



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA. Ingeniería

Volumen 27 • Número 1 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2022

REVISTA Ingeniería

Volumen 27 · Número 1 · Año 2022 · 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 enfocada en la gran área de conocimiento de Ingeniería y Tecnología, de acuerdo a la clasificación de la OCDE, 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 y la Tecnología. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la Ingeniería y la Tecnología a través de la publicación de artículos originales e inéditos, con pertinencia local o internacional.

EDITOR

Nelson L. Díaz, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

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

Alonso Salvador Sanchez, PhD.
Universidad de Alcalá,
España

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

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

César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Josep M. Guerrero, PhD.
Aalborg University, Dinamarca

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Communication
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

Víctor 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

Paulo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Elvis Eduardo Gaona García, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

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

Francisco Santamaría Piedrahíta, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.
Rector

Ángela Parrado Rosselli, PhD.
Directora Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Julio Barón Velandia, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Fabian Rios Gutierrez, MSc.
Gestor Editorial

Ingrí Gisela Camacho, BSc.
Gestor Editorial

Pablo Estrada Suarez
Corrección de Estilo

José Daniel Gutierrez Mendoza
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diseñador L^AT_EX

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual": esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

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 endosa, 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.

INDIZADA EN



ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Sofía Estellés-Miguel
Universitat Politècnica de València

Augusto Serna Urán
Universidad Nacional de Colombia

Giovanni Pérez Ortega
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias

Alfonso Campos-Amezcu
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Rafael Campos
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Jorge Saavedra
Universidad Rey Juan Carlos

Juan C. Jauregui
Universidad Autónoma de Querétaro

Isabel Lamas
Universidade da Coruña

Miguel Ángel Ruíz-Cabrera
Universidad Autónoma de San Luis Potosi

Alicia Grajales-Lagunes
Universidad Autónoma de San Luis Potosi

Almudena Ordóñez
Universidad de Oviedo

Nicolás Velázquez Limón
Universidad Autónoma de Baja California, Campus Mexicali

Miguel Ángel Maté-González
Universidad de Salamanca

Almudena Ordóñez
Universidad de Oviedo

Diego Hernando Angulo Flórez
Fundación Universitaria Juan de Castellanos-FUJDC

Luis Carlos González-Márquez
Universidad de Occidente

Sonsoles López-Pernas
Universidad Politécnica de Madrid

Guillermo Hernández
AIR Institute

José Horacio Tovar-Hernández
Instituto Tecnológico de Morelia

Carlos Díaz-Caro
Universidad de Extremadura

Inmaculada Batalla Garlito
Scientific Campus of the University of the Basque Country

Rogelio O. Corona-Núñez
Instituto de Ecología

Guillermo Hernández
AIR Institute

Sonsoles López-Pernas
Universidad Politécnica de Madrid

TABLA DE CONTENIDOS

Editorial

Tecnología y sociedad, la nueva normalidad mixta

Tecnología y sociedad, la nueva normalidad mixta

Daniilo Alberto Vera Parra · Nelson Enrique Vera Parra

Ingeniería Industrial

Simulation of an Inventory Policy Based on the Demand Driven MRP Methodology from a Petri Nets Approach

Simulación de una política de inventario basada en la metodología Demand Driven MRP desde un enfoque de redes de Petri

Andrés Mauricio Paredes Rodríguez, Kevin Ciro Jaramillo, José Daniel Jaramillo

Ingeniería Mecánica

Characterization, Design Testing and Numerical Modeling of a Subsonic-Low Speed Wind Tunnel

Caracterización, pruebas de diseño y modelado numérico de un túnel de viento subsónico de baja velocidad

Andrés Lara, Jonathann Toledo, Robert Salazar

Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Performance Study of Different Blade Profiles of a Wind Turbine to Harness of Low-Speed Winds

Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabes de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad

Luis A. Gallo, Edwin L. Chica, Elkin Flórez

Sección Especial: Mejores artículos extendidos - WEA 2021

Capital Requirements to Cover Operational Risk in Financial Institutions of Emerging Markets A Gaussian Copula Model

Requerimientos de capital para cubrir el riesgo operativo en instituciones financieras de mercados emergentes. Un modelo de Cópula Gaussiana

Betty Johanna Garzón-Rozo, Claudia Paola Martín-Bernal, Feizar Rueda-Velasco

Evaluation of the Accuracy of the Sound Field Separation Method under Variations in the Location of the Sampling Points

Evaluación de la precisión del método de separación de campos sonoros bajo variaciones en la ubicación de los puntos de muestreo

Sebastián López-Mejía, Andrés Felipe Piedrahita-Montes

A P-Robustness Approach for the Stochastic Inventory Routing Problem

Una aproximación a través del modelo p-robusto para el problema estocástico de ruteo e inventario

Carlos Franco Tenjo-García, Juan Carlos Figueroa-García, Jhoan Sebastián

Ingeniería Química, Ambiental y de Alimentos

Preservation of Minimally Processed Pineapple: Evaluation of Physicochemical Parameters

Conservación de piña mínimamente procesada: evaluación de parámetros fisicoquímicos

Claudia L. Vargas-Serna, Vanessa González, Claudia Ochoa-Martínez, Carlos Vélez Pasos

Sustainable Energy Use of a Geothermal Resource: The Case of the Luis Prieto Gómez Plant Dosing Room

Aprovechamiento energético sostenible de un recurso geotermal: caso sala de dosificación de la Planta Luis Prieto Gómez

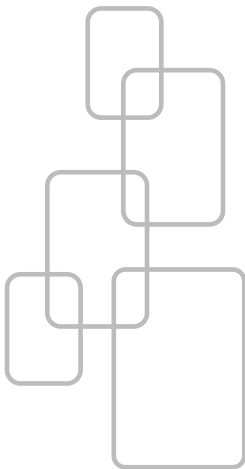
Beatriz Eugenia Ospina Betancur, Walter Murillo Arango

Effect of the Power and Number of Paddles of a Rotatory Aerator on Dissolved Oxygen Transfer in Water

Efecto de la potencia y número de aspas de un aireador rotativo sobre la transferencia de oxígeno disuelto en agua

Cesar René Blanco-Zuñiga, Dalia Soraya Useche-de-Vega, Nicolas Rojas-Arias

Instructions for Authors



Tecnología y sociedad, la nueva normalidad mixta

Dentro de la historia de la humanidad, las pandemias se han consolidado como hechos que han provocado desarrollos de diferentes tipos bajo el objetivo de proteger la vida de los ciudadanos ante su amenaza. Posterior a su aparición, estas han permitido avances de tipo arquitectónico, científico, laboral, educativo y de movilidad que terminan por constituir nuevas formas de relacionarnos y convivir en sociedad.

La tecnología ha sido un elemento de gran importancia dentro de la actual pandemia por Covid-19. En sus inicios pudimos presenciar la manera como países con un alto grado de desarrollo tecnológico adecuaban muy rápidamente sus sistemas de salud, educación, comunicación y convivencia para resistir a los efectos que un fenómeno de esta naturaleza estaba trayendo sobre la cotidianidad de la humanidad. En el caso de Colombia, la adecuación tecnológica permitió evidenciar un sinnúmero de desigualdades a la vez que configuró una oportunidad para la transformación y el fortalecimiento de diferentes sectores como el educativo y el laboral.

Hablar de educación virtual, de procesos de aprendizaje guiados por herramientas tecnológicas y de teletrabajo en Colombia hasta el año 2019 era adentrarse en un terreno poco común. La modalidad de trabajo remoto, aunque no desconocida por completo e implementada por multinacionales en el territorio nacional, no era una alternativa para el grueso de empresas que formaban parte de la industria colombiana. En cuanto a la educación, solo algunas instituciones contaban con formación completamente virtual en sus diferentes niveles y estaban orientadas principalmente a un segmento de la población cuyas actividades cotidianas no les permitían acceder a un programa presencial.

El giro que la sociedad colombiana debió dar hacia la educación virtual y el teletrabajo fue abrupto, los primeros meses fueron lentos, inciertos y en parte dolorosos, evidenciaron y aumentaron la brecha social y tecnológica, latente en la ausencia de grandes desarrollos y la deuda en transformación digital que estos sectores tienen. Sin embargo, el camino de adaptación ha traído aspectos relevantes, que para el momento histórico en el que nos situamos representan una gran oportunidad de avance tecnológico y social.

Open access



Cite as: D. Vera-Parra y N. D. Vera-Parra, "Tecnología y sociedad, la nueva normalidad mixta," *Ing*, vol. 27, no. 1, 2022. e19225.

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


<https://doi.org/10.14483/23448393.19225>


El teletrabajo propició dinámicas de comunicación y colaboración que en muchos casos potenciaron la generación de valor. La posibilidad de realizar encuentros con personas que se encuentran en distintos lugares optimizó tiempos de desplazamiento para el trabajador y el desarrollo de labores de manera remota permitió la disminución de costos de funcionamiento para los empresarios. Así mismo, la inclusión de herramientas innovadoras para el seguimiento y control de actividades beneficiaron a trabajadores y empleadores. Elementos que sin duda se han destacado; sin embargo, la apuesta por fortalecer los procesos productivos por medio del fortalecimiento tecnológico ha sido la ganancia más alta dentro de la crisis. La industria del software tuvo un impulso considerable, los escenarios de capacitación, actualización, transferencia del conocimiento y apropiación social como resultado de la inmersión de nuevas tecnologías en ambientes laborales ha beneficiado la productividad de sectores económicos que no demandan presencialidad.

Por su parte, los espacios de enseñanza y aprendizaje han tenido un recorrido similar, aunque con matices profundos. Indudablemente las desigualdades económicas y sociales imposibilitaron que toda la población académica accediera de la misma forma a las dinámicas de transformación hacia una educación mediada por herramientas tecnológicas, esto representa una problemática de gran magnitud que se refleja en la calidad de la prestación del servicio y las posibilidades de acceso a este. Nos ha tomado tiempo entender que la adaptación va más allá de disponer de un medio y una herramienta de comunicación entre estudiantes y educadores. Sin embargo, es fundamental destacar que la crisis ha impulsado una alta apuesta por la inclusión de nuevos desarrollos tecnológicos dentro del sector educativo, lo cual, de saberse administrar y potenciar para el beneficio de las actividades de formación, representará grandes beneficios para las instituciones educativas y sus comunidades.

El año 2022 será el momento de retorno a lo presencial, tanto en espacios laborales como académicos. Hemos tenido un par de años de vivencias marcadas por una dualidad entre los beneficios que el teletrabajo y la educación virtual traen consigo y la añoranza de retornar a lo que conocíamos como normalidad, caracterizada por la presencialidad y el contacto y la interacción directa con quienes nos rodean.

El giro ha iniciado lento, pero pronto ha tomado velocidad de adaptación. En tan solo unos años hemos sido partícipes de diferentes momentos históricos y de nuevo estamos ante uno de ellos: la implementación de procesos de trabajo y educación mixtos, o a lo mejor, el inicio de la nueva normalidad mixta. Por ahora, estos espacios mixtos se han venido dando debido a la adecuación de espacios físicos para el desarrollo de actividades; sin embargo, tenemos una discusión pendiente frente a los beneficios y los avances que significa mantener en el tiempo este tipo de modalidad mixta en los sectores laboral y educativo, entendiendo que la tecnología se constituye en un elemento transformador y transversal a todas las funciones que como humanidad desarrollamos y que la crisis mundial generada por la reciente pandemia es una gran oportunidad para fortalecernos en sociedad.

Danilo Alberto Vera Parra 
Sociólogo. Estudiante de Maestría en
Gestión Estratégica de Proyectos
daniloverap@gmail.com

PhD. Nelson Enrique Vera Parra 
Docente titular de la facultad de Ingeniería
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
neverap@udistrital.edu.co

Simulación de una política de inventario basada en la metodología Demand Driven MRP desde un enfoque de redes de Petri

Simulation of an Inventory Policy Based on the Demand Driven MRP Methodology from a Petri Nets Approach

Andrés Mauricio Paredes Rodríguez *¹, **Kevin Ciro Jaramillo** ¹, **José Daniel Jaramillo** ¹

¹Corporación Universitaria Minuto de Dios (Buga, Colombia).

*Correspondence e-mail: aparedesrod@uniminuto.edu.co

Recibido: 14/05/2021. Modificado: 28/07/2021. Aceptado: 14/09/2021.

Abstract

Context: Currently, companies are facing a problem associated with inventory control since there is a high number of references that they must manage to reduce lost sales and minimize low-turnover inventory.

Method: Demand Driven MRP (DDMRP) is an innovative inventory control strategy that incorporates elements of Lean systems and theory of constraints which lead to the introduction of dynamic buffers with the purpose of controlling inventory levels while responding to the demand. Petri nets are used to simulate and validate the application of the DDMRP methodology in a finished product inventory.

Results: From the conducted simulation, it is possible to verify the effectiveness of the DDMRP methodology for the case under study, where the overstock is reduced while the possibility of out-of-stock is minimized.

Conclusions: The simulation of the DDMRP methodology through Petri nets allowed evaluating the performance of the policy before its implementation with the purpose of validating the effectiveness of the strategy on company performance indicators such as the level of service and costs storage.

Keywords: Demand Driven MRP, Inventory, Petri nets.

Language: Spanish

Open access



Cite as: Paredes, A., Ciro, K., Jaramillo, J. "Simulación de una política de inventario basada en la metodología Demand Driven MRP desde un enfoque de redes de Petri". *Ing*, vol. 27, no. 1, 2022. e18002.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18002>

Resumen

Contexto: En la actualidad, las compañías se enfrentan a una problemática asociada al control del inventario debido a que existe un alto número de referencias que se deben administrar con el objetivo de reducir las ventas perdidas y disminuir el inventario de baja rotación.

Método: Demand Driven MRP (DDMRP) es una estrategia de control de inventarios innovadora que incorpora elementos de sistemas Lean y teoría de restricciones que llevan a introducir buffers dinámicos con el objetivo de controlar los niveles de inventario al tiempo que se responde a la demanda. El uso de redes de Petri se utilizan para simular y validar la aplicación de la metodología DDMRP en un inventario de producto terminado.

Resultados: A partir de la simulación realizada se logra comprobar la efectividad de la metodología DDMRP para el caso de estudio, en el que se reduce el sobrestock de inventario, al mismo tiempo que se minimiza la posibilidad de agotados.

Conclusiones: La simulación de la metodología DDMRP a través de redes de Petri permitió evaluar el funcionamiento de la política antes de su implementación, para validar la efectividad de la estrategia sobre indicadores de desempeño de la compañía como lo son el nivel de servicio y los costos de almacenamiento.

Palabras clave: Demand Driven MRP, inventario, redes de Petri

Idioma: Español

1. Introducción

En los últimos años, el control de inventarios se ha convertido en un tema apasionante y complejo debido a la gran incertidumbre que existe en el mercado y la naturaleza propia de los productos que se gestionan, lo que refleja que, después del transporte, el inventario es la actividad que mayor aporte tiene en los costos logísticos en la mayoría de organizaciones [1]. La gestión de inventarios es un reto que hoy enfrentan las pequeñas y medianas empresas debido a que esta actividad involucra la planeación y el control del inventario con el objetivo de minimizar la inversión al tiempo que se equilibran la oferta y la demanda, evitando costos asociados a exceso o faltante de inventario [2].

Diversas investigaciones han estudiado el efecto de la política de control de inventario sobre organizaciones pertenecientes a una cadena de abastecimiento. Paredes, Chud y Osorio [3] proponen una política de inventarios (s, Q) para un inventario de repuestos de un ingenio azucarero, con lo que logran disminuir el costo de almacenamiento de referencias críticas, a la vez que se incrementa el nivel de servicio prestado a los clientes en producción. Cardona, Orejuela y Rojas [4] construyen una metodología con el objetivo de gestionar de manera integrada el control de inventario y la ubicación de ítems en bodegas de materia prima en la industria de alimentos concentrados. Chen y Rossi [5] desarrollan un modelo de gestión de inventarios para un minorista pequeño que maneja productos con demanda no estacionaria y tiene limitaciones de efectivo que validan la necesidad de tener un control exhaustivo de las inversiones realizadas en la compra de inventario. Por el contrario, en este artículo se pretende simular la aplicación de una estrategia de inventario poco tradicional conocida como Demand Driven MRP (DDMRP) en una pequeña empresa que se dedica a la comercialización de artículos de ferretería.

Demand Driven MRP es un método de gestión de inventarios reciente y prometedor que se ha desarrollado e implementado en distintas organizaciones a nivel mundial, demostrando ser una metodología con un enfoque de planificación superior [6]. Esta metodología incorpora elementos de sistemas Lean y la teoría de restricciones que la llevan a introducir buffers dinámicos con el objetivo de controlar los niveles de inventario al tiempo que se responde a las demandas del cliente en un mercado cada más competitivo y dinámico. La ventaja que tiene Demand Driven MRP sobre sistemas tradicionales de gestión de inventarios es que no trabaja con base en pronósticos, por lo que la incertidumbre en la demanda es menor y existe un menor riesgo de generación del efecto látigo [7], el cual representa cómo pequeñas fluctuaciones en la demanda pueden generar enormes oscilaciones en los inventarios de toda la cadena de suministro, ocasionando pérdidas económicas a través de dos posibles escenarios: el primero asociado a un abastecimiento por encima de la cantidad demandada que genere excesos de inventario, aumentando los costos de almacenamiento, y en el segundo escenario, donde puede ocurrir desabastecimiento por una mala planificación de la demanda, que conlleve a la generación de ventas perdidas.

En [8] se desarrolla un modelo matemático basado en una amplia variedad de estrategias de inventario encontradas en la literatura, el cual busca determinar la frecuencia de la publicidad, el precio de venta y la duración del periodo de existencias para maximizar el beneficio promedio por unidad de tiempo, lo que conduce a un problema de inventario no lineal, que se resuelve utilizando un algoritmo eficiente desarrollado previamente por los autores. En [9] se define un modelo de abastecimiento conjunto teniendo en cuenta restricciones de capacidad de transporte, número de envíos y presupuesto asignado. Para la modelación del problema los autores utilizaron programación lineal entera mixta, pero debido a la complejidad del problema, la solución la obtuvieron a través de la aplicación de una heurística llamada algoritmo genético. Por el contrario, la presente investigación incluye como elemento innovador, el uso de la simulación, específicamente del enfoque de redes de Petri para validar la aplicación de la metodología DDMRP en una pequeña ferretería. Se debe tener en cuenta que aunque las redes de Petri se han utilizado previamente para el estudio de políticas de inventario en cadenas de abastecimiento ([10]–[12]), no existe un referente que haya simulado bajo este enfoque el uso de la metodología DDMRP.

El artículo se estructura de la siguiente forma: se presenta el planteamiento de problema de la compañía objeto de estudio, luego se describe la metodología DDMRP y se detalla el uso del enfoque de simulación de eventos discretos a través de redes de Petri, por último, se presentan resultados y conclusiones.

2. Planteamiento del problema

El constante cambio al que se encuentra sometido el mercado actual crea la necesidad de darle una administración diferente al inventario, debido a que el número de referencias que administran las compañías van en aumento con el tiempo y cada vez es más difícil tener un control sobre el inventario [13]. En la presente investigación se utilizará como caso de estudio una pequeña ferretería de la ciudad de Buga, la cual actualmente maneja más de 2000 artículos en su inventario y lleva más de tres años en el mercado.

Actualmente el control de inventarios dentro de la ferretería se maneja de forma empírica, esto conlleva a que los pedidos a los proveedores se hagan por intuición de la gerencia; este proceso genera un factor de riesgo importante a la hora de tomar decisiones para las diferentes actividades de los negocios, debido que una escasez de inventarios o un exceso de estos ocasiona en la empresa sobrecostos, bien sea por la disminución de ventas o por el incremento en costos de almacenaje, manipulación de mercancías, tiempos de preparación y recepción de pedidos.

Es importante tener en cuenta que, debido a la existencia de un gran número de referencias heterogéneas que administra la ferretería, existe la posibilidad de seleccionar distintos tipos de proveedores para el abastecimiento de los productos, lo que conlleva a que los tiempos de entrega, las condiciones de despacho y otros aspectos sean muy variados, dependiendo del tipo de proveedor y de la categoría de productos que maneje cada uno de ellos.

3. Metodología

La investigación se construye siguiendo la metodología expuesta en la Figura 1, donde se puede observar que inicialmente se realiza una clasificación ABC del inventario para priorizar aquellas referencias de mayor criticidad para la organización. Una vez se obtienen las referencias tipo A, se procede a establecer cada uno de los niveles de buffers por cada referencia, tal y como lo indica la metodología Demand Driven MRP. Por último, se procede a construir una red de Petri para la simulación de la estrategia de inventario. A continuación se explica en mayor detalle cada una de estas fases.

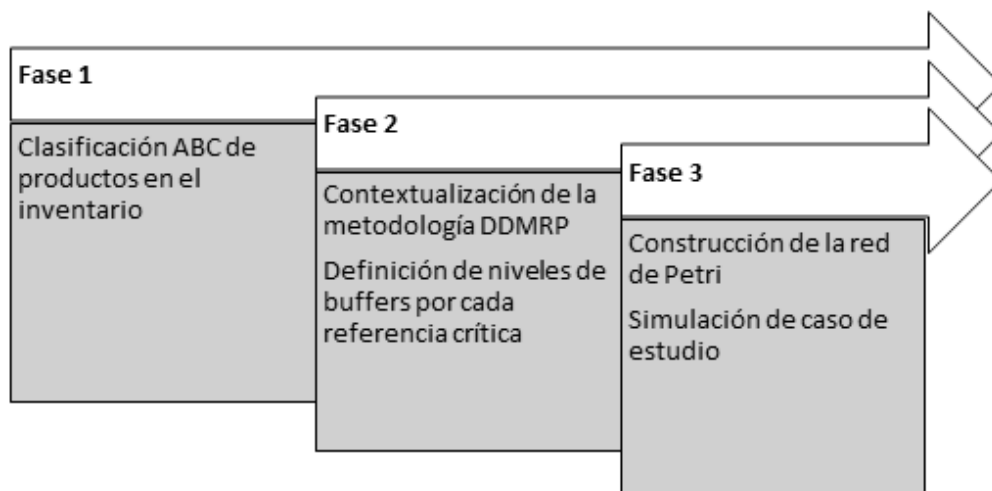


Figura 1. Metodología para la simulación de la metodología Demand Driven MRP

3.1. Clasificación ABC de productos en el inventario

La clasificación de productos dentro de un inventario ha ayudado a las compañías a centrar su atención en aquellos artículos más representativos y de esta forma tener una mayor eficiencia a la hora de gestionar su inventario. Uno de los esquemas más utilizados para la priorización de produc-

tos en un inventario se conoce como el análisis ABC [14], el cual se realiza de dos formas: con un solo criterio o con múltiples criterios. En esta investigación se utilizará una clasificación ABC tradicional, utilizando el criterio de ventas como principal insumo para identificar las referencias más importantes dentro del inventario y, a partir de ellas, establecer una política de control basándose en la metodología Demand Driven MRP.

3.2. Metodología Demand Driven MRP

Demand Driven MRP (DDMRP) es un método de gestión de almacenes reciente y prometedor que se ha desarrollado e implementado en distintos contextos empresariales [6], el cual incorpora elementos extraídos de sistemas Lean y teoría de restricciones al introducir buffers dinámicos para controlar las existencias de producto dentro del inventario, evitando acumular excesos de productos que conlleven mayores costos de almacenamiento, al mismo tiempo que ocurre la probabilidad de venta perdida. DDMRP incorpora conceptos innovadores permitiendo planificar y controlar el flujo de materiales de una cadena de suministro [15]. A continuación se describen los cinco pasos de los que se compone el DDMRP según Ptak y Smith [16].

3.2.1. Posicionamiento estratégico del inventario

Cuando la empresa cuenta con un inventario en toda la cadena de suministros genera un gran desperdicio de recursos. Sin embargo, deshacerse por completo del inventario conlleva riesgos a la hora de gestionar los suministros que varían en el tiempo. Cuando se piensa evitar estos problemas, el DDMRP propone ciertos factores para identificar el mejor orden que se le puede dar al inventario. De esta forma, el inventario permite desacoplar los procesos para absorber tanto la variabilidad de la demanda como la del suministro, evitando la transmisión de la incertidumbre.

3.2.2. Perfiles y niveles de buffer

Para poder nivelar los buffers y posicionar el inventario en la estructura de materiales es necesario dimensionarlos, para eso debe construirse cada producto teniendo lo que se conoce como el perfil del buffer. Los perfiles de buffer son familias o grupos de piezas para los cuales hay que idear un conjunto de reglas, directrices y procedimientos que se pueden aplicar de la misma manera a todos los miembros de un perfil dado. Una vez que se posicione el inventario en la estructura de materiales es necesario dimensionarlos. Para ello el DDMRP se basa en el consumo medio diario real de las referencias, el Lead Time de estas, o la existencia o no de una cantidad mínima de pedido definida. De esta forma los buffers se dimensionan considerando la demanda real y no con base en previsiones erróneas.

Para realizar el cálculo de los buffers y que esto facilite la implementación dentro del modelo de desacople propuesto se requiere primero tener conocimiento de algunos datos utilizados de referencia como se presenta a continuación:

AWU: es el promedio semanal de demanda de cada producto, en este caso tomando 10 semanas pertenecientes a los meses de enero a marzo.

Lead Time (LT): es el tiempo invertido por los procesos previos a la posición del buffer, y que van hasta el buffer anterior. En este modelo se tomó el tiempo promedio de atención de los proveedores expresado en semanas.

Desired Order Cycle (DOC): tiempo deseado entre órdenes o que transcurre entre una revisión del estado del buffer y la siguiente revisión. Esto es un dato que puede ser dado subjetivamente para cada referencia o grupo de referencias; también puede ser una política que la empresa tenga.

Lead Time Factor (LTF): número que representa la variabilidad del tiempo de entrega del producto. Este valor depende del tipo de producto que maneja la compañía (maquilado, fabricado y comercializado) y el nivel de tiempo de entrega (Lead Time alto, medio o bajo).

Mínimum Order Quantity (MOQ): cantidad mínima a ordenar del producto terminado. O lo que es lo mismo, cada vez que se ordena de ese producto, cuánto es lo mínimo que se ordena, en caso de que este dato exista.

Variability Factor (VF): número que representa la variabilidad de la demanda (alta, media y baja) y del tipo de producto que maneja la compañía (maquilado, fabricado y comercializado). En la Tabla I se pueden observar los valores de LTF y VF según tipo de producto y tiempo de entrega.

Tabla I. Lead Time Factor and Variability Factor según características del producto y tiempo de entrega

Tipo de producto		Lead Time Factor (LTF)	Variability Factor (VF)
Productos fabricados/maquilados			
Lead Time Alto	8+ días	0,25	0,75
Lead Time Medio	3-8 días	0,4	0,5
Lead Time Bajo	1-2 días	0,7	0,25
Productos comercializados			
Lead Time Alto	20+ días	0,3	0,75
Lead Time Medio	11-19 días	0,5	0,5
Lead Time Bajo	1-10 días	0,7	0,25

Fuente: Demand Driven Institute.

Una vez se tiene la información completa por cada una de las referencias, se procede a calcular las zonas roja, amarilla y verde para consolidar los niveles del buffer (ver Figura 2).

