge, 1998 ↑. [87](#)
- [18] D. Byrne, *Complexity Theory and the Social Sciences*. London: Routledge, 1998 ↑. [88](#)
- [19] R. Anderson, B. Crabtree, D. Steele, and R. McDaniel, "Case Study Research: The View From Complexity Science," *Qualitative Health Research*, vol. 15, no. 5, pp. 669–685, 2005 <https://doi.org/10.1177/1049732305275208> ↑. [88](#)
- [20] J. Martin, *The Explanation of Social Action*. Oxford: Oxford University Press, 2011 ↑. [88](#)
- [21] L. Udehn, *Methodological Individualism. Background, History and Meaning*. London: Routledge, 2001 ↑. [88](#)



- [22] A. Flache, M. Mäs, T. Feliciani, E. Chattoe-Brown, G. Deffuant, S. Huet, and J. Lorenz, “Models of Social Influence: Towards the Next Frontiers,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 20, no. 4, 2017 ↑. [Online]. Available: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/20/4/2.html> 89
- [23] R. Hegselmann and U. Krause, “Opinion Dynamics and Bounded Confidence: Models, Analysis and Simulation,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 5, no. 3, 2002 ↑. [Online]. Available: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/2.html> 89, 90
- [24] T. Schelling, “Dynamic Models of Segregation,” *Journal of Mathematical Sociology*, vol. 1, no. 2, pp. 143–186, 1971 <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794> ↑. 89, 90
- [25] D. Anzola, “The Philosophy of Computational Social Science,” Ph.D. dissertation, Department of Sociology, University of Surrey, UK, 2015 ↑, uRL: <http://epubs.surrey.ac.uk/id/eprint/808102>. [Online]. Available: <http://epubs.surrey.ac.uk/id/eprint/808102> 89, 92, 93, 97
- [26] U. Wilensky, *NetLogo Segregation Model*. [Computer software]. Evanston: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, 1997 ↑. [Online]. Available: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Segregation> 90
- [27] —, *NetLogo*. [Computer software]. Evanston: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, 1999 ↑. [Online]. Available: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> 90
- [28] M. Fossett and D. Dietrich, “Effects of City Size, Shape, and Form, and Neighborhood Size and Shape in Agent-Based Models of Residential Segregation: Are Schelling-Style Preference Effects Robust?” *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 36, no. 1, pp. 149–169, 2009 <https://doi.org/10.1068/b33042> ↑. 90, 96
- [29] A. Crooks and C. Castle, “The Integration of Agent-Based Modelling and Geographical Information for Geospatial Simulation,” in *Agent-Based Models of Geographical Systems*, A. Heppenstall, A. Crooks, L. See, and M. Batty, Eds. Berlin: Springer, 2012 ↑. 90
- [30] R. Axelrod, *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books, 1984 ↑. 90
- [31] —, “Effective Choice in the Prisoner’s Dilemma,” *The Journal of Conflict Resolution*, vol. 24, no. 1, pp. 3–25, 2009 ↑. 90
- [32] E. Bruch and R. Mare, “Segregation Dynamics,” in *The Oxford Handbook of Analytical Sociology*, P. Hedström and P. Bearman, Eds. Oxford: Oxford University Press, 2009 ↑. 91, 96
- [33] J. Skår, “Introduction: Self-Organization as an Actual Theme,” *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering sciences*, vol. 361, no. 1807, pp. 1049–1056, 2003 ↑. 91
- [34] C. Maldonado, “Transformación de la no-Complejidad a la Complejidad,” *Ingeniería*, vol. 21, no. 3, pp. 411–426, 2016 ↑. 91
- [35] P. Suppes, “Models of Data,” in *Logic, Methodology, and Philosophy of Science*, E. Nagel, P. Suppes, and A. Tarski, Eds. Stanford: Stanford University Press, 1962 ↑. 91
- [36] M. Morrison, *Reconstructing Reality*. Oxford: Oxford University Press, 2015 <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199380275.001.0001> ↑. 91
- [37] D. Gooding, “Visualisation, Inference and Explanation in the Sciences,” in *Multidisciplinary Approaches to Visual Representations and Interpretations*, G. Malcolm, Ed. London: Elsevier, 2004 ↑. 92
- [38] K. Bailey, *Social Entropy Theory*. Albany: State University of New York Press, 1990 ↑. 92
- [39] S. Galam, *Sociophysics*. New York: Springer, 2012 <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2032-3> ↑. 92
- [40] K. Zhao, M. Karsai, and G. Bianconi, “Entropy of Dynamical Social Networks,” *PLoS ONE*, vol. 6, no. 12, p. e28116, 2011 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0028116> ↑. 92, 99
- [41] N. Gilbert, “When Does Social Simulation Need Cognitive Models?” in *Cognition and Multi-Agent Interaction*, R. Sun, Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006 ↑. 93
- [42] G. Anscombe, “Causality and Determination,” in *Causation*, E. Sosa and M. Tooley, Eds. Oxford: Oxford University Press, 1993 ↑. 93
- [43] E. Chattoe-Brown, “Why Sociology Should Use Agent Based Modelling,” *Sociological Research Online*, vol. 18, no. 3, 2013 ↑. [Online]. Available: <http://www.socresonline.org.uk/18/3/3.html> 93
- [44] C. Gershenson and F. Heylighen, “When Can We Call a System Self-Organizing?” in *Advances in Artificial Life. ECAL 2003. Lecture Notes in Computer Science, vol 2801*. Berlin: Springer, 2003 ↑. 94
- [45] L. Bohórquez Arévalo, “La Comprensión de las Organizaciones Empresariales y su Ambiente como Sistemas de Complejidad Creciente: Rasgos e Implicaciones,” *Ingeniería*, vol. 21, no. 3, pp. 363–377, 2016 ↑. 94
- [46] F. Solt, “Economic Inequality and Democratic Political Engagement,” *American Journal of Political Science*, vol. 52, no. 1, pp. 48–60, 2008 <https://doi.org/10.1111/j.1540-5907.2007.00298.x> ↑. 94
- [47] D. McAdam, S. Tarrow, and C. Tilly, *Dynamics of Contention*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