3.2.3. Ajustes dinámicos

Debido a los cambios tan repentinos del mercado, es necesario estar reajustando las dimensiones de los buffers para que su función no presente errores ante nuevas realidades. Esto se hace por la posibilidad de que el consumo varíe en el tiempo para alguna referencia, y que la empresa sea capaz de atender a tiempo las necesidades reales de dichas referencias. La metodología DDMRP permite hacer estos cambios para ajustar los buffers según sea necesario para la organización.

3.2.4. Planificación basada en la demanda

Este paso permite diagnosticar las posibles necesidades que la empresa tenga frente a los materiales y comprar según el tipo de referencia. La metodología DDMRP ha desarrollado el concepto


	1	$DOC \times AWU$
	2	$LT \times AWU \times LTF$
	3	MOQ
	1	$LT \times AWU$
	1	$LT \times AWU \times LTF \times (1 + VF)$

Figura 2. Fórmulas para el cálculo de zona roja, amarilla y verde de los buffers

Fuente: a partir de los presentados por Ptak y Smith [16].

de flujo neto, este se calcula considerando el stock físico como órdenes de compra abiertas y la demanda real. Cuando el valor de esta variable alcanza la zona de reposición del buffer, la empresa debe planificar una orden de compra hasta el nivel máximo del buffer correspondiente. Para facilitar dicha tarea, el DDMRP muestra la posición del flujo neto de cada buffer a través de una alerta codificada por colores [15]. Esta metodología permite identificar de manera fácil las referencias que deben ser tratadas.

3.2.5. Ejecución visible y colaborativa

Al tener las órdenes ya planificadas, se recomienda de forma primordial asegurarse de que todo avanza según lo previsto. El DDMRP incorpora diferentes alertas identificadas por colores, siendo el rojo el que representa que el material está agotado, el amarillo provoca una alerta que indica que se debe abastecer el material y el verde se considera como el rango de inventario óptimo. En caso de que algo se desvíe de lo planificado, esto se muestra a través de dichas alertas. De esta manera, el responsable de dar seguimiento puede identificar de forma sencilla qué referencias se encuentran en situación crítica y requieren atención. Esta ejecución permite a la empresa priorizar las referencias correctamente basándose en el estado de penetración de los buffers, evitando así la generación de prioridades erróneas basadas en la fecha de vencimiento.

3.3. Simulación a través de redes de Petri

Las redes de Petri son potentes herramientas gráficas y matemáticas para modelar sistemas dinámicos complejos [17], y aunque su aplicación principal se encuentra dentro de los sistemas de producción, existen autores que han utilizado esta herramienta para modelar distintas decisiones de inventario en cadenas de abastecimiento [18], [19]. Una red de Petri es un caso particular de grafo dirigido, ponderado y bipartito con dos tipos de nodos: lugares y transiciones, donde los arcos pueden conectar desde los nodos lugar hasta los nodos transición o al revés. Una red de Petri tradicional está compuesta por cinco elementos (P, T, A, W, Mo), donde P se relaciona con los lugares, T representa las transiciones, A define los arcos, W los pesos que existen entre los arcos y, por último, Mo es el conjunto de tokens que circulan por el sistema.

Tabla II. Ejemplo del cálculo de zonas de buffer para algunos productos tipo A

ítem	AWU	LT (Semanas)	DOC	LTF	MOQ	VF	Zona Verde	Zona Amarilla	Zona Roja
			(Periodo de revisión semanas)		(cantidad mínima de pedido)				
1	3	3	2	0,3	1	0,75	6	9	5
2	2	3	2	0,3	4	0,75	4	6	4
3	36	3	2	0,3	12	0,75	72	108	57
4	1	3	2	0,3	1	0,75	2	3	2
5	14	3	2	0,3	12	0,75	28	42	23

En la Figura 3 se exhibe la red de Petri generada para la simulación de la estrategia Demand Driven MRP para producto terminado. Este proceso empieza con la transición T1, que viene siendo la llegada de los productos a la compañía, estos son llevados a la bodega donde se almacenan en P2, con la transición T3 se genera una demanda aleatoria representada por una distribución estadística, la cual se acumula en el lugar P1, y si hay unidades con las que se pueda responder al pedido se activa la transición T2, que permite generar la venta (P4). Si en este caso ocurre que no se cuenta con la cantidad requerida, se activa la transición T4, terminando las unidades en el lugar P3 que representa la venta perdida.

Para la política del Demand Driven se genera un periodo de revisión para cada R semanas, en el que el ciclo se representa con la transición T6 y T7 que son respectivamente el inicio y el fin del periodo de revisión, esto permite saber que deben pasar R semanas para revisar el inventario, pasando un token al lugar P6 cuando sea momento de hacer la revisión.

La transición T5 representa el momento del pedido cuando se tiene que validar si se encuentra en la semana de pedido y observar cómo está el nivel actual de inventario frente a los niveles de buffers que se determinaron. Al lugar P5 pasa el tamaño de pedido generado, el cual está representado por el nivel superior de la zona de verde del buffer, restando la cantidad actual en inventario. Una semana después, el producto llega al almacén, por lo que la transición T1 se activa y se cierra el ciclo.

4. Resultados

Para realizar la clasificación ABC en la compañía objeto de estudio se utilizaron valores de venta de los 2.728 artículos que ha manejado la ferretería en el último año de operación, luego de la aplicación de la regla de Pareto, se logró identificar un listado de 81 artículos críticos (considerados tipo A) que representan el 80 % de los ingresos de la compañía. Para cada uno de estos productos se realizó un levantamiento de la información necesaria para el cálculo de los niveles de buffer para el uso de la metodología Demand Driven MRP. La Tabla II muestra el cálculo de las zonas de buffer obtenidas para algunas referencias críticas de la organización teniendo en cuenta información como Lead Time, promedio de consumo semanal, cantidad mínima de pedido, entre otros.

La red de Petri presentada en la Figura 3 fue simulada por un lapso de 52 semanas utilizando Visual Basic de Excel, para verificar el comportamiento de la estrategia propuesta comparado con

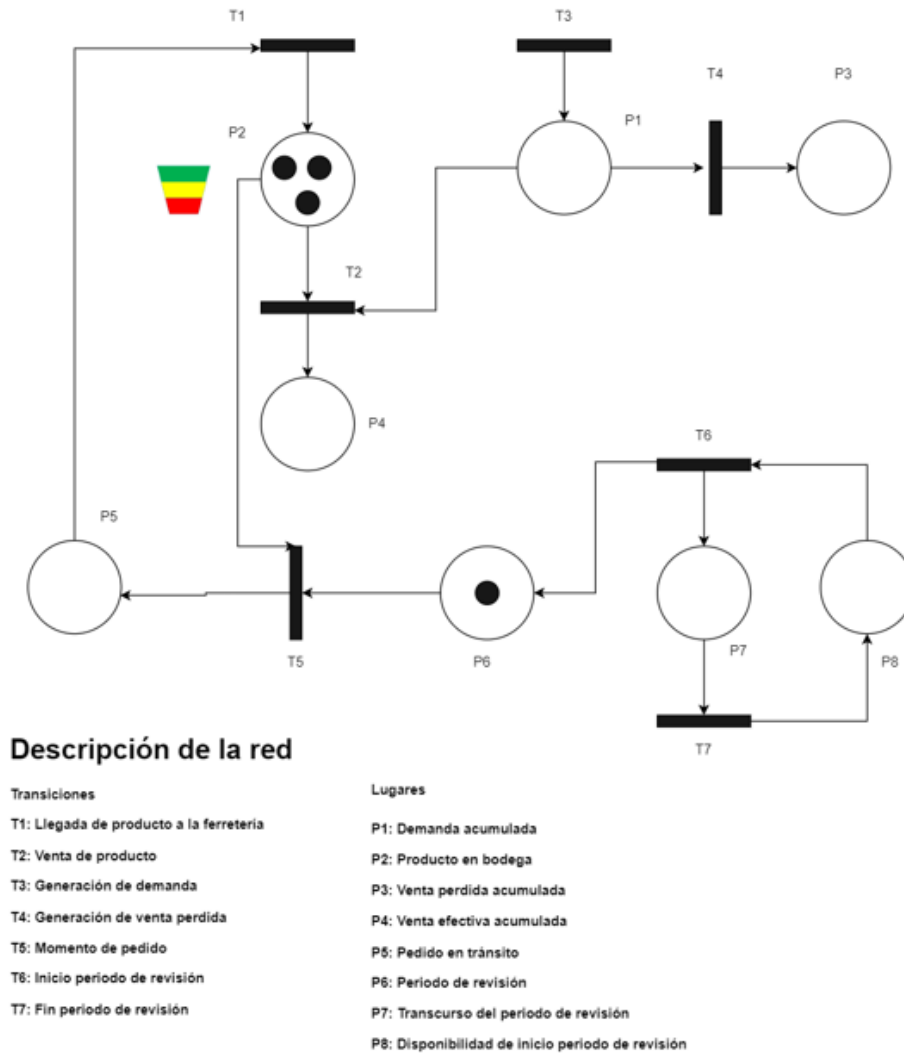


Figura 3. Red de Petri construida para la simulación de la estrategia Demand Driven MRP

los datos históricos del año 2020. Se debe tener en cuenta que el periodo de revisión que se considera dentro de la simulación es de dos semanas, partiendo del hecho de que los proveedores de la ferretería tienen un tiempo de entrega estimado de una semana. Asimismo, se simula una demanda aleatoria para cada producto que se comporta siguiendo una distribución estadística que se obtuvo a partir de un análisis detallado del histórico de ventas del año 2020.

En la Figura 4 se puede observar cómo el nivel de inventario de un producto referente para la organización (representado por la línea azul), en las 52 semanas de simulación, oscila entre la zona amarilla y verde del amortiguador diseñado, por lo que se demuestra que la red de Petri programada representa fielmente a la metodología Demand Driven MRP. Asimismo, se logra demostrar que la metodología DDMRP evita la generación de sobrestock de inventario (en ninguna de las semanas simuladas el nivel de inventario promedio supera la zona verde del buffer establecido), al tiempo que reduce la posibilidad de agotados (el inventario no llega a estar en la zona roja en ninguna de las 52 semanas de simulación).

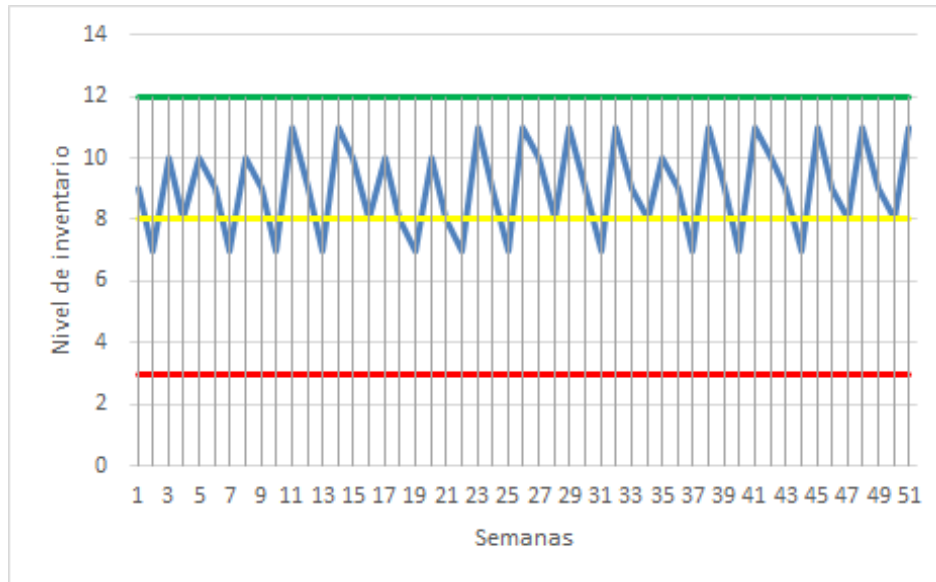


Figura 4. Ejemplo de comportamiento del nivel de inventario para una referencia tipo A a partir de la simulación de la política de Demand Driven MRP

En la Figura 5 se presenta una comparación del nivel de servicio obtenido con la implementación de la estrategia Demand Driven MRP para cada una de las 81 referencias analizadas, comparado con el nivel de servicio real experimentado por la compañía para cada una de las referencias tipo A en el año 2020; se puede notar claramente cómo con la implementación de la metodología el nivel de servicio de la mayoría de referencias estaría cercano al 100 %, representando un incremento del 25 % comparado con el promedio general del nivel de servicio presentado en el año 2020, lo que comprueba que al usar dicha metodología se logrará cubrir las variaciones de demanda, evitando que el producto se agote y logrando como resultado el incremento de las ventas de la compañía.

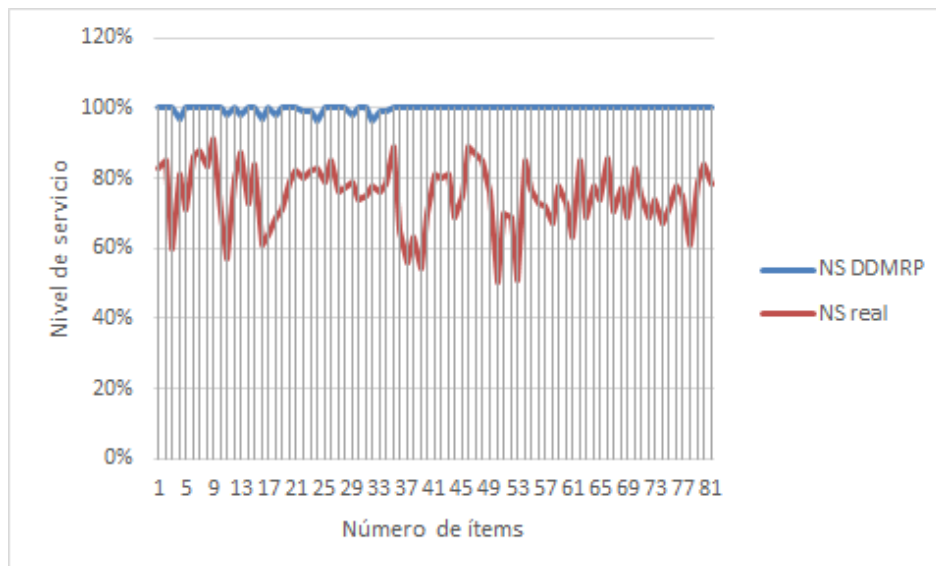


Figura 5. Comparación entre el nivel de servicio real para el año 2020 y el nivel de servicio obtenido por la metodología DDMRP

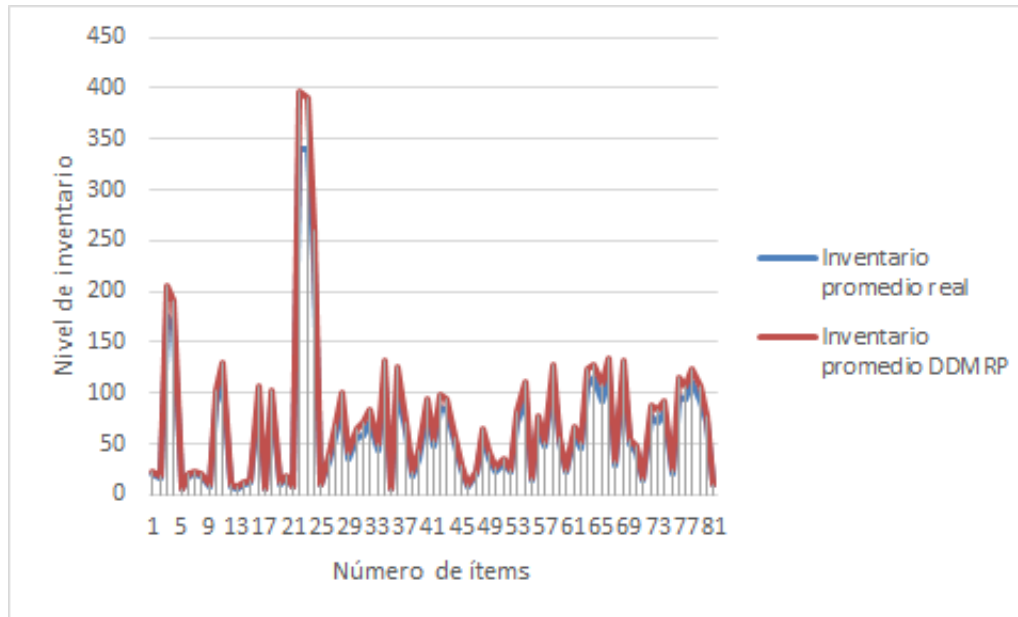


Figura 6. Comparación entre inventario promedio para el año 2020 y el inventario simulado por la metodología DDMRP

Otro aspecto a considerar luego de la simulación de la estrategia DDMRP es el hecho de que en la mayoría de los productos se incrementa la inversión en inventario para la compañía en comparación con el promedio de existencias que se tuvieron en el año 2020 (ver Figura 6), lo que implica para la compañía revisar una distribución de sus gastos para realizar una mayor inversión en aquellos productos más representativos para la empresa, al tiempo que se debe validar el espacio de almacenamiento disponible en su bodega para determinar la viabilidad de la implementación de la metodología.

5. Discusión

En este artículo se aborda la aplicación de la metodología de simulación redes de Petri, para analizar, modelar y estudiar el comportamiento de la implementación de una política de inventarios basada en la metodología Demand Driven MRP (DDMRP) en una pequeña empresa comercializadora de artículos ferreteros. Alineado al planteamiento de diferentes autores ([6], [7], [16]), se logra demostrar la efectividad de la estrategia de inventario para el incremento del nivel de servicio, lo que conlleva a una reducción de los productos agotados y un aumento en el ingreso por ventas de la compañía.

En un estudio reciente realizado por [20] se evalúa la aplicabilidad de la metodología DDMRP en un entorno de producción complejo, utilizando el software de simulación ARENA, se logra concluir que la estrategia implementada en la organización objeto de estudio previene el desabastecimiento y el exceso de inventario, reduce el tiempo de entrega en un 41 % y reduce los niveles de stock en un 18 %. En contraste, el presente estudio demuestra la adaptación que tiene la metodología DDMRP para una empresa comercializadora, encontrando igualmente beneficios asociados a la nivelación del inventario y al incremento en la satisfacción del cliente final.

Por otro lado, se considera fundamental para la implementación de la política de inventarios propuesta en este documento, un incremento en la capacidad de almacenamiento actual que permita garantizar los beneficios económicos y en términos de servicio que conlleva la adaptación de esta estrategia. Asimismo, se hace necesario que la gerencia aumente el capital disponible para la compra de los artículos de mayor criticidad dentro del inventario.

Por último, un hallazgo de mucha relevancia está relacionado con que la metodología Demand Driven MRP ha sido implementada comúnmente en compañías manufactureras [20]. Sin embargo, dentro de la literatura se encontraron pocos casos en los cuales se analiza la efectividad de la estrategia DDMRP en empresas comercializadoras, como lo presenta el presente caso de estudio. Además, un elemento innovador y diferenciador dentro de la investigación realizada es la utilización de las redes de Petri para el modelamiento y el análisis de la política de inventarios basados en la metodología Demand Driven MRP (DDMRP).

6. Conclusiones

La estrategia de control de inventario Demand Driven MRP (DDMRP) demostró ser una metodología eficaz para el control de inventarios de producto terminado, evitando la acumulación de inventarios innecesarios y mejorando el nivel de servicio de atención al cliente final. Esta conclusión se logra obtener gracias a la simulación de la política en una pequeña ferretería de la ciudad de Buga, donde se incrementa aproximadamente en un 25 % el nivel de servicio de las referencias tipo A, alcanzando estándares entre 98 % y 100 %. No obstante, para llegar a este nivel de atención, la compañía debe garantizar un inventario promedio superior por cada referencia al que actualmente posee, lo que conlleva a tomar decisiones relacionadas con una redistribución de las compras y una validación de la capacidad de almacenamiento en la bodega.

La simulación de la metodología DDMRP a través de redes de Petri permite evaluar el funcionamiento de la política antes de su implementación, para validar la efectividad de la estrategia sobre indicadores de desempeño de la compañía como lo son el nivel de servicio, los costos de almacenamiento, la utilización de los recursos, entre otros. La ventaja que ofrecen las redes de Petri en comparación con otras metodologías de simulación es su fácil adaptabilidad a restricciones particulares relativas a la gestión de sus inventarios que presente la compañía, lo que permite personalizar la política en el lenguaje Visual Basic de Excel sin incurrir en gastos de tiempo y recursos de programación para la ferretería.

Como futura investigación se espera realizar una sensibilización de algunos parámetros críticos para el uso de la metodología DDMRP como lo son el tiempo de entrega y el periodo de revisión, con el propósito de validar la efectividad de la estrategia en condiciones de incertidumbre y riesgo. Asimismo, se propone incluir una restricción de almacenamiento en la red de Petri diseñada para verificar la viabilidad de la estrategia considerando limitaciones de recursos y dinero.

Referencias

- [1] C. J. Vidal, *Fundamentos de control y gestión de inventarios*, Universidad del Valle, 2010. ↑²

- [2] D. Singh and A. Verma, "Inventory management in supply chain", *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 3867-3872, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.641> ↑2
- [3] A. M. Paredes Rodríguez, V. L. Chud Pantoja y J. C. Osorio, "Sistema de control de Inventarios multicriterio difuso para repuestos", *Sci. Tech.*, vol. 24, no. 4, pp. 595-603, 2019. ↑2
- [4] J. L. Cardona Tunubala, J. P. Orejuela Cabrera y C. A. Rojas-Trejos, "Gestión de inventario y almacenamiento de materias primas en el sector de alimentos concentrados", *Rev. EIA*, vol. 15, no. 30, pp. 195-208, 2018. <https://doi.org/10.24050/reia.v15i30.1066> ↑2
- [5] Z. Chen, and R. Rossi, "A dynamic ordering policy for a stochastic inventory problem with cash constraints", *Omega*, vol. 102, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102378> ↑2
- [6] R. Miclo, M. Lauras, F. Fontanili, J. Lamothe, and S. A. Melnyk, "Demand Driven MRP: Assessment of a new approach to materials management", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 57, no. 1, pp. 166-181, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1464230> ↑3, 5, 11
- [7] R. Miclo, F. Fontanili, M. Lauras, J. Lamothe, and B. Milian, "An empirical comparison of MRPII and Demand-Driven MRP", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 1725-1730, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.831> ↑3, 11
- [8] L. A. San-José, J. Sicilia, and B. Abdul-Jalbar, "Optimal policy for an inventory system with demand dependent on price, time and frequency of advertisement", *Comput. Oper. Res.*, vol. 128, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105169> ↑3
- [9] Y. Chen, M. I. M. Wahab, and P. Ongkunaruk, "A joint replenishment problem considering multiple trucks with shipment and resource constraints", *Comput. Oper. Res.*, vol. 74, pp. 53-63, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.04.012> ↑3
- [10] K. Labadi, H. Chen, L. Amodeo, and C. Chu, "Batch deterministic and stochastic petri nets: Modelling, analysis and application to inventory systems", *IFAC Proc. Vol.*, vol. 38, no. 1, pp. 343-348, 2005. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.00341> ↑3
- [11] M. Dotoli, M. P. Fanti, and A. M. Mangini, "Comparing management policies for supply chains via a hybrid Petri net model", *Conf. Proc. - IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, pp. 3469-3474, 2007. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2007.4413684> ↑3
- [12] N. R. S. Raghavan and D. Roy, "A stochastic Petri net approach for inventory rationing in multi-echelon supply chains", *J. Heuristics*, vol. 11, pp. 421-446, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10732-005-1855-2> ↑3
- [13] L. Cui, J. Deng, L. Wang, M. Xu, and Y. Zhang, "A novel locust swarm algorithm for the joint replenishment problem considering multiple discounts simultaneously", *Knowledge-Based Syst.*, vol. 111, pp. 51-62, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.08.007> ↑3
- [14] R. Ramanathan, "ABC inventory classification with multiple-criteria using weighted linear optimization", *Comput. Oper. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 695-700, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.014> ↑5
- [15] A. Kortabarria, U. Apaolaza y A. Lizarralde, "Demand driven mrp - nuevo método para la gestión de la cadena de suministro: un estudio de caso", *Dir. y Organ.*, vol. 67, 2019. <https://doi.org/10.37610/dyo.v0i6> ↑5, 7
- [16] C. Ptak, and C. Smith, *DDMRP: Demand Driven Material Requirements Planning*, Industrial Press, 2016. ↑5, 7, 11
- [17] J. Sheng, and D. Prescott, "A coloured Petri net framework for modelling aircraft fleet maintenance", *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 189, pp. 67-88, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.004> ↑7
- [18] S. H. Zegordi, and H. Davarzani, "Developing a supply chain disruption analysis model: Application of colored Petri-nets", *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 2, pp. 2102-2111, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.137> ↑7
- [19] L. H. Fierro, R. E. Cano, and J. I. García, "Modelling of a multi-agent supply chain management system using colored Petri nets", *Procedia Manuf.*, vol. 42, no. 2019, pp. 288-295, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.095> ↑7
- [20] A. P. Velasco Acosta, C. Mascle, and P. Baptiste, "Applicability of Demand-Driven MRP in a complex manufacturing environment", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 14, pp. 4233-4245, 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1650978> ↑11, 12

Andrés Mauricio Paredes Rodríguez

Magister en Ingeniería, Universidad del Valle; docente tiempo completo de la Corporación Universitaria Minuto de Dios; investigador del grupo GICIDET y líder del semillero GLIOSP de la Corporación Universitaria Minuto de Dios.
Correo electrónico: aparedesrod@uniminuto.edu.co

Kevin Ciro Jaramillo

Estudiante de Ingeniería Industrial de la Corporación Universitaria Minuto de Dios.
Correo electrónico: kcirojarami@uniminuto.edu.co

José Daniel Jaramillo

Estudiante de Ingeniería Industrial de la Corporación Universitaria Minuto de Dios.
Correo electrónico: jjaramillo65@uniminuto.edu.co

Research

Characterization, Design Testing and Numerical Modeling of a Subsonic-Low Speed Wind Tunnel

Caracterización, pruebas de diseño y modelado numérico de un túnel de viento subsónico de baja velocidad

Andrés Lara¹, Jonathann Toledo¹, Robert Salazar^{2, 3}

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia, ²Departamento de Ciencias Básicas, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia, ³Vicerrectoría de Investigación, Universidad ECCI, Bogotá, Colombia.

Correspondence e-mail: rsalazarr@ecc.edu.co

Received: 10-05-2021. Modified: 03-08-2021. Accepted: 23-09-2022

Abstract

Context: Wind tunnels are essential devices in the study of flow properties through objects and scaled prototypes. This work presents a numerical study to characterize an existing wind tunnel, proposing modifications with the aim to improve the quality of the flow in the test chamber.

Method: Experimental measurements of the inlet velocity and pressure distribution of a wind tunnel are performed. These empirical values are used as parameters to define boundary conditions in simulations. The Finite Element Method (FEM) at low speeds is implemented to determine the stream function by using a standard Galerkin method. Polynomial interpolations are employed to modify the contraction section design, and numerical simulations are performed in order to compare the numerical results of the flow for the existing and the modified wind tunnels.

Results: Experimental measurements of the flow at the wind tunnel entrance are presented. The velocity field and distribution of thermodynamic variables inside the tunnel are numerically determined. This computations are useful since it is experimentally difficult to make measurements inside the channel. Additionally, numerical calculations of these variables are presented under modifications in the tunnel geometry.

Conclusions: A comparison between these simulations show that laminar flow at low velocities can be modeled as incompressible and irrotational fluid under a bidimensional approximation along its longitudinal section. It is observed that modifications in the geometry of the tunnel can improve the flow in the test section of the wind tunnel in the laminar regime.

Keywords: wind tunnels, Finite Element Method, irrotational flow

Language: English.

Open access



Cite as: Lara-Lara, A., Toledo, J., Salazar-Romero, R. P. "Characterization, Design Testing and Numerical Modeling of a Subsonic-Low Speed Wind Tunnel". *Ing.* vol. 27, no. 1, 2022. e17973.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17973>

Resumen

Contexto: Los túneles de viento son dispositivos esenciales en el estudio de las propiedades del flujo a través de objetos y prototipos a escala. En este trabajo se presenta un estudio numérico para caracterizar un túnel de viento existente proponiendo modificaciones que buscan mejorar la calidad del flujo en la cámara de ensayos.

Método: Se efectúan mediciones experimentales del campo de velocidad y distribución presión de entrada de un túnel de viento. Estos valores empíricos se usan como parámetros para definir condiciones de frontera en simulaciones. A bajas velocidades se implementa el Método de Elementos Finitos para determinar la función de corriente bajo un método de Galerkin. Se usan interpolaciones polinómicas para modificar el diseño de las sección de contracción y se realizan simulaciones numéricas para comparar resultados numéricos de flujo para el túnel de viento existente y el modificado.

Resultados: Se presentan mediciones experimentales del flujo en la entrada del túnel de viento. Se determinan numéricamente el campo de velocidad y distribución de variables termodinámicas en el interior del túnel. Estos cálculos son útiles ya que experimentalmente es difícil realizar mediciones dentro del canal. Adicionalmente, se presentan cálculos numéricos de estas variables sobre el túnel bajo modificaciones en su geometría.

Conclusiones: Una comparación entre estas simulaciones mostró que el flujo laminar a bajas velocidades se puede modelar como fluido incompresible e irrotacional bajo una aproximación bidimensional a lo largo de su sección longitudinal. Se observa que modificaciones en la geometría del túnel pueden mejorar el flujo en la sección de ensayos del túnel de viento en el régimen laminar.

Palabras clave: túneles de viento, Método de Elementos Finitos, flujo irrotacional

1. Introduction

Wind tunnels are devices that allow to empirically studying the aerodynamic characteristics of bodies immersed in a fluid, ranging from the study of the streamlines to measurements of forces on these objects. In practice, these devices are used to carry out studies with scaled models (mainly scales of reduction) of the real prototypes. Because the Navier-Stokes equations that model fluid flow can be written in terms of dimensionless dynamic variables and parameters such as the Reynold Number Re , then it is possible to analyze flows at a scale where wind tunnels are an example of the practical use of this rescaling property. Wind tunnels have been used extensively in many studies [1]–[3] commonly including experimental measurements [4]–[13], numerical simulations [14]–[17], and in various flow situations *e.g.* subsonic, hypersonic [18], [19], transonic [20], [21], laminar, turbulent [22]–[24], etc. In engineering, wind tunnels are used to test the flow around aircrafts, the performance of rotors and turbines [25]–[27], and even studies on the flight of birds [28] and the effects of wind on the shape and growth of plants [29]. Wind tunnel testing is also helpful to provide estimations of the dynamic wind load reduction provided by damping systems [30]. In this work we shall study a open-circuit wind tunnel placed at the Hydraulic Machines Laboratory of la Universidad ECCI¹. This device is a handcrafted structure, and the flow inside it is not characterized.

¹Open circuit wind tunnels are generally easier to build than closed wind tunnels [31]. However, the latter offers advantages such as better control of the quality of the flow.

The main goal of this study is to determine the parameters that negatively affect the tunnel's performance by analyzing its current design and the inner flow with numerical simulations.

This document presents an analysis of the flow dynamics in stationary conditions inside a wind tunnel that aims to identify the structural imperfections of the device that affect the laminarity of the flow at low velocities. With this in mind, standard simulation techniques and previous studies on open tunnels are used which allow for decision-making regarding the redesign of the wind tunnel in the contraction section and the diffuser. In principle, numerical simulations allow us to obtain data on the flow of regions inside the tunnel, where experimental measurements are difficult to take. This currently occurs in regions of the contraction section and the diffuser. The numerical values of the velocity obtained from different simulations are contrasted with flow measurements made in the working section, thus showing a good agreement between them. Analysis of the density distribution of the simulations inside the tunnel allows observing that the variations in density are so small that the flow behaves according to the incompressibility condition, despite the fact that the air is compressible. This certainly occurs on the current device since it operates at low velocities. We shall see that modifications on the contraction and diffuser sections can positively affect the quality of the flux, resulting in an important vorticity reduction in the working section.

This document is organized as follows: a description of the wind tunnel is presented in Section 2. In this section, we also present a dimensional verification of the existing wind tunnel geometry for compare them with standard criteria on wind tunnel design [32]–[34] and other low-speed tunnels designs [35]–[37]. Here, we proposed to modify the contraction section and the diffuser. Section 4 is devoted to the implementation of the Finite Element Method (FEM) and the definition of the lattice. We use an algorithm to compute the stream function of the irrotational case under a bidimensional approximation. Experimental measurements of the velocity distribution of incoming environment flow as a function of the angular velocity of the wind tunnel fan are shown in Section 5. These measurements are employed as input parameters for numerical simulations of the flow in the existing tunnel, as well as the tunnel with the proposed modifications. A comparison and a discussion are presented at the end of the document.

2. Materials and methods

2.1. Description and dimensional verification of the tunnel

An open-circuit tunnel is composed of a stabilization chamber, contraction, test section, and a diffuser (Fig. 1). The stabilization chamber has a flow conditioner to correct the incoming flow from the environment. The contraction is a section that takes the low-velocity inlet flow to increase its velocity at the end of the section, where prototypes are located. Subsequently, the flow enters the test section, and later its velocity is later reduced in the diffuser as it is shown in Fig. 1. The velocity of the fluid flow is controlled with a fan of variable angular velocity located at the end of the diffuser. We shall determine if the current wind tunnel is in accordance with standard tunnel designs in the next subsection. This is relevant because there are several experimental studies that show that wind tunnel design may drastically change the quality of the flow inside in the test section. These studies on wind tunnels defined standard design criteria that ensure the best performance [32].

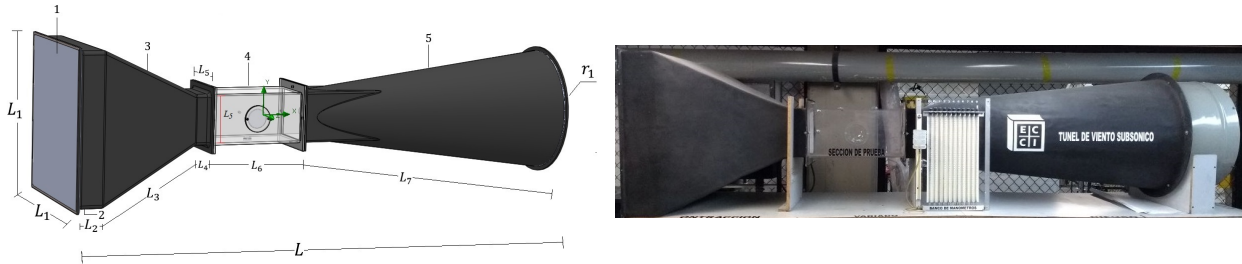


Fig. 1. Schematic of the open-circuit wind tunnel. Digitalized plot of the wind tunnel in Universidad ECCI (left). The parts of tunnel are: (1) flow conditioner, (2) stabilizer chamber, (3) contraction section, (4) test section, and (5) the diffuser. The wind tunnel (right).

2.2. Components and dimensions of the wind tunnel

Test section. Generally, the design of the wind tunnels is defined from the dimensions of the test chamber or working section. The size of this section defines the largest dimensions of the models inside it [38]. Typically, prototypes cannot be larger than 80% of the working section size. The function of the test chamber is to allow measuring quantities regarding the aerodynamic performance of any prototype inside it. The measurement of forces that flow exerts on the object such as the lift and drag are performed in the test section [34]. Additionally, this section is also employed to visualize the flow lines around the model. In the existing wind tunnel we have a test section whose shape is a rectangular cuboid of dimensions $L_5^2 \times L_6$ where $L_5 = 0,25$ m is the base (and the height) $L_6 = 2L_5$ the length.

Diffuser. This section is designed to decrease the fluid flow velocity with the least possible loss of energy. It is usually desirable to reduce the speed in the shortest distance possible, without separating the flow [39]. The flow through a diffuser depends on its geometry, defined by the following area ratio $\zeta_{diffuser} = A_{out}/A_{int} = (\pi/4) (R_{out}/R_{in})^2$, where A_{out} is the circular area at the diffuser exit. That exit is a circle of radius $R_{out} = 0,315$ m and A_{int} is the transversal area of the test section, where $L_5/2 := R_{in} = 0,125$ m. Generally, $\zeta_{diffuser} \in [2, 3]$ and the angle defining the slope (with respect to the horizontal) of the diffuser $\theta_e = \arcsin [(R_{out} - R_{in})/L_7]$ must be in the interval $2^\circ < \theta_e < 3,5^\circ$ with a preference for the lowest angles. Measurements of θ_e on the existing tunnel show that they are outside the established range, as well as the area ratio as it is shown in Table. I.

Table I. Comparison between the suggested dimensions expected on standard design and the values measured on the existing wind tunnel.

Parameter	Suggested values by design	Current values
$\zeta_{diffuser}$	2,01	4,99
θ_e (degrees)	3	8,99
$\zeta_{stabilizer}$	7	9
L_2 (m)	0,33	0,15
Number of cells	9900	13500
Hydraulic diameter of the cell $D_h^{(cell)}$ (mm)	5,5	5

Stabilizer section. This section is included to correct the flow at the tunnel entrance by using a flow conditioner to stabilize the air currents. As occurs with the diffuser, the dimensions of the stabilizer section are set according to an area ratio $\zeta_{stabilizer} = L_1^2/L_5^2$, which should be in the interval

$\zeta_{stabilizer} \in [7, 8]$ [34], and the length L_2 of stabilizer section is defined with the hydraulic diameter $D_h = 2L_2 = L_1$ of the stabilizer section². Table I lists the current values of the stabilizer section, as well as the corresponding expected ones by design.

Flow conditioner. The existing wind tunnel flow conditioner consists of a duct mesh with a circular cross-section of radius 0,5 cm. Flow conditioners are essential to reduce the turbulence intensity and flow re-circulation, being the honeycomb mesh one of the most used in Wind tunnel designs [40]. In principle, the structural rigidity of the mesh must be enough to withstand forces applied during operation without significant deformation [32], [33]. For circular, square, or hexagonal flow conditioners with $L_2/D_h^{cell} = 6$ and equal tube areas, the loss coefficients K for each conditioner are 0,30, 0,25 and 0,20. Here, $D_h^{(cell)}$ is the hydraulic diameter of the cell, and L_2 is the length of a cell that corresponds to the value of the length of the stabilization chamber. Approximately 150 honeycomb cells (for hexagonal flow conditioners) are defined per diameter for the stabilization chamber. A total of 25.000 cells needed in the flow conditioner is suggested. However, this can only be achieved in large-size wind tunnels [34].

Contraction. The contraction is a critical part in the design because it may have the largest impact on the flow quality in the test section [32], [33]. Standard design suggests that \mathcal{L}/L_1 must be set at 1,25, where \mathcal{L} is the length of the contraction section (measured along the x -axis). Not only the dimensions of the contraction section, but also its shape plays an important role in the design, and there are simple but efficient analytic approaches to define the contraction curve. One of them is to define a polynomial whose coefficients are set depending on the dimensions of cross-sections in the stabilizer and the test section.

Contraction curve in two-dimensions

The contraction is designed with a continuous and soft curve to minimize the negative effects when the cross section of the duct is decreased. If f is a polynomial of degree 3 defining the contraction curve in two-dimensions (Fig. 2, left), then $f(x) = \sum_{n=0}^3 C_n x^n$ with C_n real coefficients, which can be set depending on the length of the contraction section \mathcal{L} , the length H of the entrance, and the length h at the exit of the contraction. Additionally, $f(x)$ is forced to pass through the middle point $f(\frac{\mathcal{L}}{2}) = \frac{1}{2}(\frac{H}{2} + \frac{h}{2}) = \frac{1}{4}(H + h)$. Coefficient C_0 is found by evaluating the function at zero, $f(0) = C_0 = \frac{H}{2}$. Since the function must have the middle point $(\frac{\mathcal{L}}{2}, \frac{1}{4}(H + h))$, then $f(\frac{\mathcal{L}}{2}) = \frac{H}{2} + C_1(\frac{\mathcal{L}}{2}) + C_2(\frac{\mathcal{L}}{2})^2 + C_3(\frac{\mathcal{L}}{2})^3 = \frac{1}{4}(H + h)$. Similarly, we demand that $f(x)$ must have the point $(\mathcal{L}, h/2)$; this is $f(\mathcal{L}) = \frac{H}{2} + C_1\mathcal{L} + C_2\mathcal{L}^2 + C_3\mathcal{L}^3 = \frac{h}{2}$.

These equations are not enough to find the polynomial coefficients. For this reason, it is necessary to impose another condition consisting on the annullment of the first derivative of f at $x = 0$ or $x = \mathcal{L}$. Explicitly, the first derivative is $D_x f(x) = C_1 + 2C_2x + 3C_3x^2$. Hence, $D_x f(0) = 0 = C_1$. They system can be written as $\hat{\mathcal{A}}\mathbf{C} = \mathbf{b}$, where

²In the current setup (Fig. 1), this recommended relationship between the stabilizer length L_2 and the inlet hydraulic diameter D_h is not satisfied. In the re-designed version of the wind tunnel in Fig. 3, the ratio $L_2 = D_h/2$ is fulfilled.

$$\hat{\mathcal{A}} = \begin{pmatrix} (\mathcal{L}/2)^2 & (\mathcal{L}/2)^3 \\ \mathcal{L}^2 & \mathcal{L}^3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}, \quad \text{and} \quad \mathbf{b} = (h - H) \begin{pmatrix} 1/4 \\ 1/2 \end{pmatrix}.$$

The solution of this 2×2 linear system is $\mathbf{C} = \hat{\mathcal{A}}^{-1}\mathbf{b}$ this is $(C_2, C_3) = \frac{8(h-H)}{\mathcal{L}^3}(3\mathcal{L}/16, -1/8)$. It is also possible to use the condition $D_x f(\mathcal{L}) = 0$ to find the coefficients, thus obtaining the same result for C_1, C_2 and C_3 . In sum, the contraction curve is $f(x) = \sum_{n=0}^3 C_n x^n$ with $C_0 = \frac{H}{2}$, $C_1 = 0$, $C_2 = \frac{3}{2} \left(\frac{h-H}{\mathcal{L}^2} \right)$, and $C_3 = \left(\frac{H-h}{\mathcal{L}^3} \right)$. A plot of $f(x)$ is shown in Fig. 2-(left). The other contraction curve is obtained by a reflection with respect to the x -axis as it is shown in Fig. 2-(right), where

$$f_{\pm}(x) = \sum_{n=0}^3 c_n^{\pm} x^n \quad \text{with} \quad c_n^{\pm} = \pm C_n. \quad (1)$$

Contraction curves in three-dimensions

It is possible to use the contraction curves on the plane $f_{\pm}(x)$ in order to build the contraction section in the three-dimensional space. A curve in the space can be written as $\Gamma = \{\mathbf{r}(\chi) : a < \chi < b\}$, where χ is the trajectory parameter. We define the contraction curves in the space as follows:

$$\Gamma_{\{s_1, s_2\}}(\chi) = \{(\chi, f_{s_1}(\chi), f_{s_2}(\chi)) : 0 < \chi < \mathcal{L}\} \quad (2)$$

where $\{s_1, s_2\}$ are signs used to denote the fourth curves of the contraction section $\Gamma_{\{+,+\}}(\chi)$, $\Gamma_{\{+,-\}}(\chi)$, $\Gamma_{\{-,+\}}(\chi)$ and $\Gamma_{\{-,-\}}(\chi)$ which define its boundary. In Fig. 3 (left), we show the contraction section by setting \mathcal{L} , H and h with the same values used for bi-dimensional curves on Fig. 2. Finally, the wind tunnel including the proposed dimensions by design in Table I is shown in Fig. 3. To this aim, formulas in Eqs. (1) and (2) are employed to analytically define the parametric components of the curve, which can be introduced in 3D design software *e.g.* Solidworks. We would like to stress that there are other alternatives to choosing contraction curves, such as higher order polynomials. This topic is studied by author in Ref. [41].

There are other strategies to properly design the contraction curve of a wind tunnel [42]–[44] to reduce the wind tunnel losses and provide a high quality flow at the working section. For the case of low-speed wind tunnels, the contraction curve can be modeled by using polynomials of

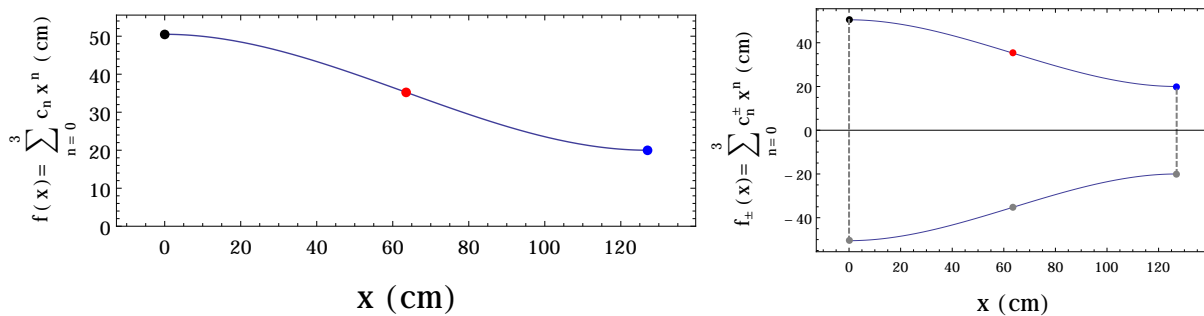


Fig. 2. 2D Contraction curve. Cubic interpolation (left) Reflected curve (right). Black, red, and blue points are located at $(0, H/2)$, $(\mathcal{L}/2, (H+h)/4)$ and $(\mathcal{L}, h/2)$ respectively. We used the following values $\mathcal{L} = 127\text{cm}$, $H = 100\text{cm}$ and $h = 40\text{cm}$ on these plots.

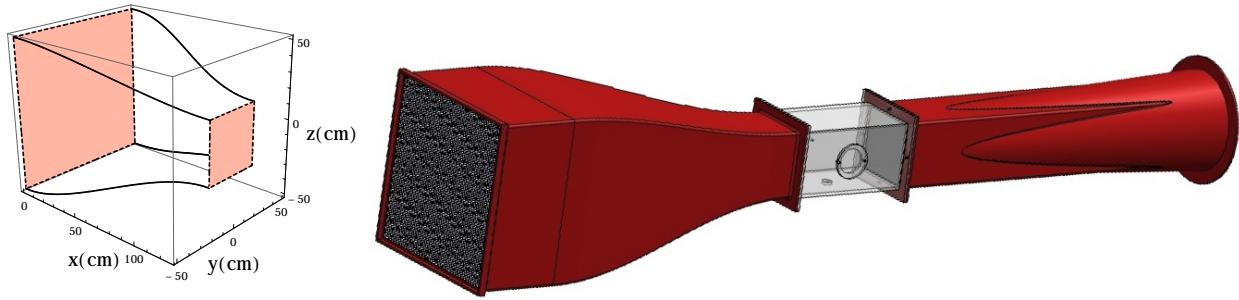


Fig. 3. Modified wind tunnel. This plot is a modified version of the existing tunnel in Fig. 1 and includes suggested values for standard wind tunnels design.

$n - th$ order typically $n = 3, 4, 5$, or higher. A study regarding wind tunnels under the irrotational incompressible model in Ref. [44] showed that contraction curves up to the 5th order without quadratic contribution provide good results at low velocities. There are also techniques concerning cubic spline curves, whose control points are properly set to enhance the the outflow at the end of the contraction section [42].

3. Governing equations

The dynamics of fluid flow are based on momentum, mass, and energy conservation laws. The set of mathematical expressions regarding these laws in fluids mechanics are known as Navier-Stokes equations. The Navier-Stokes momentum equation [45] for compressible fluid flow is

$$\rho(\partial_t \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{\mu}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + \rho \mathbf{g}$$

where \mathbf{v} is the velocity field, P the pressure, μ the viscosity, \mathbf{g} the gravity and ρ the density. The conservation of mass is given by the continuity equation

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0.$$

This work is limited to study the fluid in stationary conditions. For the continuity equation, this implies $\partial_t \rho = 0$. In general, the density into a wind tunnel is not uniform, since the air is a compressible fluid. However, it is possible to use the incompressibility approximation for low-speed wind tunnels where the spatial variation of density is negligible. Under these conditions, the mass conservation law is

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (3)$$

Thus the steady momentum equation ($\partial_t \mathbf{v}$) takes the form of

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g}. \quad (4)$$

The energy equation under steady conditions is

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \left(c_v T + \frac{v^2}{2} \right) = \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} - \nabla \cdot (p \mathbf{v}) + \nabla \cdot \left[2\mu \nabla \left(\frac{v^2}{2} \right) + \mu \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \right] + \kappa \nabla^2 T \quad (5)$$

where $\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \vec{v}$ is the vorticity, T is temperature, c_v the specific heat capacity at constant volume, and κ is the thermal conductivity. This equation does not consider heating sources such as

absorption or emission of radiation, but it considers heat transfer due to temperature gradients. In wind aerodynamics, it is generally reasonable to assume that air is a perfect gas, which implies that intermolecular forces are negligible. The equation of state of the ideal gas is $P = \rho \mathcal{R}T$, where \mathcal{R} is the ideal gas constant. The energy of the ideal gas is $U = C_v T$, with C_v being the heat capacity and the energy per unit of volume $\rho C_v T$. The system of Eqs. (3),(4),(5), and the state equation must be solved for the velocity components and the thermodynamic variables. This system of equations does not have a general analytical solution, and the problem is addressed with numerical methods. The system can be simplified depending on the regime of the flow. For instance, if the fluid flow in the tunnel is assumed to be laminar, the advective contributions (terms regarding the operator $\mathbf{v} \cdot \nabla$) are small. If the fluid flow in the tunnel is laminar, the Mach number is small and the spatial variation of density negligible; then, it is possible to use the Bernoulli's principle

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y + P = \text{constant}$$

if we move along a stream line with y being the elevation of the point above a reference plane. In fact, the Bernoulli's principle is a consequence of the energy conservation along a single stream line of the fluid. Another approach to greatly simplify the problem is to model the tunnel as a bi-dimensional channel. Here, the continuity equation in two dimensions $\nabla \cdot \mathbf{v} = \partial_x v_x + \partial_y v_y = 0$ is satisfied by defining the components of velocity as $v_x = \partial_y \psi$ and $v_y = -\partial_x \psi$, where $\psi = \psi(x, y)$ is the two-dimensional stream function. This function can be obtained from the vorticity $\omega = \nabla \times \mathbf{v}$ via the Poisson's equation³

$$\nabla^2 \psi = -\omega$$

which reduces to the Laplace equation $\nabla^2 \psi = 0$ when fluid is considered irrotational. Modelling wind tunnels under a incompressible and irrotational assumptions simplifies a lot the equations of motion and it is possible to use potential flow solvers (see Ref. [44]), but this approach is limited to low-speed wind tunnels.

4. Implementation of the numerical method

The Finite Difference FDM and Finite Element Methods FEM are standard numerical methods used for solving ordinary and partial differential equations. Even when there are software packages which enables to solve traditional problems in Computational Fluid Dynamics and Engineering [46]–[50], it is still useful to implement and programme the FEM including the meshing not only for fluid mechanics problems but also other problems in physics and engineering [51]–[55] [56]–[58].

This section focuses on the application of the FEM in order to obtain numerically the stream function in the wind tunnel for an irrotational case, in other words, when vorticity is negligible. A brief description of the interpolation functions, the discretization of the Laplace's equation for the stream function and the definition of the two-dimensional mesh inside the tunnel will be shown.

³This equation is combined with the steady vorticity equation

$$\omega \cdot \nabla \mathbf{v} = \nu \nabla^2 \omega$$

which is obtained by taking the curl of Eq. (4). This is valid for low Mach numbers.

4.1. Global and local elements

Let us consider a two-dimensional domain, where a mesh of elements has been defined with $e = 1, \dots, M$ and M is the total number of elements. We shall use triangular elements in the plane, where N is the number of global elements and numbered with the index $\alpha = 1, \dots, N$. Each triangular element (e) has three nodes located at the vertices of the triangle with positions $x_m^{(e)}$, where $m = 1, 2, 3$ as it is shown in Fig. 4. Two coordinate systems are then defined. The XY frame is a reference system used to define the global positions. On the other hand, the positions of the nodes in the xy frame will define the positions of those nodal points with respect to the center of each element. The geometrical center of each element, the *centroid*, is localized at $(X_c^{(e)}, Y_c^{(e)})$ (with respect to the XY frame) and is computed as an average of the local positions $X_c^{(e)} = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 X_m^{(e)}$ and $Y_c^{(e)} = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 Y_m^{(e)}$, where $(X_m^{(e)}, Y_m^{(e)})$ is the m -th nodal position of the element (e).

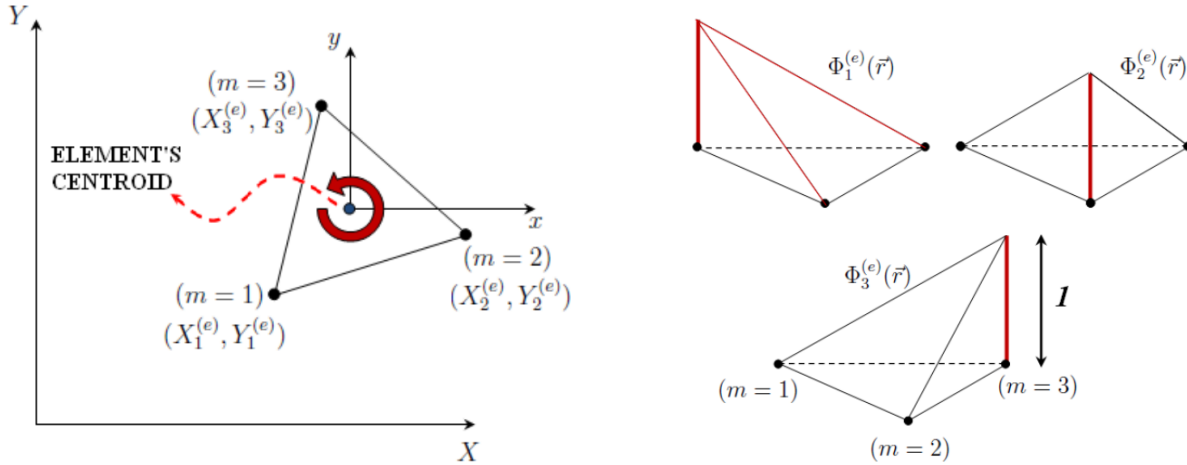


Fig. 4. Local elements employed in our simulations.