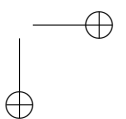
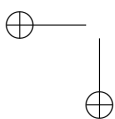


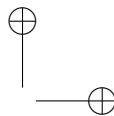
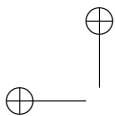
- <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805431> ↑. 94
- [48] R. Francescotti, “Emergence,” *Erkenntnis*, vol. 67, no. 1, pp. 47–63, 2007 <https://doi.org/10.1007/s10670-007-9047-0> ↑. 95
- [49] J. Goldstein, “Emergence as a Construct: History and Issues,” *Emergence*, vol. 1, no. 1, pp. 49–72, 1999 https://doi.org/10.1207/s15327000em0101_4 ↑. 95
- [50] B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. New York: Freeman, 1973 ↑. 96
- [51] S. Wolfram, *A New Kind of Science*. New York: Wolfram Media, 2002 ↑. 96
- [52] T. Knuutila and M. Merz, “Understanding by Modeling: An Objectual Approach,” in *Scientific Understanding*, H. de Regt, S. Leonelli, and K. Eigner, Eds. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2009 <https://doi.org/10.2307/j.ctt9qh59s.11> ↑. 97
- [53] R. Hoffmann, “Twenty Years on: The Evolution of Cooperation Revisited,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 3, no. 2, 2000 ↑. [Online]. Available: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/3/2/forum/1.html> 97
- [54] G. Mead, *Mind, Self and Society*. Chicago: University of Chicago Press, 1972 ↑. 97
- [55] N. Luhmann, *Social Systems*. Stanford: Stanford University Press, 1995 ↑. 97
- [56] D. Farmer, P. Patelli, and I. Zovko, “The Predictive Power of Zero Intelligence in Financial Markets,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 102, no. 6, pp. 2254–2259, 2005 <https://doi.org/10.1073/pnas.0409157102> ↑. 97
- [57] F. Squazzoni and N. Casnici, “Is Social Simulation a Social Science Outstation? A Bibliometric Analysis of the Impact of JASSS,” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 16, no. 1, 2013 ↑. [Online]. Available: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/1/10.html> 99
- [58] Z. Michalewicz, M. Schmidt, M. Michalewicz, and C. Chiriac, *Adaptive Business Intelligence*. Berlin: Springer, 2007 ↑. 99
- [59] M. Prokopenko, “Modelling Complex Systems and Guided Self-Organisation,” *Journal & Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, vol. 150, no. 1, pp. 104–109, 2017 ↑. 99