4.2. Linear interpolation functions

Three local functions $\Phi_m^{(e)}(\mathbf{r})$ with $m = 1, 2, 3$ are defined on the nodes of each element. If they are linear, then $\Phi_m^{(e)}(\mathbf{r}) = a_m^{(e)} + b_m^{(e)}x + c_m^{(e)}y$, where $a_m^{(e)}$, $b_m^{(e)}$ y $c_m^{(e)}$ are coefficients. Local functions are shown Fig. 4-(right), and they have the following property $\Phi_m^{(e)}(\mathbf{r}_n) = \delta_{m,n}$. The coefficients $a_m^{(e)}$ are a constant $a_m^{(1)} = a_m^{(2)} = a_m^{(3)} = 1/3$ [59], and the coefficients $b_m^{(e)}$ can be computed with the local positions with respect to the centroid as follows: $b_1^{(e)} = \frac{1}{2A^{(e)}}(y_2^{(e)} - y_3^{(e)})$, $b_2^{(e)} = \frac{1}{2A^{(e)}}(y_3^{(e)} - y_1^{(e)})$, and $b_3^{(e)} = \frac{1}{2A^{(e)}}(y_1^{(e)} - y_2^{(e)})$. Similarly, the coefficients $c_m^{(e)}$ are

$$c_1^{(e)} = \frac{x_3^{(e)} - x_2^{(e)}}{2A^{(e)}}, \quad c_2^{(e)} = \frac{x_1^{(e)} - x_3^{(e)}}{2A^{(e)}}, \quad c_3^{(e)} = \frac{x_2^{(e)} - x_1^{(e)}}{2A^{(e)}}, \quad \text{and} \quad A^{(e)} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_1^{(e)} & y_1^{(e)} \\ 1 & x_2^{(e)} & y_2^{(e)} \\ 1 & x_3^{(e)} & y_3^{(e)} \end{vmatrix}$$

the area of each element. The last determinant gives the area, assuming that local nodes are numbered in a counter-clock wise sense. Otherwise, this expression result in minus the area of the

element. The node positions are computed as follows: $x_m^{(e)} = X_m^{(e)} - X_c^{(e)}$, and $y_m^{(e)} = Y_m^{(e)} - Y_c^{(e)}$. This corresponds to a translation due to a change of reference frame. The global functions are defined as follows: $\Phi_\alpha(\mathbf{r}) = \sum_{e=1}^M \Delta_{\alpha m}^{(e)} \Phi_m^{(e)}(\mathbf{r})$, where $\Delta_{\alpha m}^{(e)}$ is a boolean matrix that is 1 when the local node m of the element (e) is the global node α . Otherwise, it is zero.

4.3. Irrotational flow

An approach to the laminar incompressible flow at low velocities is to assume that vorticity is small everywhere. This implies that the stream function satisfies a Laplace's equation $(\partial_x^2 + \partial_y^2) \psi(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^2 \partial_{x_i}^2 \psi(\mathbf{r}) = 0$, where $v_x = \partial_y \psi$ and $v_y = -\partial_x \psi$. Defining S as the surface of the longitudinal section of the wind tunnel then $\oint_S \Phi_\alpha(\mathbf{r}) \sum_{i=1}^2 \partial_{x_i}^2 \psi(\mathbf{r}) dS = 0$, expanding the stream function on the basis $\{\Phi_\alpha(\mathbf{r})\}_{\alpha=1, \dots, N}$ with N the total global nodes in S . Then,

$$\psi(\mathbf{r}) = \sum_{\beta=1}^N \psi_\beta \Phi_\beta(\mathbf{r}) \quad \text{then} \quad \sum_{\beta=1}^N \sum_{i=1}^2 \left[\oint_S \Phi_\alpha(\mathbf{r}) \partial_{x_i}^2 \Phi_\beta(\mathbf{r}) dS \right] \psi_\beta = 0.$$

The last expression can be integrated by parts

$$- \sum_{\beta=1}^N \sum_{i=1}^2 \left[\oint_S \partial_{x_i} \Phi_\alpha(\mathbf{r}) \partial_{x_i} \Phi_\beta(\mathbf{r}) dS \right] \psi_\beta + \left[\oint_C \Phi_\alpha^*(\mathbf{r}) \partial_n \Phi(\mathbf{r}) dl \right] = 0,$$

where ∂_n is the normal derivative and the closed loop C is the boundary of S . Considering Dirichlet boundary conditions on C and defining M as the total number of inner nodes in S , then

$$\sum_{\beta=1}^N K_{\alpha\beta} \psi_\beta = F_\alpha \quad \text{where} \quad K_{\alpha\beta} := \sum_{i=1}^2 \oint_S \partial_{x_i} \Phi_\alpha(\mathbf{r}) \partial_{x_i} \Phi_\beta(\mathbf{r}) dS \quad \text{and} \quad F_\alpha := - \sum_{\beta=M+1}^N K_{\alpha\beta} \psi_\beta^* \quad (6)$$

with $\mathbf{r}^* \in C$ boundary points, and $\psi_\beta^* = \psi(\mathbf{r}_\beta^*)$ the values of the stream function on C , which defines the Dirichlet conditions.

4.4. Two-dimensional lattice: planar channel approximation

In this section a lattice construction in the internal geometry of the wind tunnel will be described. We start with a two-dimensional approximation of the tunnel, considering it as a two-dimensional channel. We define N' as the number of boundary points. Procedure is as follows: we measured the positions of the boundary points of the tunnel. Later, all dimensions were rescaled with total length L of the tunnel, so the rescaled coordinates at the exit of the tunnel have an x -coordinate equal to the unit. We have defined four subsets of points $\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2, \mathcal{B}_3$ and \mathcal{B}_4 with the boundary points, where \mathcal{B}_1 is the upper boundary, \mathcal{B}_2 the lower boundary, \mathcal{B}_3 the inlet, and \mathcal{B}_4 the outlet.

The whole boundary is $\mathcal{B} = \mathcal{B}_1 \cup \mathcal{B}_2 \cup \mathcal{B}_3 \cup \mathcal{B}_4$. A picture of the existing wind tunnel is shown in Fig. 1 (right). We have defined a piece-wise function $f(x)$ by using the points of \mathcal{B}_1 . Here, $f(x)$ is built by joining the points boundary points $(x_1, y_1), \dots, (x_{N_s}, y_{N_s})$ with $N_s = \dim(\mathcal{B}_1)$ with straight lines. This is $f(x) = m_{j(x)}(x - x_{j(x)}) + y_{j(x)}$, where $j(x)$ is a function of $x \in [0, 1]$,

which returns an integer number which labels the interval of piece-wise function $j(x) = i$ if $x \in [x_i, x_{i+1}]$. Similarly, we used the same technique to define another piece-wise function " $g(x) < 0$ " corresponding to the lower boundary \mathcal{B}_2 of the wind tunnel. The functions f and g are used to define the inner points since these points satisfy $(x, y) \in S$ if $g(x) < y < f(x) \quad \forall (x/L) \in (0, 1)$, where S is the inner region. We wrote a short code in Mathematica to fill the region with points arranged in hexagonal lattice. Finally, a simple algorithm in C++ was used to perform the Delaunay Triangulation of the points (Fig. 5).

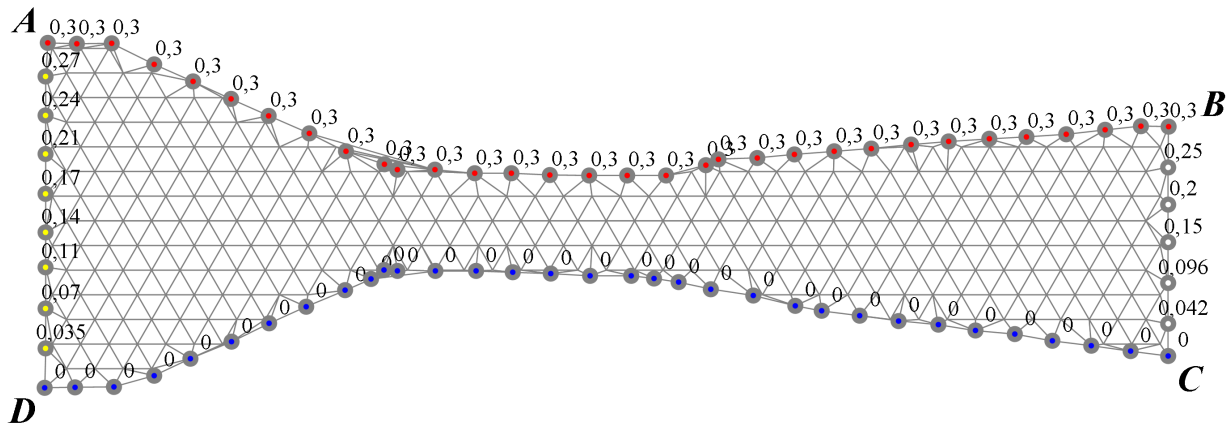


Fig. 5. Meshing of the domain. Numbers in the boundary nodes corresponds to the stream function.

The velocity at the entrance \mathcal{B}_3 is denoted as v_{in} . We may use the following condition $v_{out} = v_{in}(y_A - y_D)/(y_D - y_C)$ based on the mass conservation law to fix the velocity at the outlet \mathcal{B}_4 . The inlet velocity is uniform, so the boundary condition on the stream function ψ at the entrance is

$$\psi(0, y) = v_{in}(y - y_D) \quad \forall \quad y \in \mathcal{B}_3$$

since $v_{in} = \partial_y \psi(0, y)$. Similarly, the boundary condition on the stream function at the outlet is

$$\psi(0, y) = v_{out}(y - y_C) \quad \forall \quad y \in \mathcal{B}_4.$$

The stream function in the upper boundary is set as follows:

$$\psi(x, y) = v_{in}(y_A - y_C) \quad \forall \quad (x, y) \in \mathcal{B}_1,$$

and the stream function at the lower boundary is set as zero

$$\psi(x, y) = 0 \quad \forall \quad (x, y) \in \mathcal{B}_2.$$

5. Measurements

We have performed measurements at the entrance of the tunnel in order to find experimentally the distributions of the velocity, pressure and temperature. To this aim, we used a weather sensor including an anemometer, thermometer, and a barometer. The wind speed range of the sensor is $[0, 1, 29]m/s$ with a speed resolution of $0, 1m/s$ and wind speed accuracy of $\pm 3\%$. The barometer

measures pressures from 150 to 1150 hPa (hecto pascals), with an accuracy of 1hPa and a resolution of 0,03hPa. The temperature range of the device is $-20^{\circ}C$ to $50^{\circ}C$ with $\pm 0,5^{\circ}C$ of accuracy and 0,1 $^{\circ}C$ of resolution.

Measurements were performed at the center of the cells of a rectangular lattice defined at the entrance with dimensions $\delta x \delta y$ with $\delta x = L_x/N$ and $\delta y = L_y/N$, with $L_x = L_y = 75\text{cm}$ and $N = 12$. The length of the square cell $L_x L_y$ was chosen so that it fitted with the area of the anemometer. The center of the anemometer of the (i, j) -th measurement was located at $x_i = (2i - 1)\frac{\delta x}{2}$ and $y_j = (2j - 1)\frac{\delta y}{2}$. We performed 144 measurements of the inlet velocity, pressure, and temperature for the following values: 10, 27, and 53 Hz of angular velocity of the fan. The values of velocity, pressure and temperature for 10 Hz are shown in Table. II. Similar tables were built for 27 and 53 Hz.

Table II. Inlet parameters. Measurements on the entrance of the wind tunnel for 10Hz.

i	j	$v_z(m/s)$	$T(^{\circ}C)$	$P(Pa)$	i	j	$v_z(m/s)$	$T(^{\circ}C)$	$P(Pa)$	i	j	$v_z(m/s)$	$T(^{\circ}C)$	$P(Pa)$	i	j	$v_z(m/s)$	$T(^{\circ}C)$	$P(Pa)$
1	1	0,3±0,04	20,1	727,46	4	1	0,3±0,02	20,1	727,47	7	1	0,3±0,02	19,9	727,44	10	1	0,3±0,02	19,9	727,45
1	2	0,3±0,03	20	727,43	4	2	0,4±0,02	20	727,41	7	2	0,4±0,02	20	727,4	10	2	0,3±0,02	19,9	727,37
1	3	0,4±0,04	20	727,39	4	3	0,4±0,02	19,9	727,37	7	3	0,4±0,02	20	727,41	10	3	0,4±0,02	19,8	727,37
1	4	0,3±0,04	19,9	727,44	4	4	0,5±0,02	19,9	727,35	7	4	0,5±0,02	20	727,35	10	4	0,4±0,02	19,9	727,35
1	5	0,3±0,04	20,1	727,47	4	5	0,5±0,02	19,9	727,29	7	5	0,5±0,02	20	727,28	10	5	0,5±0,02	19,9	727,37
1	6	0,3±0,03	20,2	727,47	4	6	0,5±0,02	20	727,34	7	6	0,6±0,02	20,1	724,25	10	6	0,5±0,02	19,9	727,37
1	7	0,4±0,04	20	727,45	4	7	0,5±0,02	20	727,4	7	7	0,6±0,02	20	724,28	10	7	0,5±0,02	19,9	727,37
1	8	0,4±0,04	20	727,44	4	8	0,4±0,02	20	727,38	7	8	0,5±0,02	20	727,3	10	8	0,5±0,02	20	727,39
1	9	0,3±0,04	20,1	727,39	4	9	0,4±0,02	20	727,35	7	9	0,5±0,02	20	727,35	10	9	0,5±0,02	20	727,37
1	10	0,3±0,04	20	727,46	4	10	0,4±0,02	20	727,42	7	10	0,4±0,02	19,9	727,38	10	10	0,4±0,02	19,9	727,37
1	11	0,3±0,03	20,1	727,47	4	11	0,4±0,02	20,1	727,47	7	11	0,4±0,02	19,8	727,28	10	11	0,4±0,02	19,8	727,37
1	12	0,3±0,04	20,1	727,45	4	12	0,3±0,04	20,1	727,47	7	12	0,4±0,03	20	727,3	10	12	0,3±0,02	20	727,4
2	1	0,3±0,02	19,8	727,38	5	1	0,3±0,02	20,1	727,35	8	1	0,3±0,02	20	727,3	11	1	0,3±0,02	19,9	727,37
2	2	0,3±0,02	19,9	727,35	5	2	0,4±0,02	20	727,34	8	2	0,4±0,02	20,1	727,45	11	2	0,3±0,02	19,9	727,37
2	3	0,4±0,02	19,9	727,4	5	3	0,4±0,02	20	727,37	8	3	0,4±0,02	20	727,44	11	3	0,3±0,02	19,9	727,42
2	4	0,4±0,02	19,8	727,35	5	4	0,5±0,02	20	727,38	8	4	0,4±0,02	20	727,42	11	4	0,4±0,02	20	727,37
2	5	0,4±0,02	19,8	737,38	5	5	0,5±0,02	20	727,37	8	5	0,5±0,02	20	727,35	11	5	0,4±0,02	19,9	727,37
2	6	0,5±0,02	19,8	727,35	5	6	0,5±0,02	20	727,37	8	6	0,5±0,02	20	727,37	11	6	0,4±0,02	19,9	727,37
2	7	0,5±0,02	19,8	727,35	5	7	0,5±0,02	20	727,4	8	7	0,6±0,02	19,7	727,37	11	7	0,4±0,02	19,9	727,37
2	8	0,5±0,02	19,8	727,37	5	8	0,5±0,02	20	727,35	8	8	0,5±0,02	19,8	727,37	11	8	0,5±0,02	20	727,42
2	9	0,5±0,02	19,8	727,39	5	9	0,4±0,02	20,1	727,37	8	9	0,4±0,02	19,9	727,37	11	9	0,4±0,02	19,9	727,37
2	10	0,4±0,02	19,9	727,37	5	10	0,4±0,02	19,9	727,37	8	10	0,4±0,02	19,9	727,42	11	10	0,4±0,02	19,9	727,37
2	11	0,4±0,02	20	727,44	5	11	0,4±0,02	19,9	727,29	8	11	0,4±0,02	19,9	727,4	11	11	0,3±0,02	19,9	727,4
2	12	0,3±0,04	20	727,45	5	12	0,3±0,02	19,9	727,4	8	12	0,3±0,03	20	727,42	11	12	0,3±0,03	19,9	727,37
3	1	0,3±0,02	20,1	727,46	6	1	0,4±0,04	20	727,28	9	1	0,3±0,02	20	727,35	12	1	0,3±0,03	19,9	727,32
3	2	0,3±0,02	20	724,44	6	2	0,7±0,02	20	727,27	9	2	0,4±0,02	20	727,37	12	2	0,4±0,04	19,9	727,43
3	3	0,4±0,02	19,9	724,37	6	3	0,7±0,02	20	727,37	9	3	0,4±0,02	20	727,34	12	3	0,3±0,04	19,9	727,39
3	4	0,5±0,02	19,9	724,37	6	4	0,6±0,02	20	727,32	9	4	0,4±0,02	20	727,27	12	4	0,4±0,04	19,9	727,44
3	5	0,5±0,02	19,8	724,37	6	5	0,5±0,02	20	727,27	9	5	0,5±0,02	19,9	727,32	12	5	0,4±0,04	19,9	727,47
3	6	0,5±0,02	19,9	727,47	6	6	0,5±0,02	20	727,37	9	6	0,5±0,02	20	727,35	12	6	0,3±0,04	19,9	727,47
3	7	0,4±0,02	19,9	727,37	6	7	0,6±0,02	19,8	727,27	9	7	0,5±0,02	20	727,37	12	7	0,4±0,04	19,9	727,45
3	8	0,5±0,02	19,8	727,35	6	8	0,5±0,02	19,9	727,29	9	8	0,5±0,02	20	727,4	12	8	0,3±0,04	19,9	727,44
3	9	0,5±0,02	19,8	727,37	6	9	0,5±0,02	19,9	727,34	9	9	0,5±0,02	19,9	727,4	12	9	0,3±0,04	19,9	727,39
3	10	0,4±0,02	19,9	727,37	6	10	0,4±0,02	19,9	727,37	9	10	0,4±0,02	20	727,42	12	10	0,3±0,04	19,9	727,37
3	11	0,4±0,02	20,1	724,45	6	11	0,4±0,02	20	727,37	9	11	0,4±0,02	20	727,34	12	11	0,3±0,04	19,9	727,32
3	12	0,3±0,04	20	727,48	6	12	0,3±0,04	19,9	727,37	9	12	0,3±0,03	19,9	727,45	12	12	0,2±0,05	19,8	727,28

Although the frequency of the fan remained constant for each set of measurements, the flow speed at the inlet was not perfectly stationary and showed small variations, which ranged from 5 to 10%

depending on the point where the measurement was made. In general, the fluctuations were slightly larger near the tunnel walls.

The pressure and temperature for 53 Hz are shown in Fig. 6. Small variations of pressure and temperature Fig. 6 are normal fluctuations due to the atmosphere. The average value of the barometric pressure $\langle P \rangle$ and Temperature $\langle T \rangle$ in the inlet are in Table. III for 10, 27 and 57 Hz. The averages are computed with the 144 measurements in the inlet, where σ and e are the standard deviation and relative errors, respectively. The mean values for pressure and temperature are independent of the fan frequency, since the the inlet is open to the atmosphere.

Table III. Mean values and error estimate of the inlet flow.

Frequency of the fan	Mean velocity	Standard deviation	Relative error	Barometric pressure	Relative error	Temperature	Relative error
f (Hz)	$\langle v_{in} \rangle_N$ (m/s)	σ_v	e_v	$\langle P \rangle$ (Pa)	e_P	$\langle T \rangle$ ($^{\circ}C$)	e_T
10	0,4097	0,0866	21,38%	727,304	0,14%	19,9486	0,14%
27	1,7479	0,2809	16,21%	727,26	0,004%	19,6854	0,43%
53	4,1153	0,5070	12,32%	727,135	0,005%	19,5480	0,79%

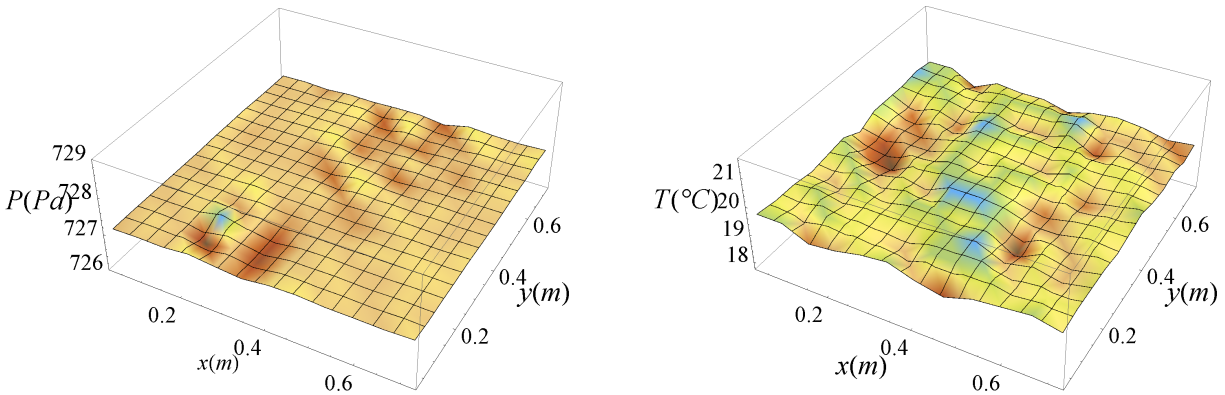


Fig. 6. Pressure (left) and temperature (right) at the inlet for 53 Hz.

In principle, it is expected to measure a uniform inlet velocity. However, it was observed variations in all velocity profiles for each fan frequency as shown in Fig. 7. These variations can be attributed to asymmetries in the diffuser, but also to the current design of the contraction section. In simulations, we take average of the inlet velocity as boundary condition. These average, along with their corresponding errors, are presented in Table. III.

Other sources of error on the fluid velocity measurements are the re-circulation and the fan noise. The flow generally tends to be turbulent at the fan outlet. Although, the wind tunnel studied is open, the entire structure is confined in a closed space⁴. Therefore, the fluid from the fan outlet will enter the tunnel again at some point, and this will eventually affect the flow quality in the entire wind tunnel. The noise generated by the fan and the non-direct air re-circulation are factors

⁴If the wind tunnel is not confined in the laboratory but open to the atmosphere, it is also affected by the weather and winds.

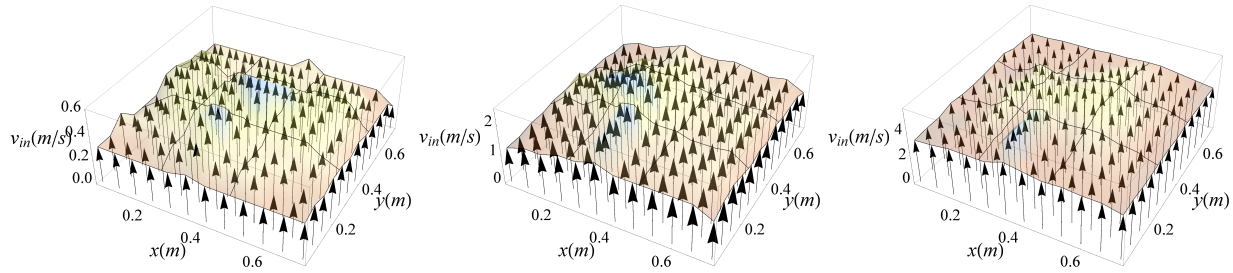


Fig. 7. Left to Right. Inlet velocity profile for 10, 20, and 53 Hz .

difficult to control in open wind tunnels. Nevertheless, there are techniques for closed wind tunnels to reduce this type of noise, such as applying melamine foam on walls sections of the tunnel and the installation of acoustic baffle between walls of the tunnel [60].

6. Numerical simulations

We have to compute $K_{\alpha\beta}$ in order to solve the linear set of equations Eq. (6). By using the definition of the global functions, then

$$K_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^2 \oint_S \partial_{x_i} \Phi_{\alpha}(\mathbf{r}) \partial_{x_i} \Phi_{\beta}(\mathbf{r}) dS = \bigcup_{e \in D(\alpha)} \bigcup_{\tilde{e} \in D(\beta)} \Delta_{\alpha m}^{(e)} \Delta_{\alpha n}^{(\tilde{e})} K_{mn}^{(e, \tilde{e})} \quad (7)$$

where $\mathcal{D}(\alpha)$ is the set of elements associated to the global node α , and $K_{mn}^{(e, \tilde{e})}$. Then, the local version of $K_{\alpha\beta}$ is

$$K_{mn}^{(e, \tilde{e})} = \sum_{i=1}^2 \oint_S \partial_{x_i} \Phi_m^{(e)}(\mathbf{r}) \partial_{x_i} \Phi_n^{(\tilde{e})}(\mathbf{r}) dS.$$

In practice, the computation of $\mathcal{D}(\alpha) = \{e_1, e_2, \dots, e_{d_\alpha}\}$ can be done straightforwardly from the boolean matrix since $e \in \mathcal{D}(\alpha)$ if $\sum_{m=1}^3 \Delta_{\alpha m}^{(e)} \neq 0$ for any element (e) of the lattice. Since Eq. (7) has a lot of zero elements, then $\mathcal{D}(\alpha)$ plays an important role because we may avoid the computational cost related to keep unnecessary zeros by computing the intersection between sets \mathcal{D} of different global nodes. Therefore, $K_{\alpha\beta} = \bigcup_{e \in D(\alpha) \cap D(\beta)} \Delta_{\alpha m}^{(e)} \Delta_{\alpha n}^{(\tilde{e})} K_{mn}^{(e)}$. We used the function **Intersection** of Wolfram Mathematica 9.0 [61] to compute $D(\alpha) \cap D(\beta)$. The local $K_{mn}^{(e, \tilde{e})} = K_{mn}^{(e)}$ for linear interpolation functions is $K_{mn}^{(e)} = A^{(e)}(b_m^{(e)} b_n^{(e)} + c_m^{(e)} c_n^{(e)})$, and it can be evaluated straightforwardly from the parameters obtained in the Delaunay triangulation. Once the diffusion matrix is computed, the vector F_α with the boundary conditions of the stream function is evaluated, and the system of equations given by Eq. (6) is solved. To this aim, it is standard to implement a Gradient Conjugated Method [62], however we simply decided to use the function **NSolve** of Mathematica. The numerical results of the stream function are shown in Fig. 8.

The velocity field under the irrotational approximation is shown in Fig. 9 (left). This field is obtained from the stream function $\psi(x, y)$ with the identity $\mathbf{v} = (\partial_y \psi, -\partial_x \psi)$. To this aim, the values of the stream function on the elements nodes (see Fig. 5) are linearly interpolated to obtain a symbolic formula in Mathematica, and later that expression is derived.

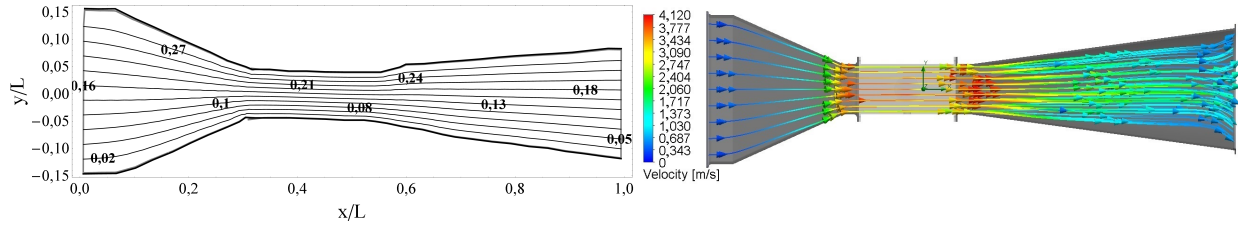


Fig. 8. Stream lines considering irrotational flow and two-dimensional approximation (left). Stream lines of the 3D system for 10 Hz without the irrotationality condition.

The magnitude of the velocity along the x -axis under the irrotational approximation is shown in Fig. 9-right. The velocity value increases as the air flows along the contraction section. Later, it reaches its maximum velocity in the working section. In this section, the velocity profile has a plateau since the cross-section area is constant. Subsequently, the velocity decreases in the diffuser. This velocity profile is mainly a consequence of the restriction imposed by the incompressibility approximation given by the continuity equation $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$. This leads to the condition $A(x)\langle v_x \rangle = constant$ with $A(x)$ the cross-section area of the wind tunnel and $\langle v_x \rangle$ the average x -velocity. Note that, in the bidimensional approximation of the wind tunnel, the cross-section only changes in one dimension, this is $A(x) = l_y(x)l_x$ with l_x a constant and $l_y(x)$ the vertical separation between the bottom and top boundaries of the tunnel at a distance x . Hence, the continuity in the bidimensional approximation reads $\langle v_x \rangle l_y(x) = constant'$. Using this equation, the velocity in the working section can be obtained from the inlet velocity v_{inlet} as follows:

$$v_x(x, 0) = \frac{l_y(x)}{l_y(0)} v_{inlet}$$

since the velocity in the working section under this approximation is practically uniform $\langle v_x \rangle = v_x(x, 0)$. For the existing tunnel $l_y(0) = (0, 1562 - (-0, 1464))L = 0, 3027L$ and $l_y(0, 5) = (0, 03988 - (-0, 0482))L = 0, 0881L$ (Fig. 9, left), then the velocity ratio in the working section is $\frac{v_x(x=0,5,0)}{v_{inlet}} = \frac{l_y(x=0,5)}{l_y(0)} = 3, 4347$ as it is shown in Fig. 9 (right).

The data in Table IV was used to establish the boundary conditions of the numerical problem. The Stream function at the inlet \mathcal{B}_3 is computed by integration of the inlet velocity components. Since the flow is under the incompressible approximation, then we used the continuity to establish the boundary conditions of the stream function at the outlet \mathcal{B}_4 . The values of the stream function at \mathcal{B}_1 and \mathcal{B}_2 are kept constant, defining one of these constant as zero in the lower boundary \mathcal{B}_2 .

In our case, we used the default Solidworks solver for low Mach Numbers based on the Finite Volume Method, also known as Simpler Method. At the entrance of the wind tunnel, the pressure

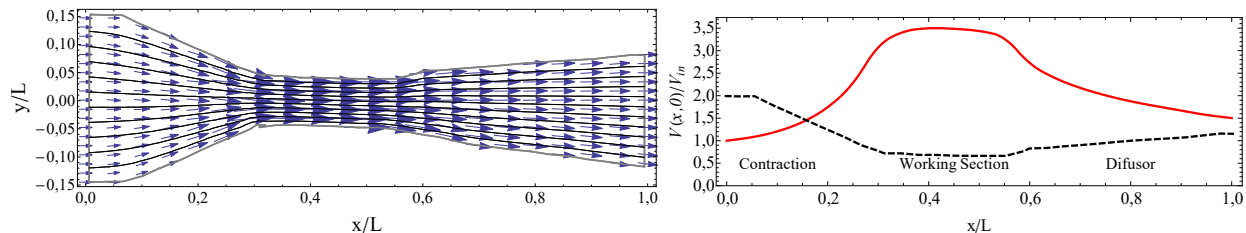


Fig. 9. Simulation under the irrotational assumption. Vector field (left) and velocity along the tunnel axis (right). The dashed line is the upper boundary of the wind tunnel.

Table IV. Average inlet flow

frequency f (Hz)	mean velocity $\langle v_x \rangle_N$ (m/s)	Reynolds Number Re	Flux $\dot{V}_{int}(m^3/s)$	Mass flux $\rho\dot{V}_{int}(kg/s)$
10	0,4097	$2,0763 \times 10^4$	0,2305	0,2823
27	1,7479	$8,8577 \times 10^4$	0,9832	1,2044
53	4,1153	$2,0854 \times 10^5$	2,3148	2,8357

(in this case the atmospheric pressure) was specified. At the exit, the mass flow is used as boundary condition. The non-slip condition (zero speed) on the inner walls of the wind tunnel was specified. Regarding the measurements that were made experimentally from the velocity field at the entrance of the wind tunnel, then we know the mass flow in the input \dot{V}_{int} corresponding to the multiplication of the average speed by the entrance area S_{in} , which is equivalent to compute the flux integral. The inlet flux can be computed by using the continuity equation $\oint_S \vec{v} \cdot d\vec{S} = - \int_{S_{in}} v_x dS_x + \int_{S_{out}} v_x dS_x = 0$ with S_{out} the cross-section area at another section in the tunnel e.g. the test section. The inlet flux is

$$\dot{V}_{int} = - \int_{S_{in}} v_x dS_x = - \int_0^{L_y} \int_0^{L_z} v_x(x, y, z) dy dz = -L_y L_z \langle v_x \rangle_{N \rightarrow \infty}$$

with $\langle v_x \rangle_N = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_x(0, y_i, z_j)$ the average inlet velocity. For our measurements, we have an approximated value of \dot{V}_{int} since the size of anemometer only enables us to measure $N = 12$ values. At the outlet, it is difficult to measure the velocity distribution because of the fan located at the exit of the wind tunnel. However, we may still use the continuity to compute \dot{V}_{out} by multiplication of \dot{V}_{int} with the ration between the outlet A_{out} and inlet A_{in} areas. Hence, the $\rho A_{out} \dot{V}_{int} / A_{in}$ was used as boundary condition at the outlet for in our simulations.

The value of the velocity along the x -axis (middle points in the wind tunnel) is shown in Fig. 10. The solid red line in that figure corresponds to the evaluation of velocity according to the simulation, and the purple points are measurements of the velocity at points on the middle axis of the working section. The length of the error bars is estimated with $\Delta v = u e_v$, where e_v is the percentage error of velocity in the inlet (see Table. III) and u is value registered by the anemometer at a point in the x -axis. In the working section, one can observe that the numerical and experimental data are in agreement. We do not provide measurements of the flow in the contraction and diffuser because it is difficult to place sensor in that section of the wind tunnel.

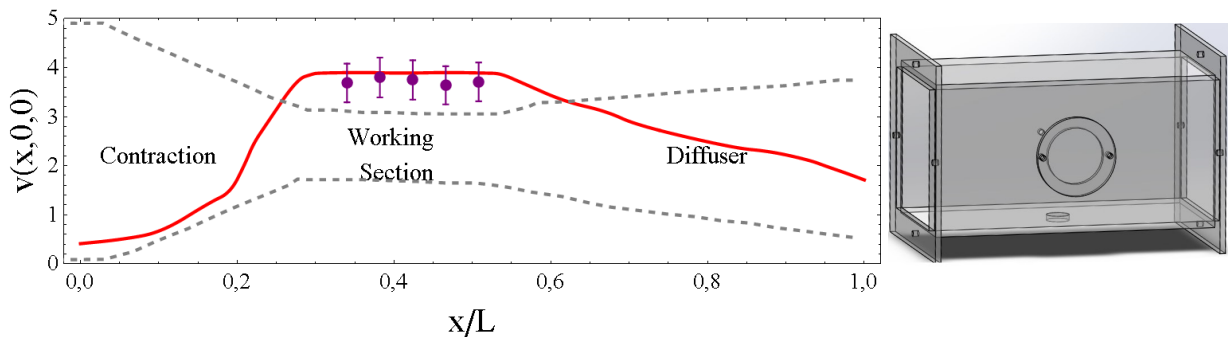


Fig. 10. Velocity along the tunnel axis for 10Hz. Red solid line and points corresponds to numerical simulation and measurements, respectively, in the working section (left). The gray dashed lines are represents the boundaries of the wind tunnel. The working section (right).

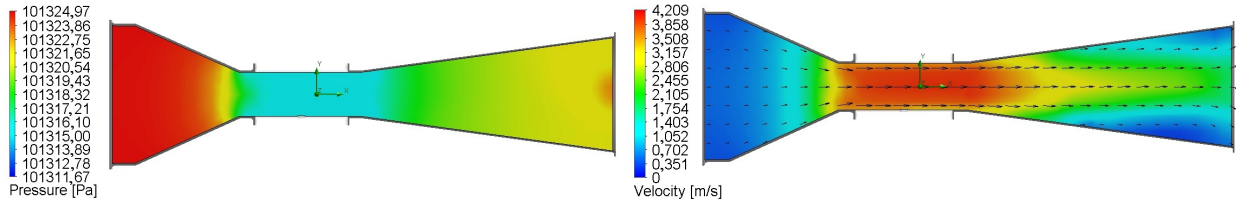


Fig. 11. Pressure distribution (left) and velocity field (right) for 10Hz.

The result of these simulations for 10 Hz are shown in Figs. 8 (right) and 12. Even when the simulations are conducted with a compressible fluid, we observe that the density variation in the tunnel is negligible, so, for this frequency, the fluid *incompressible*, $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$. Similarly, the vorticity remains small in the tunnel, and velocity field is typical of a laminar flow with no vortices. This suggests that fluid flow in the tunnel for 10 Hz is practically irrotational and incompressible. Therefore, the simulations of the stream function shown in Fig. 8 are still valid for low velocity operation of the tunnel, even though they were done assuming a channel in two-dimensions.

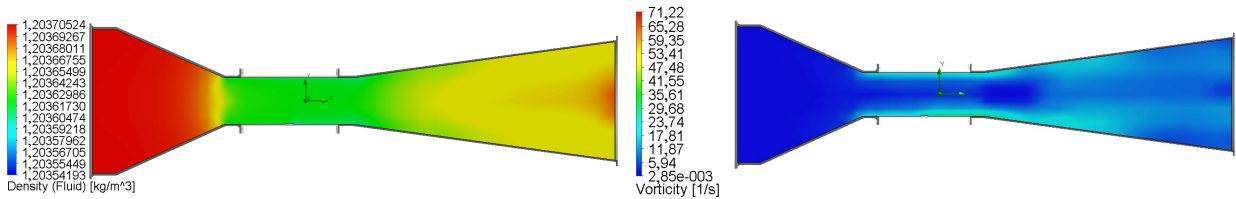


Fig. 12. Density distribution (left) and vorticity (right) for 10 Hz.

A comparison between the stream lines of Fig. 11 with the ones in Fig. 8 show that they are in agreement, except in the diffuser near the fan where the mass flux condition changes the stream lines.

We have also performed simulations on the geometry proposed in Fig. 3 with a better contraction curve and according to wind tunnel design criteria (see Figs.13 and 14). We can observe from the values of density, vorticity, and the velocity field that flow in the contraction and test sections can be approximated as irrotational and incompressible laminar flow. We would like to stress the fact that the solution of the Laplace equation for the stream function is laminar by default, because the incompressible and irrotational flow is a problem governed by a linear partial differential equation. On the other hand, the simulations performed with the fluid flow simulation package of Solidworks include the advective terms of the Navier-Stokes equations. Such terms are in part responsible of the difference between the the stream lines near the outlet of tunnel with and without the irrotational approximation (see Figs.8 and 11).

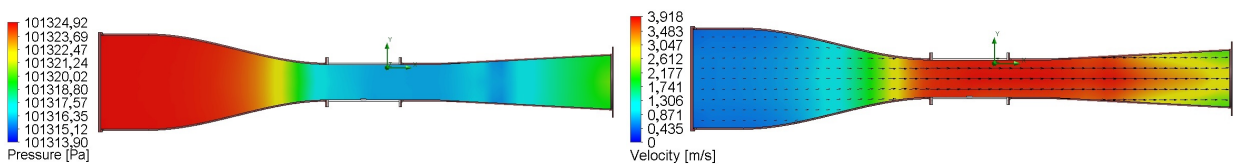


Fig. 13. Pressure (left) and velocity field (right) for 10Hz.

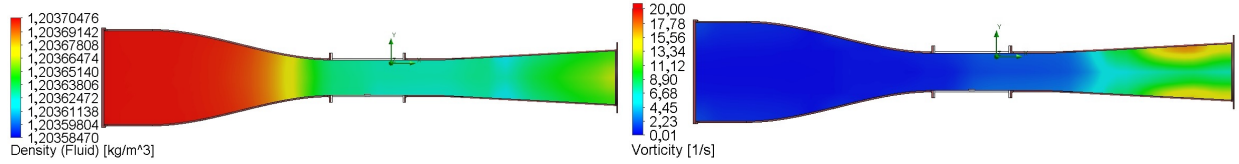


Fig. 14. Density (left) and vorticity (right) for 10 Hz.

The results we found for 27 and 53Hz are similar to the ones presented for 10 Hz but with velocity values in larger range (see Fig. 15). However, we do not rule out the meshes used in these simulations, along with the Simpler Method, could not sufficiently fine to capture the contributions of the non-linear terms of the equations correctly. Previous experimental studies [63] they used Reynolds numbers of the order of $1,014 \times 10^5$, $1,352 \times 10^5$, $1,690 \times 10^5$ in order to find the thickness value of the layer limit for a NACA23012 profile, where it was assumed that flow behaved laminarly because its Reynolds number does not exceed the value of $Re = 5 \times 10^5$. In this work, the Reynolds number is in the range of $2 \times 10^4 < Re < 2,2 \times 10^5$, corresponding to the frequency range of the fan. A comparison of the Reynolds numbers calculated in this document with those provided in [63] suggests that the flow that would be observed in the wind tunnel studied here is in the laminar regime.

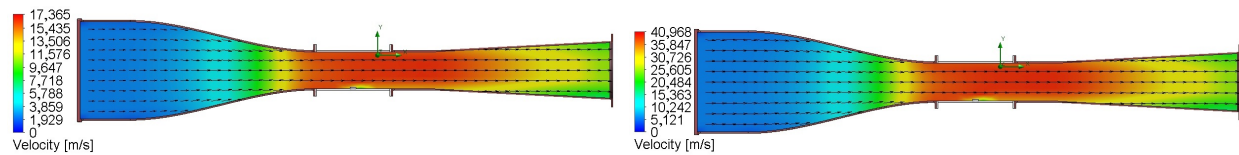


Fig. 15. Velocity field. 27 Hz (left) and 53 Hz (right).

The distribution of vorticity in the working section is shown shown in Fig. 16. One of the advantages of modifying the contraction section and the diffuser corresponds to an improvement in the quality of the flow in the working section. If a comparison of the vorticity of the existing tunnel (see Fig. 1) and its modified version (see Fig. 3) is made, then a less intense vorticity distribution can be observed in the test section of the modified wind tunnel.

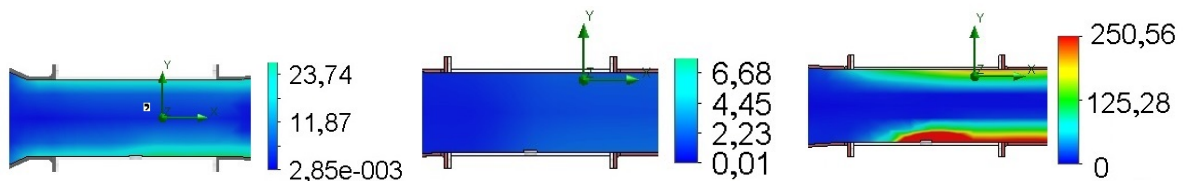


Fig. 16. Vorticity in the working section. The values of vorticity are presented in s^{-1} . Vorticity in the working section of the existing tunnel (left) and the modified tunnel (center) for 10 Hz. Vorticity at 53 Hz (right).

Another factor that can affect the production of vorticity inside the test chamber concerns its design because it has a lid on its bottom (Fig. 10, right). This is used to cover a hole where a metal lab bracket can be installed to eventually hold a test object. For low velocities, the impact of the lid is small, and it can be removed with a better design on the contraction section, but the lid can favor production of vorticity as the velocity increases. This occurs at 53 Hz in Fig. 16 (right).

Conclusion

In this study, numerical simulations and experimental measurements were carried out in order to characterize the flow inside a low-speed wind tunnel. One of the implemented strategies modeled the tunnel as a two-dimensional system, with a incompressible and irrotational fluid flow. Under these assumptions, the flow is potential, and it can be described by the stream function. In the second approach, we removed the irrotationality and incompressibility conditions, and simulations were performed in three-dimensions. We found that the stream lines into the wind tunnel were quite similar, regardless of the approach for low flux velocity in the laminar regime, as it was shown in Fig. 9. This is useful since the fluid flow with irrotational and incompressibility conditions numerically is easier to simulate numerically and computationally less expensive than simulations of fluid flow without these assumptions.

Simulations without incompressibility conditions showed that density variations into the tunnel were small. This was observed in the density distribution of the real and modified wind tunnel shown in Figs. 12 and 14. In those figures, there is no density change up to the 4th significant digit, which represents a percentage change smaller than 0,05%. Therefore, the velocity field into the studied low-speed wind tunnel is practically divergenceless, even though air is a compressible fluid.

Asymmetries on the wind tunnel walls, fan noise, re-circulation, and the type of tunnel design can affect the quality of the flow. Spatial variations measured in the inlet of the wind tunnel can be a combination of all these factors. These problems, attributed mainly to the design of the device, also affected the measurements in the working section, even when they seemed to be in agreement with numerical simulations of the velocity on the x -axis. In this study, we proposed changes on the contraction and diffuser with the aim of enhancing the flow quality. Changes in the contraction with third-order polynomial curves resulted in an important reduction of vorticity in the working section of the modified tunnel with respect to the original device as it was shown in Fig. 16. This reduction in the intensity of vorticity is not due to a decrease in the magnitude of velocity, since both contraction sections (modified and original) connect the same inlet and outlet areas (Fig. 12 and 14) as well as the fact that air behaves as incompressible in the tunnel.

As a future work, it would be interesting to model the inner fluid flow of the wind tunnel by using numeric-analytic techniques such as collocation methods [64] used for micro channels or mesh-less methods as the one described in [65].

Acknowledgment

This work was supported by the Research Vice-Principalship of Universidad ECCI.

References

- [1] M. Freydin, E. H. Dowell, S. M. Spottswood, and R. A. Perez, "Nonlinear dynamics and flutter of plate and cavity in response to supersonic wind tunnel start," *Nonlinear Dynamics*, vol. 103, no. 4, pp. 3019–3036, 2021.

2

- [2] N. Tabatabaei, R. Örlü, R. Vinuesa, and P. Schlatter, “Aerodynamic free-flight conditions in wind tunnel modelling through reduced-order wall inserts,” *Fluids*, vol. 6, no. 8, p. 265, 2021. <https://doi.org/10.3390/fluids6080265>. 2
- [3] D. Khan, J. H. Bjernemose, I. Lund, and J. E. Bebe, “Design and construction of an open loop subsonic high temperature wind tunnel for investigation of scr dosing systems,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 11, p. 100106, 2021. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100106>. 2
- [4] M. Hand *et al.*, “Unsteady aerodynamics experiment phase vi: wind tunnel test configurations and available data campaigns,” 2001. 2
- [5] U. Saha, S. Thotla, and D. Maity, “Optimum design configuration of savonius rotor through wind tunnel experiments,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 8-9, pp. 1359–1375, 2008. 2
- [6] B. M. Simmons and P. C. Murphy, “Wind tunnel-based aerodynamic model identification for a tilt-wing, distributed electric propulsion aircraft,” in *AIAA SciTech 2021 Forum*, p. 1298, 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1298>. 2
- [7] R. C. Busan, P. C. Murphy, D. B. Hatke, and B. M. Simmons, “Wind tunnel testing techniques for a tandem tilt-wing, distributed electric propulsion vtol aircraft,” in *AIAA SciTech 2021 Forum*, p. 1189, 2021. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1189>. 2
- [8] Y.-D. Huang, N. Xu, S.-Q. Ren, L.-B. Qian, and P.-Y. Cui, “Numerical investigation of the thermal effect on flow and dispersion of rooftop stack emissions with wind tunnel experimental validations,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 9, pp. 11618–11636, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11304-y>. 2
- [9] C. A. Banach *et al.*, “Dynamic infrared gas analysis from longleaf pine fuel beds burned in a wind tunnel: observation of phenol in pyrolysis and combustion phases,” *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 14, no. 3, pp. 2359–2376, 2021. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2359-2021>. 2
- [10] C. Ocker, E. Blumendeller, P. Berlinger, W. Pannert, and A. Clifton, “Localization of wind turbine noise using a microphone array in wind tunnel measurements,” *Wind Energy*, vol. 25, no. 1, pp. 149–167, 2021. <https://doi.org/10.1002/we.2665>. 2
- [11] E. Gnapowski, J. Pytko, J. Józwik, J. Laskowski, and J. Michałowska, “Wind tunnel testing of plasma actuator with two mesh electrodes to boundary layer control at high angle of attack,” *Sensors*, vol. 21, no. 2, p. 363, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21020363>. 2
- [12] Š. Nosek *et al.*, “Review of wind tunnel modelling of flow and pollutant dispersion within and from naturally ventilated livestock buildings,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 9, p. 3783, 2021. <https://doi.org/10.3390/act10060107>. 2
- [13] M. J. E. Yazdi and A. B. Khoshnevis, “Experimental study of the flow across an elliptic cylinder at subcritical reynolds number,” *The European Physical Journal Plus*, vol. 133, no. 12, p. 533, 2018. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-12342-1>. 2
- [14] S. Bryson and C. Levit, “The virtual wind tunnel,” *IEEE Computer graphics and Applications*, no. 4, pp. 25–34, 1992. 2
- [15] S. K. Reinhardt, M. D. Hill, J. R. Larus, A. R. Lebeck, J. C. Lewis, and D. A. Wood, “The wisconsin wind tunnel: virtual prototyping of parallel computers,” in *Proceedings of the 1993 ACM SIGMETRICS conference on Measurement and modeling of computer systems*, pp. 48–60, 1993. 2
- [16] J. Counihan, “An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel,” *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 3, no. 2, pp. 197–214, 1969. 2
- [17] M. Tang, M. Böswald, Y. Govers, and M. Pusch, “Identification and assessment of a nonlinear dynamic actuator model for gust load alleviation in a wind tunnel experiment,” *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 12, pp. 413–126, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00504-y>. 2
- [18] B. H. Goethert, “Transonic wind tunnel testing,” tech. rep., Advisory Group for Aeronautical Research and Development Paris (France), 1961. 2
- [19] J. Kendall, “Wind tunnel experiments relating to supersonic and hypersonic boundary-layer transition,” *Aiaa Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 290–299, 1975. 2
- [20] M. Costantini, T. Lee, T. Nonomura, K. Asai, and C. Klein, “Feasibility of skin-friction field measurements in a transonic wind tunnel using a global luminescent oil film,” *Experiments in Fluids*, vol. 62, no. 1, pp. 1–34, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00348-020-03109-z>. 2
- [21] D. T. Reese, R. J. Thompson, R. A. Burns, and P. M. Danehy, “Application of femtosecond-laser tagging for

- unseeded velocimetry in a large-scale transonic cryogenic wind tunnel,” *Experiments in Fluids*, vol. 62, no. 5, pp. 1–19, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03191-x>. 2
- [22] L. P. Chamorro and F. Porté-Agel, “A wind-tunnel investigation of wind-turbine wakes: boundary-layer turbulence effects,” *Boundary-layer meteorology*, vol. 132, no. 1, pp. 129–149, 2009. 2
- [23] L. Mydlarski and Z. Warhaft, “On the onset of high-reynolds-number grid-generated wind tunnel turbulence,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 320, pp. 331–368, 1996. 2
- [24] K. Inokuma, T. Watanabe, K. Nagata, and Y. Sakai, “Statistical properties of spherical shock waves propagating through grid turbulence, turbulent cylinder wake, and laminar flow,” *Physica Scripta*, vol. 94, no. 4, p. 044004, 2019. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aafde2>. 2
- [25] A. Alexander and B. Holownia, “Wind tunnel tests on a savonius rotor,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 3, no. 4, pp. 343–351, 1978. 2
- [26] T. Chen and L. Liou, “Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind turbines,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35, no. 3, pp. 565–569, 2011. 2
- [27] M. S. Selig and B. D. McGranahan, “Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small wind turbines,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 126, no. 4, pp. 986–1001, 2004. 2
- [28] H.-J. Rothe, W. Biesel, and W. Nachtigall, “Pigeon flight in a wind tunnel,” *Journal of comparative Physiology B*, vol. 157, no. 1, pp. 99–109, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00702736>. 2
- [29] J. Liu, R. Kimura, M. Miyawaki, and T. Kinugasa, “Effects of plants with different shapes and coverage on the blown-sand flux and roughness length examined by wind tunnel experiments,” *Catena*, vol. 197, p. 104976, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104976>. 2
- [30] A. Lago, D. Trabucco, and A. Wood, “Chapter-7 testing, inspection, and maintenance,” in *Damping Technologies for Tall Buildings*, pp. 465–531, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815963-7.00007-5>. 2
- [31] E. Maskell, “A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel,” Aeronautical Research Council, London, UK, 1963. 2
- [32] L. Cattafesta, C. Bahr, and J. Mathew, “Fundamentals of wind-tunnel design,” *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, pp. 1–10, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae532>. 3, 5
- [33] M. A. G. Hernández, A. I. M. López, A. A. Jarzabek, J. M. P. Perales, Y. Wu, and S. Xiaoxiao, “Design methodology for a quick and low-cost wind tunnel,” in *Wind tunnel designs and their diverse engineering applications*, IntechOpen, 2013. [Online]. Available : <https://doi.org/10.5772/54169>. 3, 5
- [34] J. B. Barlow, W. H. Rae, and A. Pope, “Low-speed wind tunnel testing,” pp. 19–132, Wiley New York, 1999. 3, 4, 5
- [35] N. Nordin, A. Karim, Z. Ambri, S. Othman, and V. R. Raghavan, “Design and development of low subsonic wind tunnel for turning diffuser application,” vol. 614, pp. 586–591, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.614-615.586>. 3
- [36] M. Patel and M. Patel, “Design approach to mach number 0.5 low speed subsonic wind tunnel,” 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2139/ssrn.2015561>. 3
- [37] M. Arifuzzaman and M. Mohammad, “Design construction and performance test of a low cost subsonic wind tunnel,” *IOSR Journal of Engineering*, vol. 10, pp. 83–92, 2012. <https://doi.org/10.9790/3021-021058392>. 3
- [38] F. Acevedo Vélez, “Diseño de un túnel de viento para prueba de ventiladores y perfiles aerodinámicos,” B.S. thesis, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2006, Accessed on: Abbrev. May. 14, 2020. [Online] Available : https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4407/Felipe_AcevedoVelez_2006.pdf?sequence=2. 4
- [39] F. E. C. Molina, “Diseño y construcción de un túnel de viento,” B.S. thesis, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, La Libertad, El Salvador, 2012. 4
- [40] P. Fadilah and D. Erawan, “Effect of applying screen and honeycomb to the flow characteristic in wind tunnel based on cfd simulation,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1130, p. 012008, IOP Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1130/1/012008>. 5
- [41] E.-S. Zanoun, “Flow characteristics in low-speed wind tunnel contractions: Simulation and testing,” *Alexandria engineering journal*, vol. 47, no. 4, pp. 2265–2277, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.024>. 6
- [42] V. Vishwanathan *et al.*, “Aerodynamic design and validation of a contraction profile for flow field improvement and uncertainty quantification in a subsonic wind tunnel,” in *AIAA SciTech 2020 Forum*, p. 2211, 2020. <https://doi.org/10.2514/6.2020-2211>. 6