David Anzola

Sociólogo, Universidad del Rosario. PhD en sociología, Universidad de Surrey. Profesor principal de la Escuela de Administración de la Universidad del Rosario y miembro del Centro de Innovación, donde realiza estudios sobre metodologías sociales computacionales, particularmente simulación basada en agentes, complejidad y filosofía de las ciencias.

Correo electrónico: david.anzola@urosario.edu.co





Instrucciones para los Autores

Introducción

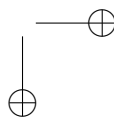
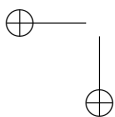
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

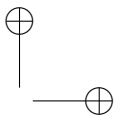
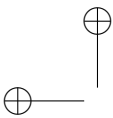
Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo 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 un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
- **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
- **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
- **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
- **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría





generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que enfatizar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

Procedimiento para el envío de artículos

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 se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que 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):

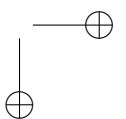
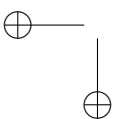
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

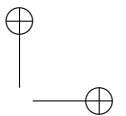
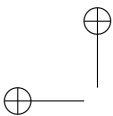
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

- Debe tener al menos título de maestría.
- Pertener 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/article/view/5091/6711>





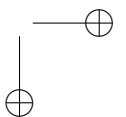
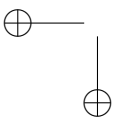
Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

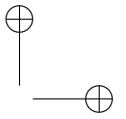
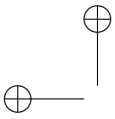
Aspectos a tener en cuenta

- 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 el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más 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.





Instructions for authors

Aim and scope

INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

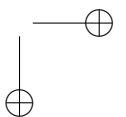
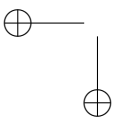
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

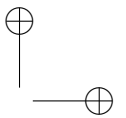
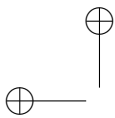
Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
- **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
- **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
- **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
- **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on





technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.

- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

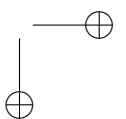
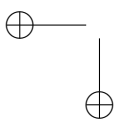
- Must have a PhD. Degree
- Must belong to an institution other than the authors'
- Have publications in recognised journals in the last two years

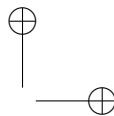
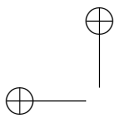
- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
- The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
- When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial





Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.

Copyright and publishing cost

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

Code of good conduct in scientific publishing

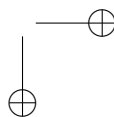
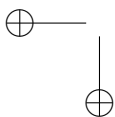
INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

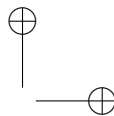
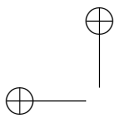
Inappropriate behaviour not tolerated by the journal

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

Penalties for inappropriate behaviour

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.





5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.

6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.

Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper

http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B_0.pdf

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript

<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>

Suspicion of a duplicate publication in a published paper

http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B_0.pdf

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