- [//doi.org/10.2514/6.2020-2211](https://doi.org/10.2514/6.2020-2211). 6, 7
- [43] J. John *et al.*, “Computational fluid dynamics simulation of the turbulence models in the tested section on wind tunnel,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, no. 4, pp. 1201–1209, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.02.012>. 6
- [44] C. J. Doolan, “Numerical evaluation of contemporary low-speed wind tunnel contraction designs,” *J. Fluids Eng.*, vol. 129, no. 9, pp. 1241–1244, 2007. <https://doi.org/10.1115/1.2771578>. 6, 7, 8
- [45] P. K. Kundu, I. M. Cohen, and D. R. Dowling, “Fluid mechanics,” ch. 4, pp. 96–98, San Diego, California, U.S., Academic press, 2015. 7
- [46] J. A. S. Del Río, J. G. A. Marín, S. V. García, D. M. Londoño, and D. A. H. Zuluaga, “Simulation analysis of a coanda-effect ejector using cfd,” *Tecciencia*, vol. 12, no. 22, p. 3, 2017. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.3>. 8
- [47] J. G. Ardila-Marín, D. A. Hincapié-Zuluaga, and J. A. Casas-Monroy, “Comparison and validation of turbulence models in the numerical study of heat exchangers,” *Tecciencia*, vol. 10, no. 19, pp. 49–60, 2015. <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2015.19.8>. 8
- [48] J. D. Betancur-Gómez, F. Hoyos-Gómez, D. Osorio-Patiño, J. G. Marín, and J. A. Sierra del Rio, “Comparison of stress concentration curves for different geometries of machine elements obtained via simulation and experimentation,” *Tecciencia*, vol. 12, no. 23, pp. 93–101, 2017. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.11>. 8
- [49] C. A. Sánchez-Ríos, J. Graciano-Uribe, S. Vélez-García, and D. A. Hincapié-Zuluaga, “Comparative analysis between a discrete spiral chamber and a continuous spiral chamber via ansys,” *Tecciencia*, vol. 12, no. 23, pp. 25–32, 2017. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.4>. 8
- [50] L. F. Villamarín-Guerrero, M. A. Mayorga-Betancourt, M. C. Amaris-Mendoza, M. Herrera-Martínez, and D. R. Sánchez-Tachack, “Evaluation of the microlocal wind power potential for the operation of a university wind turbine,” *Tecciencia*, vol. 12, no. 23, pp. 1–8, 2017. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.1>. 8
- [51] C. Bayona-Roa, R. Codina, and J. Baiges, “Variational multiscale error estimators for the adaptive mesh refinement of compressible flow simulations,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 337, pp. 501–526, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.03.010>. 8
- [52] R. P. Salazar, G. Téllez, D. F. Jaramillo, and D. L. González, “Caos en el billar de forma de diamante y corona redondeada,” *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 39, pp. 152–170, Jun. 2015. <https://doi.org/10.18257/raccefy.99>. 8
- [53] C. Bayona, J. Baiges, and R. Codina, “Variational multiscale approximation of the one-dimensional forced burgers equation: The role of orthogonal subgrid scales in turbulence modeling,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 86, no. 5, pp. 313–328, 2018. <https://doi.org/10.1002/flid.4420>. 8
- [54] R. Salazar, C. Bayona-Roa, and J. Solís-Chaves, “Electrostatic field of angular-dependent surface electrodes,” *The European Physical Journal Plus*, vol. 135, no. 1, p. 93, 2020. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-019-00090-3>. 8
- [55] J. A. S. Del Río, J. G. A. Marín, S. V. García, D. M. Londoño, and D. A. H. Zuluaga, “Simulation analysis of a coanda-effect ejector using cfd,” *Tecciencia*, vol. 12, no. 22, p. 3, 2017. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.3>. 8
- [56] J. Parra and R. Ríos-Linares, “Estudio del comportamiento bajo carga de un chasis para transporte de pasajeros por medio de la tecnología de elementos finitos en la empresa equitel cumandes sa,” *AVANCES : Investigación en Ingeniería*, no. 6, pp. 103–109, 2006. 8
- [57] J. A. Guerrero, D. C. Martínez, and L. M. Méndez, “Análisis biomecánico comparativo entre coronas individuales y restauraciones ferulizadas implanto soportadas mediante el uso del método de los elementos finitos,” *AVANCES: Investigación en Ingeniería*, vol. 8, no. 2, pp. 7–17, 2011. 8
- [58] J. M. P. Ballesteros, O. A. G. Estrada, and H. G. S. Acevedo, “Detección de daños en una armadura unidimensional por medio del algoritmo de optimización de la luciérnaga y elementos finitos,” *Avances: Investigación en Ingeniería*, vol. 13, no. 1, p. 4, 2016. 8
- [59] T. Chung, “Computational fluid dynamics,” Cambridge UK, Cambridge university press, 2010. 9
- [60] L. D. Santana, M. Carmo, F. M. Catalano, and M. A. Medeiros, “The update of an aerodynamic wind-tunnel for aeroacoustics testing,” *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol. 6, pp. 111–118, 2014. 14
- [61] Wolfram research Inc., Mathematica, “Version 9.0,” *Champaign, Illinois*, 2012. 14

- [62] J. R. Shewchuk *et al.*, “An introduction to the conjugate gradient method without the agonizing pain,” 1994. 14
- [63] L. Hernandez, Y. Aldana, and W. Bocanegra, *Estudio y Análisis de Técnicas que Evitan el Desprendimiento de la Capa Límite en un Perfil Aerodinámico a Bajas Velocidades*. Bachelor’s thesis, Universidad de San Buenaventura Buenaventura, Bogotá, Colombia, 2005. Accessed on: May. 25, 2020. [Online]. Available: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/38145.pdf>. 18
- [64] D.A Castro, W.F Flórez, N. Caruso, M. Portapila, “Approximate particular solutions method for the solution of electro-kinetic fluids in micro and nano channels,” *Tecciencia*, vol. 14, no. 27, pp. 85–11, 2019. <https://doi.org/10.18180/2019.27.9>. 19
- [65] N. F. et al., “Evaluation of localization strategies with method of approximate particular solutions without mesh,” *Tecciencia*, vol. 14, no. 27, pp. 89–97, 2019. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2019.27.10>. 19

Andrés Lara Lara

Mechanical Engineer - ECCI University (Colombia-2019). My areas of interest are thermochemical processes, fluid dynamics, and renewable sources.
email: andreslara940@gmail.com

Jonathann Toledo

Mechanical Engineering - Universidad ECCI (Colombia-2019). My research interests are in the areas of fluid mechanics, oil well production, and thermochemical processes.
email: alexisjtm25@hotmail.com

Robert Paul Salazar

PhD in Physics - Université Paris Sud XI / Paris Saclay - Uniandes (France - 2017). Master in Physics - Universidad de los Andes (Colombia - 2012), and Bachelor’s in Physics-Universidad Distrital FJC (Colombia-2009). My research is focused on the study of statistical mechanics and phase transitions of Coulomb Systems by using numerical and analytical techniques. Recently, I have worked on the analytical study of surface electrodes and vortical fluid flow.
email: rsalazarr@ecc.edu.co, rp.salazar84@uniandes.edu.co

Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad

Performance Study of Different Blade Profiles of a Wind Turbine to Harness of Low-Speed Winds

Luis A. Gallo ^{*}, **Edwin L. Chica** ¹, **Elkin Flórez** ²

¹Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), ²Universidad de Pamplona (Pamplona, Colombia)

*Correspondence e-mail: luis.gallo@udea.edu.co

Received: 10/06/2021. Modified: 08/09/2021. Accepted: 17/09/2021

Abstract

Context: Vertical-axis wind turbines, and Savonius-type turbines in particular, outstrip other types of turbines in applications that include erratic and low-speed winds. Although their efficiency is among the lowest, this can be compensated by their low cost, turning them into a sustainable alternative which is also appealing for this type of applications. This research seeks to select the highest-performance geometry for the blade of a Savonius-type wind turbine.

Method: To this effect, various geometric configurations used in this type of turbines, which were consulted in the literature, are numerically analyzed. All the profile models are studied under the same computational fluid dynamics parameters and models through the ANSYS Fluent software.

Results: Through computational simulations, the optimal performance conditions of each of the geometries are estimated. These conditions allow comparing the performance of the profiles under the same terms, as well as identifying the ones with the highest performance. It is determined that the conventional semicircular profile and the one known as the modified Bach have power coefficients of 0,287 and 0,395, respectively, which represents a performance increase of 37,8 %.

Conclusions: These superior results motivate a detailed analysis of the modified Bach profile which allows finding the optimal geometric proportions for its aerodynamic performance.

Keywords: blade, CFD, low speed, Savonius turbine, wind power

Language: Spanish.

Open access



Cite as: Gallo, L. A., Chica, E. L., Flórez, E.: "Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad". *Ing.*, vol. 27, no. 1, 2022. e18127.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18127>

Resumen

Contexto: Las turbinas eólicas de eje vertical, y en particular las turbinas de arrastre tipo Savonius, aventajan a los otros tipos de turbinas en aplicaciones que comprenden vientos erráticos y de baja velocidad. Si bien su eficiencia está entre las más bajas, esto puede verse compensado con sus bajos costos, lo que las convierte en una alternativa sostenible y atractiva para este tipo de aplicaciones. En esta investigación se busca seleccionar la geometría de mayor rendimiento para el álabe de una turbina eólica tipo Savonius.

Método: Para ello, se analizan numéricamente diversas configuraciones geométricas empleadas en este tipo de turbinas, las cuales fueron consultadas en la literatura. Todos los modelos de perfil son estudiados bajo los mismos parámetros y modelos de dinámica de fluidos computacional a través del software ANSYS Fluent.

Resultados: A través de las simulaciones computacionales se estiman las condiciones de óptimo rendimiento de cada una de las geometrías. Dichas condiciones permiten comparar, bajo los mismos términos, el desempeño de los perfiles e identificar los de mayor rendimiento. Se determina que el perfil semicircular convencional y el conocido como Bach modificado presentan coeficientes de potencia de 0,287 y 0,395 respectivamente, lo que representa un aumento en su rendimiento del 37,8 %.

Conclusiones: Este resultado superior motiva a un análisis detallado del perfil Bach modificado que permita encontrar las proporciones geométricas óptimas para su desempeño aerodinámico.

Palabras clave: álabe, baja velocidad, CFD, energía eólica, turbina Savonius

Idioma: Español.

1. Introducción

Los vientos erráticos y de baja velocidad suelen presentarse con mayor frecuencia, por lo que a pesar de su menor densidad energética, el desarrollo de dispositivos que aprovechen efectivamente su potencial toma cada vez más valor debido al continuo aumento en la demanda energética y la ausencia de otros recursos energéticos en muchos sitios [1], [2].

Gracias a su funcionamiento omnidireccional, las turbinas eólicas de eje vertical son capaces de aprovechar vientos que varían frecuentemente su dirección sin requerir sistemas adicionales de alineación. Generalmente pueden representar menores costos en construcción, operación y mantenimiento, y de esta manera logran conseguir una mayor relación entre beneficio y costo [1]–[4]. Asimismo, en los últimos años se ha evidenciado que las turbinas eólicas de eje vertical pueden operar a menor distancia entre rotores que las turbinas eólicas de eje horizontal, lo que permite disponer un mayor número de turbinas en una misma área de emplazamiento [1], [5].

Aunque ofrecen múltiples prestaciones, las turbinas eólicas de eje vertical también presentan considerables limitaciones. La más conocida de ellas es la alta variabilidad en el torque según la posición angular del rotor, debido al continuo cambio de alineación entre el álabe y la dirección del flujo durante el movimiento de la turbina [2], [6].

De acuerdo al principio de operación de la turbina, también se presentan algunas particularidades. La turbina de sustentación o tipo Darrieus llama la atención por su eficiencia superior entre

las turbinas de eje vertical, logrando actualmente valores cercanos al 75 % de los obtenidos a partir de las turbinas de eje horizontal. Sin embargo, requiere mayor velocidad de flujo para iniciar su movimiento, lo que limita su uso a emplazamientos con vientos de mayor categoría y en muchos casos exige dispositivos de arranque [4], [6]–[8].

Por otro lado, la turbina de arrastre o tipo Savonius presenta bondades en el arranque a velocidades bajas de flujo pero su eficiencia apenas alcanza valores cercanos al 50 % del rendimiento de las turbinas de eje horizontal [9]–[12]. Pese a ello, los beneficios de la omnidireccionalidad y la capacidad de autoarranque combinados en un mismo dispositivo pueden hacer viable el aprovechamiento de vientos erráticos y aquellos cuyo contenido energético no es tan elevado.

En esta investigación se pretende estudiar numéricamente la geometría del álabe de una turbina eólica de tipo arrastre que permita aprovechar vientos de baja velocidad, vinculando en la mejor medida la eficiencia energética con las prestaciones que caracterizan esta turbina. Para ello, se propone evaluar mediante la simulación de un viento de baja categoría el desempeño de diversos modelos de turbinas de este tipo consultados en la literatura, permitiendo así reconocer las geometrías que presentan el mayor rendimiento bajo tales condiciones y seleccionar finalmente la más adecuada. Estudios similares han sido llevados a cabo, uno de los más representativos es la investigación realizada por Alom y Saha [13], en la que evalúan la influencia del perfil de los álabes en el rendimiento del rotor Savonius. Sin embargo, los rotores son probados a una velocidad de viento de $6,2 \text{ m/s}$, la cual corresponde a un viento de mayor categoría. Adicionalmente, aunque los autores manifiestan que las geometrías analizadas son de gran rendimiento, no se consideran todas las configuraciones que son de interés en el presente trabajo.

2. Materiales y métodos

2.1. Detalles geométricos de los perfiles de álabe

En la Figura 1 se muestran las geometrías de diferentes perfiles de álabe que serán objeto de estudio en la presente investigación. Estos modelos son seleccionados ya que reportan altos rendimientos en sus respectivos estudios realizados por otros autores. Se toman algunas parejas que corresponden a la versión básica y la versión mejorada de diversos modelos, con el fin de evidenciar la mejora en su rendimiento luego de su modificación.

Se consideran el perfil semicircular convencional y el perfil semicircular dividido con una relación de traslape de $1/6$ [14]–[16]. También es considerado el perfil tipo Bach básico y un perfil desarrollado a partir de este, denominado perfil de Bach modificado [13], [17]–[19]. El perfil elíptico y su versión modificada también son analizados [20], [21]. Por último, son considerados los perfiles patentados por Benesh [22], [23] y Rahai [24], [25]. Todas las geometrías están acotadas por un diámetro constante de 200 mm (D) y construidas considerando un espesor de pared de 1 mm .

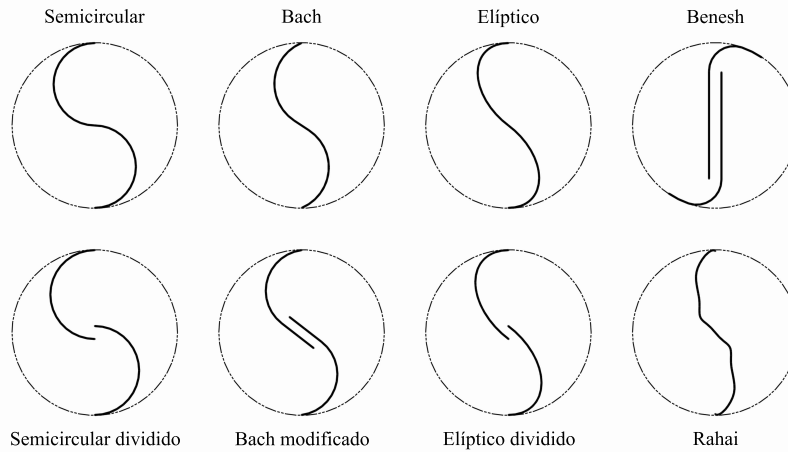


Figura 1. Configuración de los diferentes perfiles de prueba

2.2. Especificación del análisis numérico

Los estudios tridimensionales pueden presentar mejores resultados que los estudios bidimensionales al considerar el flujo por encima y por debajo de la turbina. Sin embargo, los estudios bidimensionales pueden capturar las propiedades de flujo con gran precisión si la relación de aspecto de la turbina (altura/diámetro) es mayor o igual a la unidad [26].

En este estudio se analizan las geometrías bajo modelos bidimensionales y en régimen transitorio. Se propone el modelo de turbulencia $k - \omega SST$ por su buen desempeño en la predicción de flujos libres y de gradientes de presión adversos [27]–[30]. Todas las geometrías son analizadas bajo iguales algoritmos, parámetros y modelos de la dinámica de fluidos computacional (CFD por su sigla en inglés) a través del solucionador de volúmenes finitos ANSYS Fluent 19.2.

Similar al estudio realizado por Alom y Saha del mismo tipo de turbina [20], el dominio del análisis consiste en dos partes divididas por una interfaz deslizante: una región circular rotativa y una región rectangular estacionaria (Figura 2). La región circular contiene el perfil estudiado y gira de manera constante a la velocidad establecida para cada simulación.

Se fija una entrada de aire a una velocidad de 4 m/s (viento de clase 1) [31], correspondiente a un régimen de flujo con un número Reynolds de 6×10^4 . De igual manera, se establece una salida a condiciones atmosféricas y el campo lateral se simula bajo condiciones de simetría, ya que allí se presentan gradientes de baja escala [30], [32] (Figura 2).

El desempeño de cada modelo es evaluado en términos de los coeficientes de torque y de potencia en función de la relación de velocidad en la punta del álabe (TSR por su sigla en inglés). El coeficiente de torque (C_T) se estima como la relación entre el torque generado por la turbina en su eje (T) y el torque que es posible generar en las condiciones dadas (ecuación (1)) [33].

$$C_T = \frac{T_{turbina}}{T_{disponible}} = \frac{T}{\frac{1}{4} \rho A v^2 D} \quad (1)$$

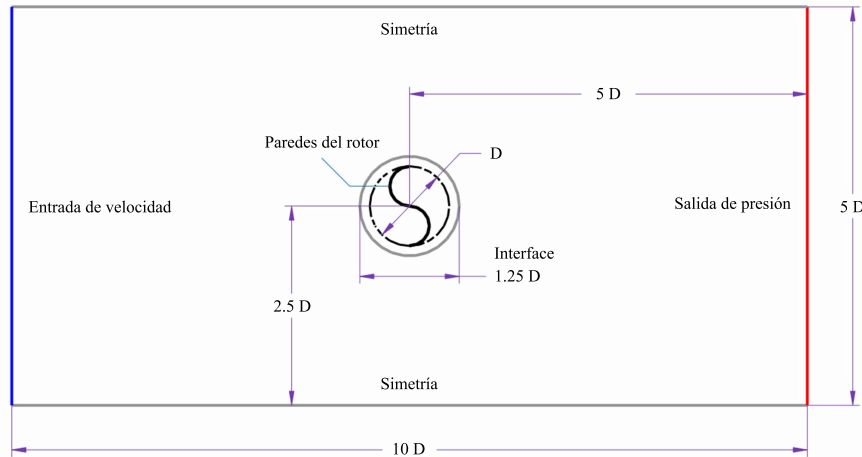


Figura 2. Dominio de análisis y condiciones de frontera

Donde ρ es la densidad del aire, v es la velocidad del viento en flujo libre y $A = DH$ es el área transversal de la turbina, siendo H la altura de la misma (unitaria en análisis bidimensionales). De manera similar, el coeficiente de potencia (C_P) es la relación entre la potencia generada por la turbina y el flujo energético transportado por el fluido (ecuación (2)); donde ω es la velocidad angular de la turbina [33].

$$C_P = \frac{P_{turbina}}{P_{disponible}} = \frac{T \omega}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = \frac{T}{\frac{1}{4} \rho A v^2 D} \frac{\omega D}{2v} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que la TSR se expresa como se muestra en la ecuación (3), la ecuación (2) puede reescribirse como la ecuación (4) [33].

$$TSR = \frac{\omega D}{2v} \quad (3)$$

$$C_P = C_T \cdot TSR \quad (4)$$

El extraer la energía cinética del viento en su totalidad implica el estancamiento del aire y por lo tanto la inexistencia de un flujo del cual tomar energía. Esto lleva a la idea de un límite máximo en la energía que puede ser captada. Este valor es conocido como el límite de Betz y es el principal referente para la medición del rendimiento de un dispositivo aerogenerador, ya que representa una base cuantificable de la energía disponible [31]. Dicho límite se encuentra descrito en la ecuación (5).

$$C_{P_{max}} = \frac{16}{27} \approx 0,5926 \quad (5)$$

De esta manera, la eficiencia de una turbina eólica puede ser expresada como la proporción entre el C_P propio del dispositivo y el valor numérico de dicho límite, tal como se muestra en la ecuación (6).

$$\eta = \frac{27}{16} C_P \cdot 100 \% \approx \frac{C_P}{0,5926} 100 \% \quad (6)$$

Cada modelo se hace rotar a diferentes velocidades con el propósito de construir las curvas de desempeño de cada uno de ellos. Estas velocidades se establecen en valores enteros entre 1 y 10 *rps*

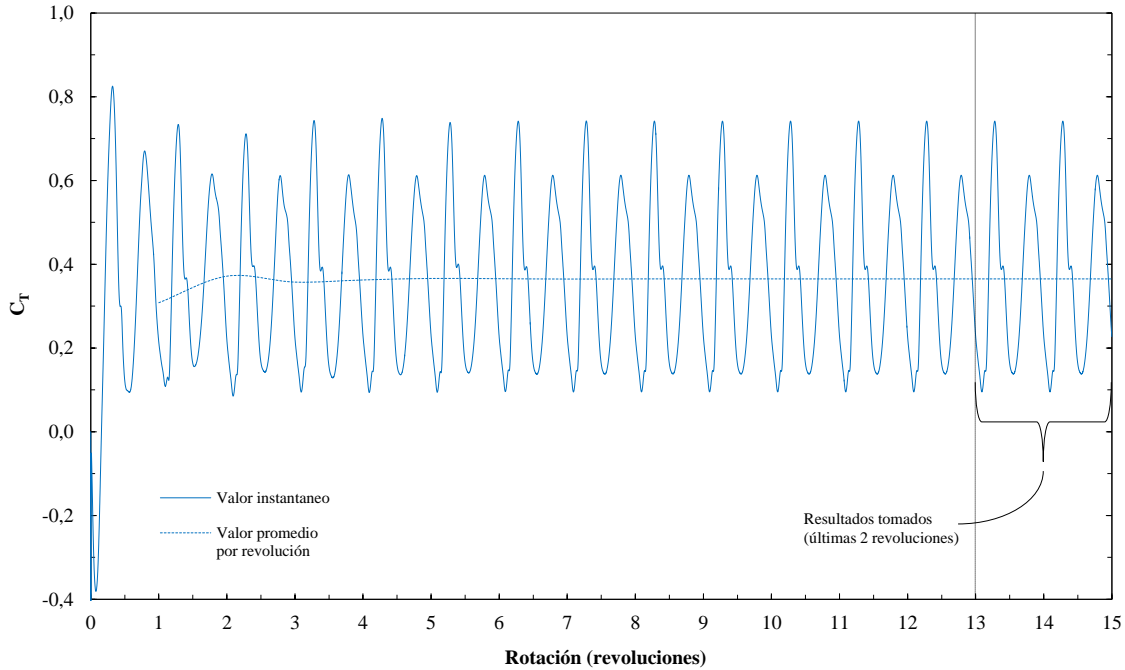


Figura 3. Resultados obtenidos a través de la simulación del rotor con el perfil semicircular a una velocidad de rotación de 5 *rps* ($TSR = 0,7854$)

(revoluciones por segundo), con los que se calcula las TSR correspondientes mediante la ecuación (3).

De las simulaciones se toma como resultado el C_T generado en el eje del rotor en función de su posición acimutal (θ). Cada simulación se lleva a cabo para 15 revoluciones completas del rotor buscando conseguir un estado cuasi-estable; sin embargo, solo se tienen en cuenta los valores de las últimas dos revoluciones para estimar el C_T promedio, ya que estos corresponden a los resultados con mayor estabilidad temporal (Figura 3).

De esta manera se obtiene un único valor que representa el C_T en todas las posiciones angulares del rotor. Este valor de C_T promedio permite determinar el valor promedio del C_P a través de la ecuación (4), para cada velocidad de rotación Figura 4 [3], [34].

Seguidamente, se ajusta un polinomio interpolador de segundo grado entre los tres puntos consecutivos que describen el pico de mayor rendimiento en la curva de C_P de cada rotor (ecuación (7)) y se calcula el valor en que su derivada se hace cero, ya que este punto de pendiente nula corresponde al de máximo desempeño (ecuación (8)) (Figura 5).

$$C_P = P(TSR) = a \cdot TSR^2 + b \cdot TSR + c \quad (7)$$

$$\frac{d C_P}{d TSR} = 2a \cdot TSR + b = 0 \quad \rightarrow \quad TSR_{opt} = -\frac{b}{2a} \quad \rightarrow \quad C_{P_{max}} = P(TSR_{opt}) \quad (8)$$

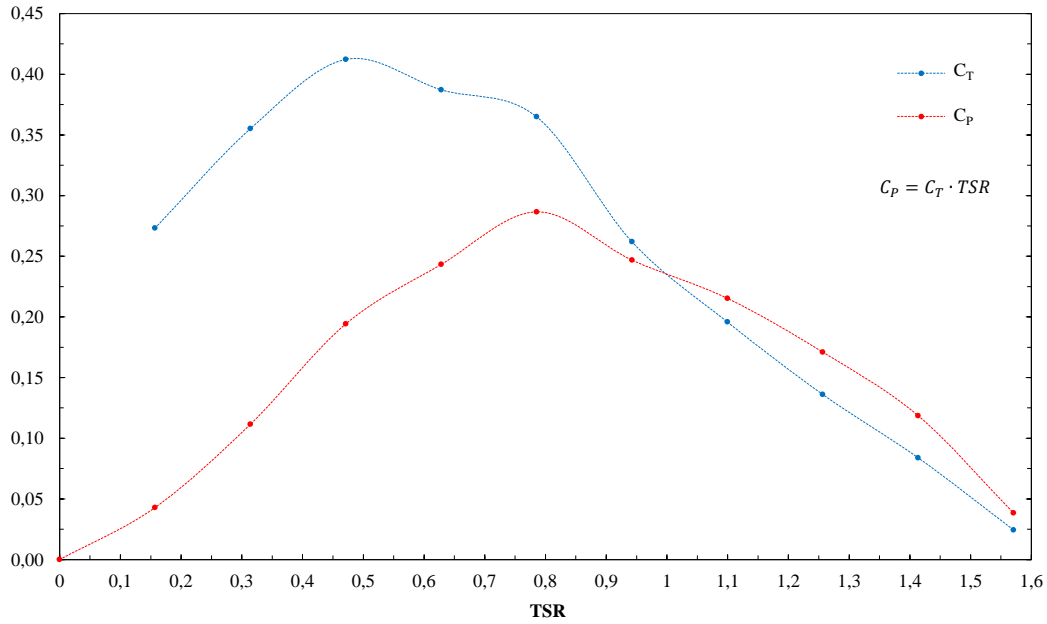


Figura 4. Curvas de desempeño del rotor con el perfil semicircular (los valores corresponden a los coeficientes promedio)

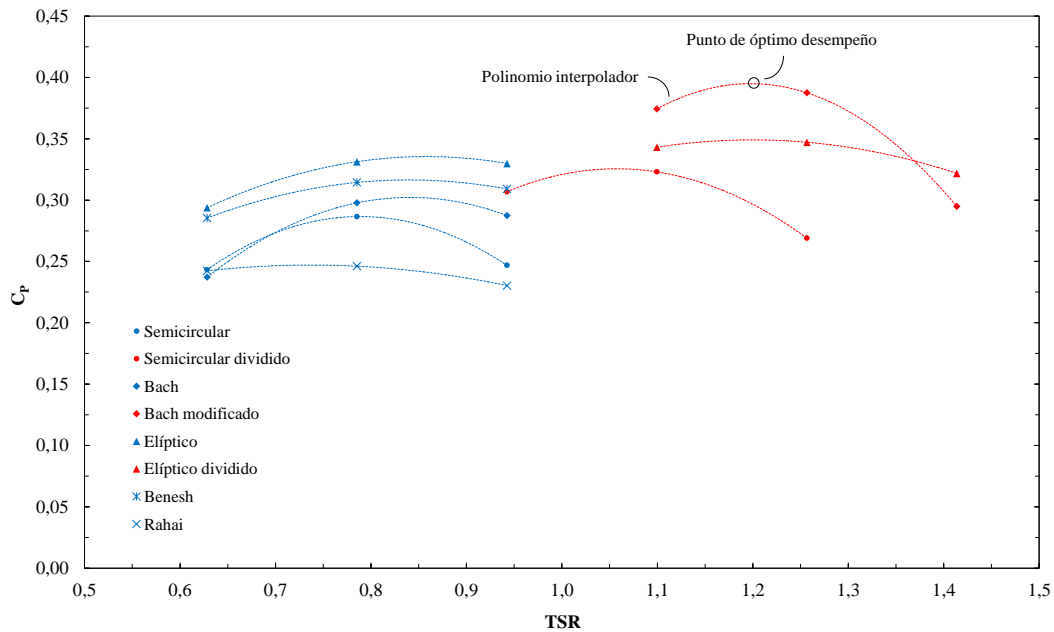


Figura 5. Polinomios de interpolación ajustados a los picos de las curvas de rendimiento para cada modelo de rotor

Análisis de independencia de discretización

Para obtener el número de particiones en las que se dividió la geometría de análisis de cada simulación y el periodo que se simuló, fue necesario realizar un análisis de independencia para las discretizaciones espacial y temporal, buscando obtener una convergencia en el resultado de manera eficiente.

El análisis de independencia para la discretización espacial se realiza bajo las mismas condiciones con las que se estudian las geometrías en cuestión. Se establece el rotor semicircular como el modelo de prueba y se hace rotar a una velocidad de 5 revoluciones por segundo. Se analizan cinco discretizaciones espaciales (mallados) con la misma estructura, pero con un crecimiento binomial en el número de particiones de cada borde de acuerdo al grado de refinamiento de cada malla. El cuerpo estático que simula el fluido en campo lejano tiene una malla estructurada con elementos únicamente cuadriláteros, mientras que el cuerpo móvil que simula el campo cercano al rotor posee una malla no estructurada con elementos cuadriláteros predominantes y algunos triangulares para conseguir una mayor adaptabilidad a la geometría (Figura 6 izquierda). El mallado referente a las paredes del rotor está refinado y posee una estructuración por capas perpendiculares (*inflation*) que permiten una mejor predicción del flujo en las condiciones de capa límite (Figura 6 derecha).

Los resultados obtenidos en este análisis para cada mallado describen el comportamiento del C_T de acuerdo al acimut del rotor (Figura 7). Al estimar el valor promedio del C_T para cada malla, se observa que su desviación es mínima al ser comparado con el valor correspondiente de la malla más fina, indicando que existe convergencia en el resultado (Tabla I).

Otro parámetro importante para la selección de la malla es el valor de y^+ , el cual se recomienda inferior a la unidad al utilizar el modelo de turbulencia $k - \omega SST$, así se garantizan predicciones adecuadas en el flujo cercano a las paredes [30]. De acuerdo a lo anterior, se selecciona el cuarto mallado y se procede con el análisis de independencia temporal.

Tabla I. Resultados de la prueba de independencia de mallado

Malla	1	2	3	4	5
N° Elementos	18.044	45.729	115.224	319.267	998.063
C_T promedio	0,3420	0,3461	0,3458	0,3492	0,3488
Desviación	1,9495 %	0,7705 %	0,8533 %	0,1067 %	
y^+	2,9103	1,9137	1,1812	0,6625	0,3642
Tiempo de simulación (horas)	3,6667	4,4333	6,2167	13,8667	40,1000

El análisis de independencia para la discretización temporal se realiza bajo las mismas condiciones y para la misma geometría que el análisis de independencia de mallado. Se toman cinco discretizaciones de tiempo generadas al dividir el periodo de revolución del rotor en un número

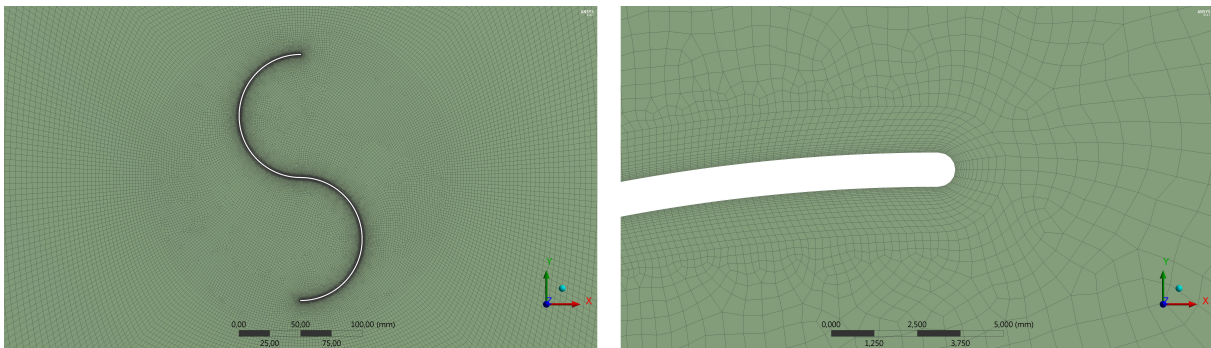


Figura 6. Estructura general de los mallados (izquierda). Detalle del mallado cerca a las paredes del perfil (derecha)

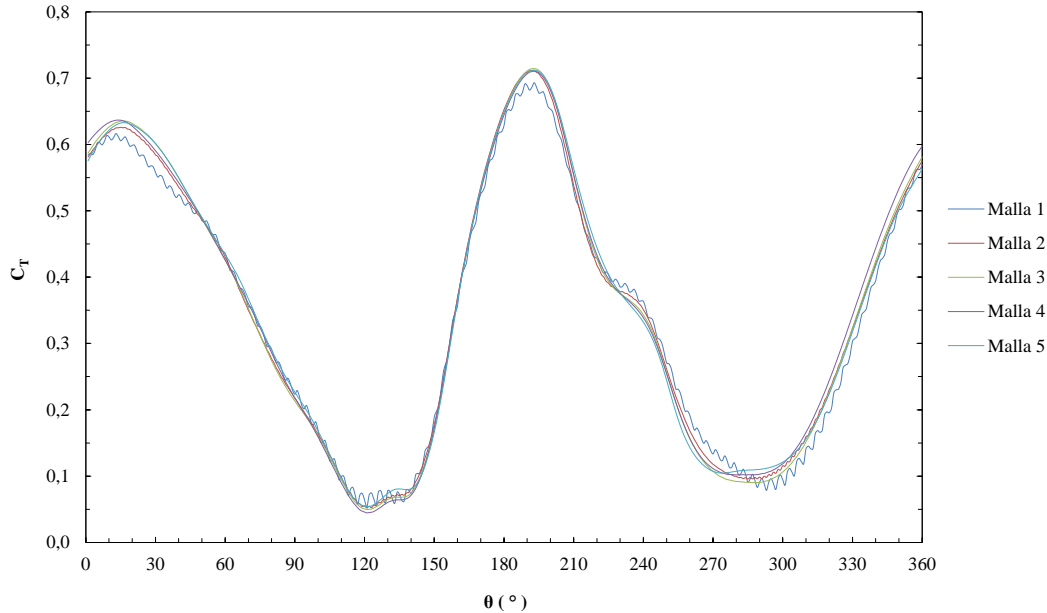


Figura 7. Coeficiente de torque (C_T) según acimut (θ) para cada mallado

de elementos o pasos de tiempo (*time step*). Similar al análisis de independencia de mallado, los resultados obtenidos en este análisis para cada discretización describen el comportamiento del C_T de acuerdo al ángulo de acimut del rotor (Figura 8). Luego de estimar el valor promedio del C_T para cada discretización temporal, se observa que su desviación va disminuyendo a medida que la partición se hace más fina, acercándose cada vez más a un valor de convergencia (Tabla II). Se determina entonces una discretización de 720 pasos temporales por revolución, que representa una relación adecuada entre el error admisible y el tiempo de simulación.

Tabla II. Resultados de la prueba de independencia temporal. *ts/rev* corresponde a time step por revolución

Discretización	1	2	3	4	5
N° Elementos (<i>ts/rev</i>)	90	180	360	720	1.440
C_T promedio	0,2995	0,3323	0,3492	0,3649	0,3706
Desviación	19,1704 %	10,3153 %	5,7661 %	1,5221 %	
Tiempo de simulación (horas)	4,4000	7,8333	13,8667	25,6333	46,0167

3. Resultados

3.1. Análisis de resultados

Al estimar el punto de óptimo desempeño de cada modelo de rotor, se identifican los parámetros que se muestran en la Tabla III. La eficiencia de cada perfil se obtiene al relacionar el C_P con el límite de Betz a través de la ecuación (6) [6].

Tabla III. Condiciones óptimas de desempeño para las geometrías analizadas

Geometría	TSR	C_T	C_P	η
Semicircular	0,789	0,363	0,287	48,4 %
Semicircular dividido	1,057	0,308	0,326	54,9 %
Bach	0,841	0,359	0,302	51,0 %
Bach modificado	1,198	0,330	0,395	66,6 %
Elíptico	0,858	0,391	0,335	56,6 %
Elíptico dividido	1,200	0,291	0,349	58,9 %
Benesh	0,840	0,377	0,316	53,4 %
Rahai	0,737	0,335	0,247	41,7 %

Estos parámetros permiten obtener una comparación más objetiva del desempeño de las geometrías, al ser estimados bajo iguales términos y condiciones. En la Figura 9 se puede apreciar gráficamente la magnitud de cada parámetro de acuerdo a la geometría. Similarmente, en la Figura 10 se detalla la eficiencia obtenida por cada modelo de rotor.

Se puede apreciar que las geometrías que presentan un perfil dividido pueden conseguir un mejor rendimiento a mayores velocidades de rotación, lo que puede verse reflejado en el aumento del C_P máximo. Los perfiles Bach modificado y elíptico dividido presentan el mayor rendimiento, y lo consiguen en valores de TSR superiores a la unidad.

Al comparar el perfil semicircular convencional y el perfil Bach modificado en función de su ángulo acimutal (Figura 11), se puede apreciar que el desempeño del segundo rotor es siempre superior al del primero, consiguiendo la mayor diferencia de rendimiento en la alineación de mayor oposición al flujo, es decir a un ángulo de 0° de acuerdo con el sistema de referencia tomado. Esto indica que la mayor ventaja del segundo perfil sobre el primero se encuentra en la optimización de las fuerzas de arrastre.

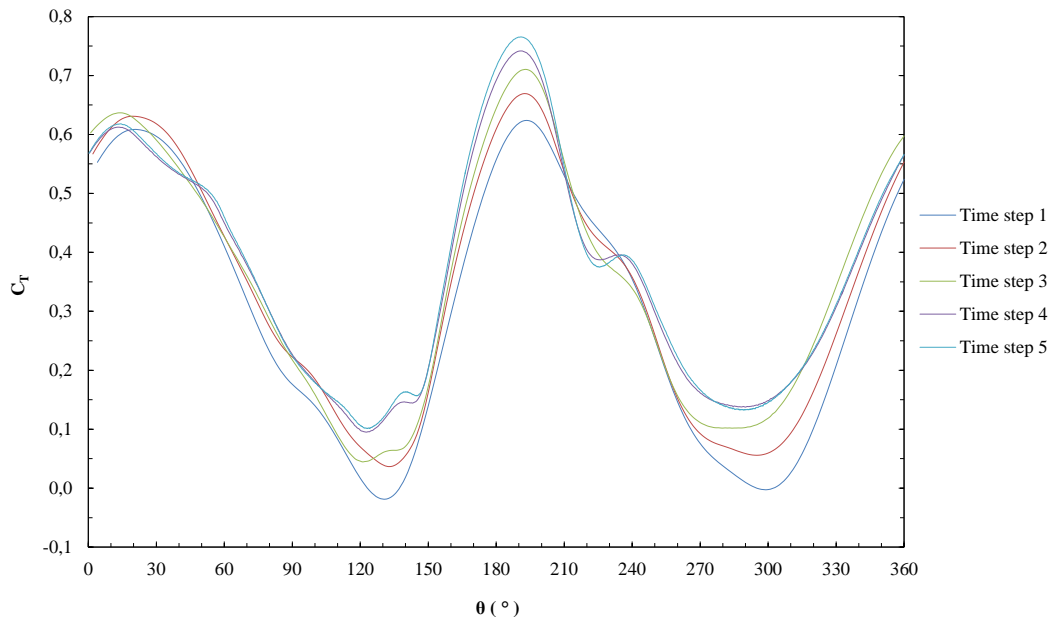


Figura 8. Coeficiente de torque (C_T) según acimut (θ) para cada paso temporal

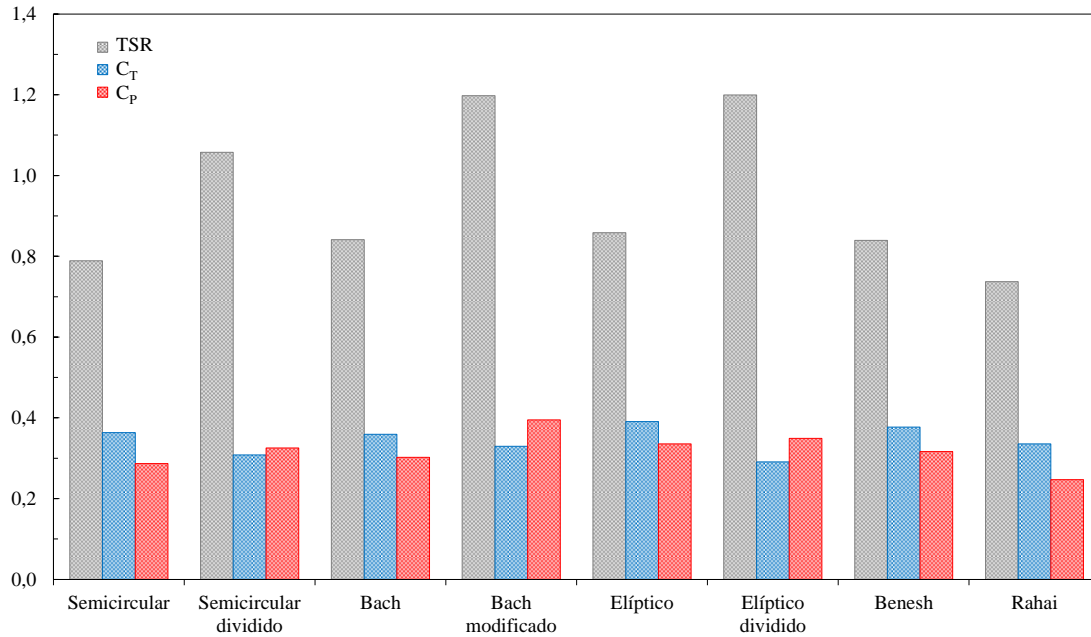


Figura 9. Gráfico comparativo de las condiciones óptimas de desempeño para las geometrías analizadas

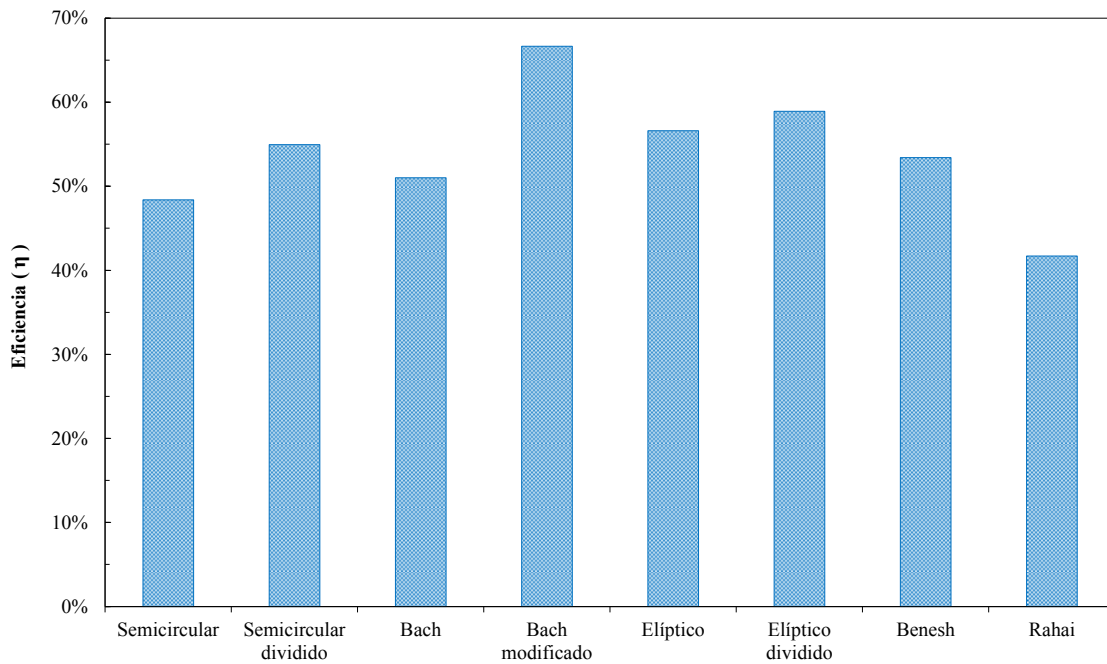


Figura 10. Eficiencia máxima de cada geometría con respecto al límite de Betz

Del mismo modo, puede observarse en la misma Figura que la posición acimutal de mayor generación de torque para ambos rotores es cercana a 110° , la cual corresponde a una alineación de baja oposición al flujo y por ende de bajo arrastre. Esto evidencia el significativo aporte de la fuerza de sustentación en el desempeño de estos rotores.

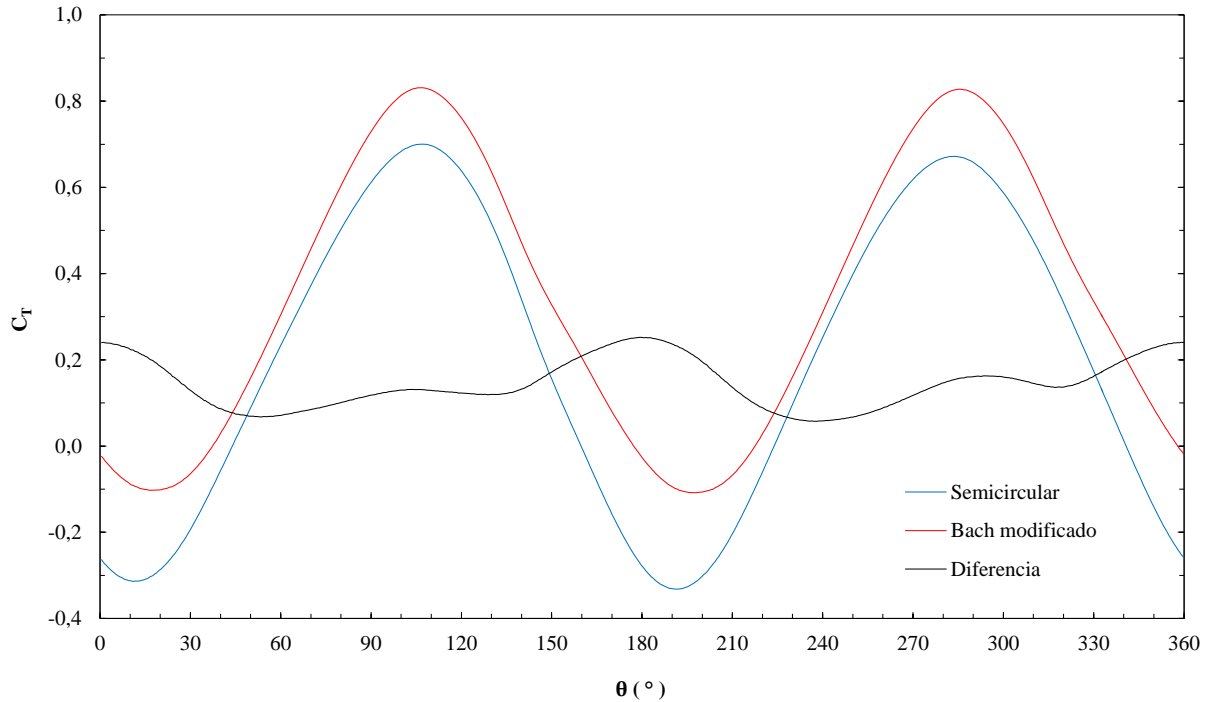


Figura 11. Diferencia entre el coeficiente de torque (C_T) del perfil semicircular convencional y el Bach modificado, a una TSR de 1,0996

Se evidencia que la menor ventaja en el desempeño entre los dos rotores se presenta en las posiciones cercanas a los 50° , las cuales corresponden a las de mayor solapamiento (sombra) entre los álabes de un mismo rotor.

3.2. Contornos de presión y velocidad

Al comparar los gráficos de contornos de presión de la Figura 12, puede evidenciarse que la presión en el lado cóncavo del álabe que avanza es superior para el perfil dividido (perfil Bach modificado) que para el perfil integral (perfil semicircular convencional). Esto se debe a que el flujo existente a través de la abertura generada por la división del perfil (Figura 13) evita la despresurización temprana de dicha región, y de manera consecuente aumenta el momento producido en el eje del rotor, reflejándose en un rendimiento superior y en la posibilidad de girar a una mayor velocidad.

Por otro lado, puede observarse una mayor velocidad y turbulencia en el flujo desprendido de la punta del álabe del perfil dividido (Figura 13), lo que demuestra un mayor contenido energético en el fluido adyacente a la superficie. Esta energía es proveniente en su mayoría del flujo a través de la abertura y evita la separación temprana de la capa límite de fluido, lo que para bajos números de Reynolds puede representar una disminución en la resistencia por arrastre [12], [18].

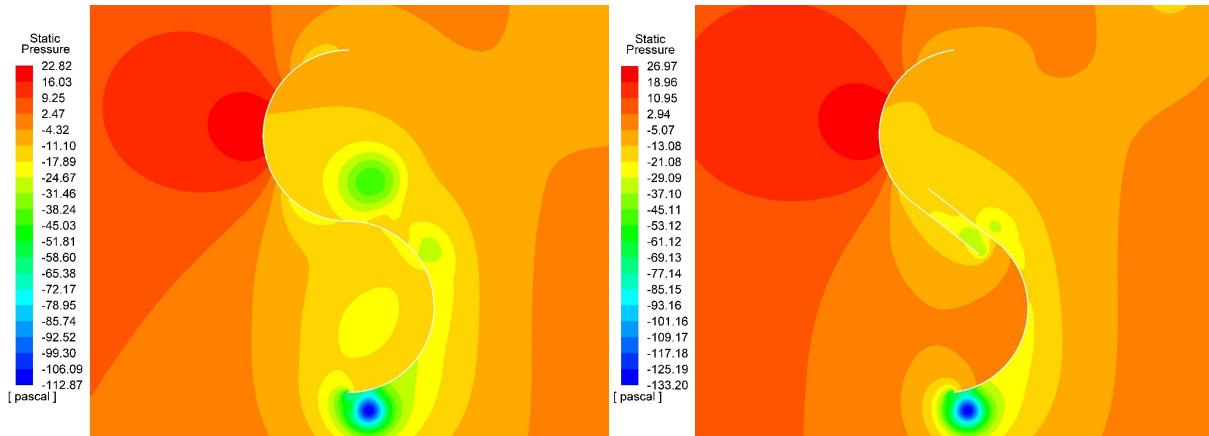


Figura 12. Contornos de presión para el perfil semicircular convencional (izquierda) y el perfil Bach modificado (derecha) a una TSR de 1,0996

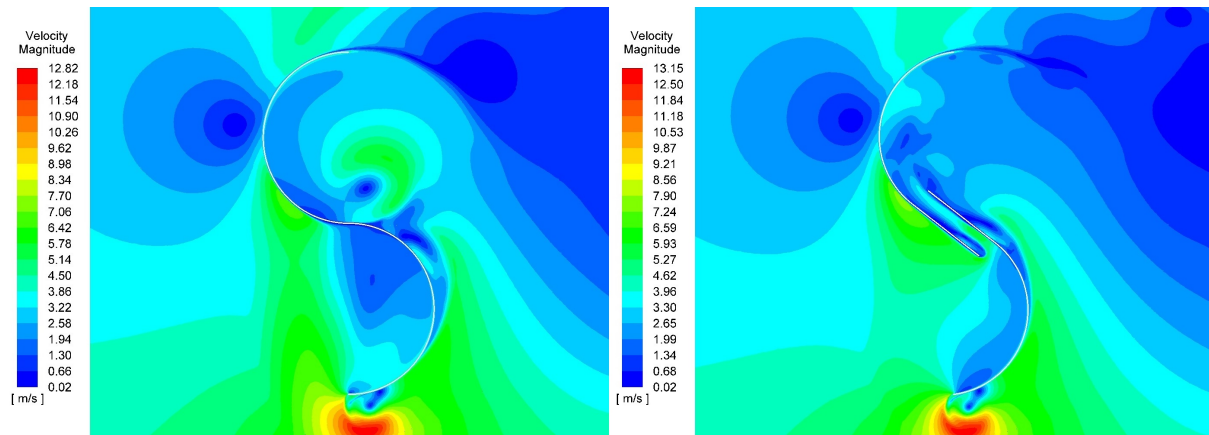


Figura 13. Contornos de velocidad para el perfil semicircular convencional (izquierda) y el perfil Bach modificado (derecha) a una TSR de 1,0996

4. Conclusiones

En la presente investigación se ha estudiado de forma numérica el efecto de la geometría del álabe en el rendimiento de una turbina eólica de arrastre. Las simulaciones se llevaron a cabo para los perfiles semicircular convencional, semicircular dividido, Bach, Bach modificado, elíptico, elíptico dividido, Benesh y Rahai. El perfil Bach modificado presentó el mejor desempeño entre las geometrías evaluadas, con un C_P máximo de 0,395 a una TSR de 1,2 y a un régimen de flujo correspondiente a un viento de baja categoría (con un número Reynolds de 6×10^4), lo que representa una eficiencia de 66,6 % con referencia al límite de Betz y un aumento del 37,8 % con respecto al desempeño del perfil semicircular convencional.

Las condiciones de máximo desempeño para el perfil Bach modificado, entre algunos otros perfiles, se encuentran en relaciones de velocidad de punta (TSR) superiores a la unidad, esto permite determinar que algunas geometrías favorecen en mayor medida la existencia de fuerzas distintas al arrastre aerodinámico para la producción del torque, en este caso, la fuerza de sustentación. Esto abre las puertas a un análisis en detalle del perfil Bach modificado, que permita encontrar las proporciones geométricas óptimas para su desempeño, estimar el aporte de los coeficientes aero-

dinámicos en la obtención del C_T y evaluar el efecto que tiene un álabes sobre el otro en un mismo rotor.

Si bien el objetivo del estudio es seleccionar un perfil para aprovechar vientos de baja velocidad, es necesario evaluar en futuros trabajos el comportamiento del perfil seleccionado a velocidades de viento superiores, con el fin de predecir su desempeño en tales condiciones y compararlo con las turbinas eólicas convencionales de eje horizontal.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa Colombia científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema científico [Contrato No. FP44842-218-2018].

Referencias

- [1] Joachim Toftegaard Hansen, Mahak Mahak, and Iakovos Tzanakis. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy*, 171:1371-1381, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.001>. 2
- [2] Amin A Mohammed, Hassen M Ouakad, Ahmet Z Sahin, and Haitham Bahaidarah. Vertical axis wind turbine aerodynamics: Summary and review of momentum models. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(5), 2019. <https://doi.org/10.1115/1.4042643>. 2
- [3] Ivo Marinić-Kragić, Damir Vučina, and Zoran Milas. Numerical workflow for 3D shape optimization and synthesis of vertical-axis wind turbines for specified operating regimes. *Renewable Energy*, 115:113-127, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.030>. 2, 6
- [4] Muhammad Mahmood Aslam Bhutta, Nasir Hayat, Ahmed Uzair Farooq, Zain Ali, Sh Rehan Jamil, and Zahid Hussain. Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4):1926-1939, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.004>. 2, 3
- [5] Baoshou Zhang, Baowei Song, Zhaoyong Mao, and Wenlong Tian. A novel wake energy reuse method to optimize the layout for Savonius-type vertical axis wind turbines. *Energy*, 121:341-355, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.004>. 2
- [6] John W Mitchell. *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, 2020. 2, 3, 9
- [7] Ali M Abdelsalam, MA Kotb, Khaled Yousef, and IM Sakr. Performance study on a modified hybrid wind turbine with twisted Savonius blades. *Energy Conversion and Management*, 241, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114317>. 3
- [8] Shikha, TS Bhatti, and DP Kothari. Early development of modern vertical and horizontal axis wind turbines: A review. *Wind Engineering*, 29(3):287-299, 2005. <https://doi.org/10.1260/030952405774354859>. 3
- [9] S. J. Savonius. Vertical axis wind turbine, 1929. US Patent 1,697,574. 3
- [10] Liu Chen, Jian Chen, and Zhouzhou Zhang. Review of the Savonius rotor's blade profile and its performance. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(1), 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5012024>. 3
- [11] Hussain H Al-Kayiem, Bilawal A Bhayo, and Mohsen Assadi. Comparative critique on the design parameters and their effect on the performance of S-rotors. *Renewable Energy*, 99:1306-1317, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.015>. 3
- [12] YA Cengel and JM Cimbala. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2018. 3, 12
- [13] Nur Alom and Ujjwal K Saha. Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 186:267-277, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.058>. 3

- [14] Sigard J Savonius. The S-rotor and its applications. *Mechanical Engineering*, 53(5):333-338, 1931. 3
- [15] Joao Vicente Akwa, Gilmar Alves da Silva Júnior, and Adriane Prisco Petry. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 38(1):141-149, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.013>. 3
- [16] Anuj Kumar and RP Saini. Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:289-310, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.005>. 3
- [17] Lu Wang and Ronald W Yeung. On the performance of a micro-scale Bach-type turbine as predicted by discrete-vortex simulations. *Applied Energy*, 183:823-836, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.185>. 3
- [18] Sukanta Roy, Prasenjit Mukherjee, and Ujjwal K Saha. Aerodynamic performance evaluation of a novel Savonius-style wind turbine under an oriented jet. In *Gas Turbine India Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2014. <https://doi.org/10.1115/GTINDIA2014-8152>. 3, 12
- [19] Sukanta Roy and Ujjwal K Saha. Numerical investigation to assess an optimal blade profile for the drag based vertical axis wind turbine. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2013. <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-64001>. 3
- [20] Nur Alom and Ujjwal K Saha. Arriving at the optimum overlap ratio for an elliptical-bladed Savonius rotor. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, volume 50961, page V009T49A012. American Society of Mechanical Engineers, 2017. <https://doi.org/10.1115/GT2017-64137>. 3, 4
- [21] Nur Alom. Influence of curtain plates on the aerodynamic performance of an elliptical bladed Savonius rotor (S-rotor). *Energy Systems*, pages 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12667-021-00428-w>. 3
- [22] Alvin H Benesh. Wind turbine with Savonius-type rotor, 1996. US Patent 5,494,407. 3
- [23] Nur Alom, Bastav Borah, and Ujjwal K Saha. An insight into the drag and lift characteristics of modified Bach and Benesh profiles of Savonius rotor. *Energy Procedia*, 144:50-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.007>. 3
- [24] Hamid R Rahai and Hamid Hefazi. Vertical axis wind turbine with optimized blade profile, 2008. US Patent 7,393,177. 3
- [25] Hamid R Rahai and H Hefazi. Development of optimum design configuration and performance for vertical axis wind turbine. *Feasibility Analysis Report*, 2005. 3
- [26] JP Abraham, GS Mowry, BP Plourde, EM Sparrow, and WJ Minkowycz. Numerical simulation of fluid flow around a vertical-axis turbine. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(3), 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3588037>. 4
- [27] M Niyat Zadeh, M Pourfallah, S Safari Sabet, M Gholinia, S Mouloudi, and A Taheri Ahangar. Performance assessment and optimization of a helical Savonius wind turbine by modifying the Bach's section. *SN Applied Sciences*, 3(8), 2021. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04731-0>. 4
- [28] MH Pranta, MS Rabbi, and MM Roshid. A computational study on the aerodynamic performance of modified Savonius wind turbine. *Results in Engineering*, 10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100237>. 4
- [29] AFP Ribeiro, AM Awruch, and HM Gomes. An airfoil optimization technique for wind turbines. *Applied Mathematical Modelling*, 36(10):4898-4907, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.026>. 4
- [30] Bengt Andersson, Ronnie Andersson, Love Haakansson, Mikael Mortensen, Rahman Sudiyo, and Berend Van Wachem. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge University Press, 2011. 4, 8
- [31] Pramod Jain. *Wind Energy Engineering*. McGraw-Hill, 2011. 4, 5
- [32] Henk Kaarle Versteeg and Weeratunge Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education, 2007. 4
- [33] Sathyajith Mathew. *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, 2006. 4, 5
- [34] Emeel Kerikous and Dominique Thévenin. Optimal shape of thick blades for a hydraulic Savonius turbine. *Renewable Energy*, 134:629-638, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.037>. 6

Luis Antonio Gallo Jaramillo



Ingeniero Mecánico de la Universidad de Antioquia, Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica de la misma universidad. Forma parte del Grupo de Investigación Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia. Docente de Cátedra en la Universidad de Pamplona.
Correo electrónico: luis.gallo@udea.edu.co.

Edwin Lenin Chica Arrieta



Doctor en Ingeniería de la Universidad de Valladolid (España). Magíster en Ingeniería y Especialista en Diseño Mecánico de la Universidad Eafit (Colombia). Ingeniero Mecánico de la Universidad de Antioquia (Colombia). Docente de la Universidad de Antioquia y líder del Grupo de Investigación Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia.
Correo electrónico: edwin.chica@udea.edu.co

Elkin Gregorio Flórez Serrano



Ingeniero Mecánico de la Universidad Francisco de Paula Santander sede Cúcuta. Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes y Magíster en Ingeniería Química y de Procesos en la Universidad Rovira i Virgili, sede Tarragona (España). Doctor en Ingeniería Mecánica en la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona (España). Profesor titular del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona. Director del grupo de Investigación de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona (GIMUP).

Correo electrónico: eflorez@unipamplona.edu.co

Capital Requirements to Cover Operational Risk in Financial Institutions of Emerging Markets A Gaussian Copula Model

Requerimientos de capital para cubrir el riesgo operativo en instituciones financieras de mercados emergentes. Un modelo de Cópula Gaussiana

Betty Johanna Garzón-Rozo^{ID*1}, **Claudia Paola Martín-Bernal**^{ID*2}, **Feizar Rueda-Velasco**^{ID*3}

¹The University of Edinburgh (Edinburgh, Scotland, UK), ²Banco de la República (Bogotá, Colombia) and Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ³Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia).

*Correspondence e-mail: fjrueav@udistrital.edu.co

Received: 15/08/2021. Modified: 27/08/2021. Accepted: 15/09/2021.

Abstract

Context: Advanced Measurement Approach (AMA) has been the umbrella to identify the models used for modeling the capital to cover Operational Risk (Total Operational Value at Risk, OpVaR) in financial institutions in developed countries. The Loss Distribution Approach (LDA) has been the most popular model used by international banks for OpVaR calculation. However, operational losses often have multivariate dependences that are not accounted for in the LDA. This paper applies a Gaussian copula to model the multivariate dependences in operational losses.

Method: Two models were compared to estimate capital requirement for operational risk. Model (i) is the standard LDA model (BCBS 2004). Model (ii) incorporates a multivariate Gaussian copula into the LDA to model multivariate dependence between operational losses (severities). This research analyzes an operational loss data set, SAS® Operational Risk Global Data (SAS OpRisk Global Data), in order to model operational risk at financial institutions in emerging markets between 1990 and 2013.

Results: The impact of Model (ii) was evaluated on the estimates of the total regulatory capital for operational risk and compared with the one predicted by (i). The results confirm the existence of diversification benefit up to 33 %.

Conclusions: Modeling explicitly the multivariate dependence between operational losses has a clear impact on capital requirement for institutions in emerging markets. The implementation of a Gaussian copula into the LDA model provides a sophisticated tool to estimate operational risk capital in emerging markets, as well as the possibility for diversification benefit.

Keywords: operational risk, Loss Distribution Approach (LDA), multivariate copulas, emerging markets.

Acknowledgements: To SAS for providing the database used in this research.

Language: English

Open access



Cite as: B. J. Garzón-Rozo, C. P. Martín-Bernal, and F. Rueda-Velasco, "Capital Requirements to Cover Operational Risk in Financial Institutions of Emerging Markets. A Gaussian Copula Model". *Ing*, vol. 27, no. 1, 2022. e18575.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18575>

Resumen

Contexto: Bajo el Enfoque de Medición Avanzada (AMA) se han identificado los modelos utilizados para modelar el capital necesario para cubrir el Riesgo Operacional (Valor Operacional Total del Riesgo, OpVaR) en instituciones financieras de países desarrollados. El Enfoque de Distribución de Pérdida (LDA) ha sido el modelo más popular usado por bancos internacionales para calcular el OpVaR. Sin embargo, las pérdidas operacionales suelen tener dependencias multivariadas que no son tenidas en cuenta en el LDA. Este artículo aplica una cópula Gaussiana para modelar las dependencias multivariadas en pérdidas operacionales.

Método: Se compararon dos modelos para estimar el requerimiento de capital para el riesgo operacional. El Modelo (i) es el modelo estándar LDA (BCBS 2004). El Modelo (ii) incorpora una copula Gaussiana al LDA para modelar la dependencia multivariada entre pérdidas operacionales (severidades). Para modelar el riesgo operacional en instituciones financieras de mercados emergentes, se emplearon datos reales de pérdidas operacionales entre 1990 y 2013 provistas por SAS® Operational Risk Global Data (SAS OpRisk Global Data).

Resultados: El impacto del Modelo (ii) se evaluó con respecto a los estimados del capital total regulatorio para el riesgo operacional y se comparó con el predicho por (i). Los resultados confirman la existencia de un beneficio de diversificación de hasta 33 %.

Conclusiones: Modelar explícitamente la dependencia multivariada entre pérdidas operacionales tiene un claro impacto sobre el requerimiento de capital para instituciones financieras en mercados emergentes. La implementación de la cópula Gaussiana en el modelo LDA provee una herramienta sofisticada para estimar el capital de riesgo operacional en mercados emergentes, así como la posibilidad de obtener beneficio por diversificación.

Palabras clave: riesgo operativo, Modelo de Distribución de Pérdidas Agregadas (LDA), cópulas multivariadas, mercados emergentes

Agradecimientos: A SAS® por proporcionar la base de datos con la que se realizó este estudio.

Idioma: Inglés

1. Introduction

Modeling capital requirements for operational risk via the Advanced Measurement Approach (AMA) (*i.e.*, total Operational Value at Risk, OpVaR) has been widely investigated using data from financial institutions in developed countries [1]–[3]. However, the estimation of OpVaR across financial institutions in emerging markets¹ has received little attention. This paper addresses this gap.

The Basel Committee on Banking Supervision (BCBS) allows banks to estimate the regulatory capital that covers their annual operational risk exposure using their own models via the AMA (Basel II/III Capital Accord 2004/2011). Among the AMA models, the Loss Distribution Approach (LDA) has been one of the most popular methods used by international banks [1], [2]. Among the eligible variants of the LDA, there is a complex and reliable statistical model widely used to model dependence: copula models. The modeling of dependences between losses and the quantification of the capital to be held for covering operational risk exposure have been essential issues for both financial institutions and regulators over the past two decades [2], [4]–[7].

¹We follow the definition provided by Antoine van Agtmael, economist of World Bank, emerging markets are rapidly growing economies with rapid industrialization [89].

The importance of understanding, measuring, and modeling operational risk at the multivariate level is given by the high dimensions involved when constructing regulatory capital. Therefore, the main objective of this paper is to model the multivariate dependence between losses (i.e., severities) using a Gaussian copula and to calculate the capital to be held to cover operational risk exposure at financial institutions in emerging markets. The motivation for looking at these markets is because they are assuming an increasingly prominent position in global economy [8]–[11]. The emerging markets considered in this research are those established by the MSCI Global Investable Market Indexes' (GIMI) Country Classification methodology [12], which are: Brazil, Chile, China, Colombia, Czech Republic, Egypt, Greece, Hungary, India, Indonesia, Malaysia, Mexico, Pakistan, Peru, the Philippines, Poland, Qatar, Russia, South Africa, South Korea, Taiwan, Thailand, Turkey, and the United Arab Emirates.

2. Literature review

The banking industry has had significant losses due to operational risk over the last three decades. Large-scale financial failures such as Barings, Orange County, Allied Irish Banks, Enron, and Banco Popular Español were caused for the most widely known sort of operational loss: unauthorized trading, breakdowns of internal controls, methods, and systems failures, etc. [13]–[17]. Examples of financial failures caused by operational risk are also significant in emerging markets. For instance, the Inverlink financial group in Chile reported an operational loss of USD 178 million in 2003, which was caused by lost documents and privileged information [18]. Brazil is the country with the highest cybernetic threats and attacks on financial institutions (17 % of total daily threats) [19]. In Mexico, the number of credit card frauds was five times greater than Europe in 2018, with financial losses close to USD 250 million [20]. The National Bank of Punjab in India was accused of internal fraud for USD 2.000 million [21]. In Malaysia, 3.533 fraud cases in online operations were reported, causing losses amounting to USD 44 million in 2019 [22].

Although financial institutions in both developed and developing countries are exposed to operational risk, only the former are obligated to comply with the guidelines of the Basel Committee on Banking Supervision (BCBS) II/ III, as those guidelines are not mandatory for financial institutions in emerging markets [23]. Therefore, there is a clear gap in the adoption of regulatory guidelines by financial institutions in said markets.

BCBS II allows banks and financial institutions to estimate the capital requirements to cover operational risk exposure (OpVaR) using their own mathematical models, such as the Advanced Measurement Approach (AMA). Within the AMA approach, the Loss Distribution Approach (LDA) has become the most popular and convenient method to estimate the OpVaR [24]–[26]. The LDA convolutes the distribution of frequencies and distribution of severities (operational losses) into the loss aggregate distribution. There is extensive literature on this model, and some examples are published in [2], [7], [27]–[30]. However, the LDA standard model suggested by BCBS II has some problems, namely (1) the model may over-estimate the OpVaR because the total potential losses are calculated as the sum of individual losses for every risk [24]; (2) the model assumes that severities are random variables with perfect positive dependence (however, substantial literature such as [2], [6], [31], [32] has questioned such assumption); and (3) the model does not include a dependen-

ce analysis between operational losses, which produces an overestimated and conservative OpVaR calculation [33], [34].

As a result, the study of dependences between operational losses has received increased attention in the last two decades. Some studies found OpVaR reductions when using copulas for modeling dependences. [35] showed Op- VaR reductions between 20 and 29 % using *t copula* in three dimensions. Other authors found similar reductions using Gaussian *copulas*. [1] and [33] obtained OpVaR reductions between 30 and 50 %, while [36] found reductions between 7 and 11 % using Gaussian, *t*, and Gumbel *copulas*.

However, most of the research has been focused on developed countries, and, as for emerging markets, the literature is scarce. [23] studied the potential impact of implementing BCBS in emerging markets but did not include any modeling for capital estimation. [37] and [38] used copulas for estimating the value at risk in the stock market in Brazil and Mexico [37] as well as Colombia [38], but the OpVaR calculation was out of scope. Conceptual models have studied how to manage operational risk and its implications on emerging markets, and studies that have discussed the scope of the existing methods have not addressed the mathematical estimation [39], [40]. Other researchers studied AMA models like LDA in emerging markets but did not include the modeling of the dependences between operational risks [26], [41], [42].

Table I shows the literature review carried out in this work. 58 bibliographic references of related topics were considered. 88 % (52 references) were based on the financial sector, and 81 % (48 references) had information on the calculation of OpVaR, that is, they focused their studies on operational risk analysis. It is clear that only 29 references (49 %) used Monte Carlo simulation in their calculations, and 25 references (42 %) applied *copula* models. Out of the 59 articles related to the subject, only 38 % (23 articles) focused on emerging markets.

As a conclusion, the literature on operational risk applied to emerging markets is scarce. Moreover, we could not find literature that addresses the effect of modeling multivariate dependence between operational losses in capital risk estimation. This paper addresses this gap.

3. Methodology

The structure of this research is outlined in Fig. 1, which facilitates the understanding of the flow throughout distinct phases and steps. In the first phase, the Standard Model of Loss Distribution Approach (LDA) (Basel II 2004) is implemented; in the second phase, the parameters of the Gaussian multivariate *copula* were modeled; in the third phase, the modeling of dependencies between severities was included in the LDA standard model; and finally, in the fourth phase, the capital requirement for operational risk and the diversification benefit were estimated for each model. The diversification benefit is defined as the OpVaR reduction when a *copula* is used [35]. This paper adds value in the second and third phase, where the Gaussian *copula* is introduced into the standard LDA model. This model was applied to OpRisk Global Data. This database is a worldwide repository that records operational loss classification, total loss, occurrence date, country of origin, and type of industry. This paper only considered losses that occurred in emerging markets.

Table I. Summary of the literature review

Author	FS	OpVaR	AMA	LDA	MCS	C	EM	Author	FS	OpVaR	AMA	LDA	MCS	C	EM
[43]	x	x	x		x	x		[1]	x	x	x	x	x		
[44]	x	x						[45]		x	x	x	x		
[31]	x	x	x	x	x	x		[46]	x	x	x	x	x	x	
[47]	x	x			x		x	[41]	x	x	x	x	x		x
[28]	x	x						[48]		x					x
[6]	x						x	[49]	x	x		x	x	x	
[50]	x	x		x	x	x		[33]	x	x				x	
[29]	x	x	x	x	x			[51]	x	x	x	x	x		x
[52]	x	x	x				x	[53]	x	x				x	
[24]	x	x	x	x	x			[34]	x	x					
[2]	x	x	x				x	[54]	x						x
[55]	x	x		x	x			[56]		x	x			x	
[23]	x	x					x	[42]	x	x		x	x		
Author	FS	OpVaR	AMA	LDA	MCS	C	EM	Author	FS	OpVaR	AMA	LDA	MCS	C	EM
[57]	x	x						[58]		x	x	x			x
[59]	x	x	x	x			x	[60]	x	x	x		x	x	
[35]	x	x	x	x	x	x		[61]		x		x	x		
[37]	x	x					x	[62]	x	x	x	x			x
[63]	x	x	x	x	x	x		[64]	x	x					x
[32]	x	x	x	x	x	x		[7]	x	x	x	x	x	x	
[25]	x	x	x	x	x		x	[65]	x	x					x
[66]	x				x	x		[67]	x	x	x	x	x	x	
[68]	x	x					x	[3]	x	x	x				
[69]	x	x	x	x	x		x	[70]	x					x	x
[71]	x	x	x	x			x	[72]	x					x	x
[73]	x	x			x	x		[74]	x					x	x
[26]	x	x	x	x	x		x	[75]		x	x				
[76]	x						x	[77]	x					x	x
[78]	x	x		x	x			[79]	x					x	x
[80]	x	x	x	x	x										

*FS: Financial Sector, OpVaR: Total Operational Value at Risk, AMA: Advanced Measurement Approach, LDA: Loss Distribution Approach, MCS: Monte Carlo simulation, C: copula, EM: emerging markets .

3.1. Phase 1: the LDA model

LDA is the most applied and recommended model in BCBS [4], [29], [71], [80]. In the LDA model, losses are grouped into eight business lines (BL) and seven event types or risks (ET), which produces a 56-cell matrix (BL/ET). Table II shows the BL/EL matrix structure, including the detail of BL and ET.

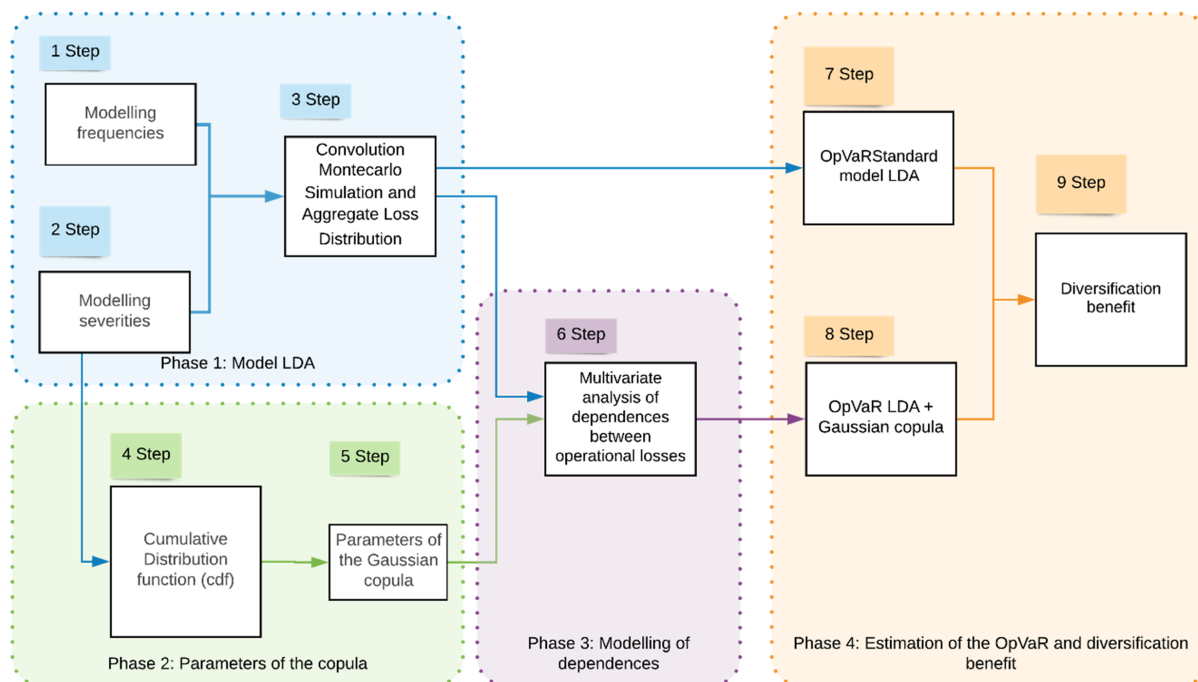


Figure 1. Proposed methodological structure

Table II. (a) Basel risk matrix of business lines (BL) and event types (ET); (b) Basel II business lines (BL) and Basel II event types (ET) — adapted from [4]

(a) BL/ET	ET (1) ET (2) ... ET ... ET (7)	(i)	(b) j Business line, BL(j)	i	Event Type, ET(i)
BL (1)			1 Corporate finance	1	Internal fraud
BL (2)	Annual losses to be predicted over a one-year time horizon		2 Trading and sales	2	External fraud
:			3 Retail banking	3	Employment practices and workplace safety
BL (j)			4 Commercial banking	4	Clients, products, and banking business practices
:			5 Payment and settlement	5	Damage to physical as sets
BL (8)			6 Agency services	6	Business disruption and system failures
			7 Asset management	7	Execution, delivery, and process management
			8 Retail brokerage		

The LDA model comprises three main steps [4]:

1. *Modeling frequencies*: The frequency is a random variable N_j , which represents the number of loss events in a time window (frequently a year) for a BL type j . N_j is usually modeled using discrete distributions such as Poisson or negative binomial [28], [35], [50].

2. *Modeling severities*: Severity is a random variable X_{kj} , which represents the total amount of loss in the k loss event in the $BL j$. X_{kj} is usually modeled using continuous distributions such as exponential, gamma, inverse Gaussian, lognormal, Pareto, generalized Pareto distribution, and Weibull. LDA assumes that X_{kj} are independent of N_j .
3. *Modeling the distribution of total aggregate losses*: The distribution of total aggregate losses $F(L_j)_\square$ is a cumulative density function (CDF) of the random loss L_j in every $BL j$. L_j corresponds to the following expression:

$$L_j = \sum_{k=1}^{N_j} X_{kj} \quad (1)$$

The analytical representation of $F(L_j)$ is difficult to determine. Therefore, it can be obtained by combining frequency and severity distributions via Monte Carlo simulation (MCS), which is widely accepted in the literature [38], [81], [82]. This paper applies MCS to obtain $F(L_j)$. The algorithm to develop a MCS in order to obtain $F(L_j)$ can be found in [45].

Then, a risk measure such as value-at-risk (VaR) is calculated by taking the percentile of L_j at the desired confidence level, for example, $\alpha = 99,9\%$, for a particular business line j . Once the VaRs for each business line are estimated, the total operational risk exposure (OpVaR) is computed as

$$OpVaR = \sum_{j=1}^8 VaR_\alpha(L_j) \quad (2)$$

where α is the confidence level.

Model (2) is the standard approach suggested by the Basel II Accord, which works under the assumption of perfect positive dependence.

3.2. Phase 2: Gaussian copula parameters

Modeling the dependence between distribution functions using *copulas* allows decomposing joint probability distributions in their marginals and then joining them with a *copula* function [83]. To obtain a copula from two or more random variables, the marginal distributions should be extracted following the procedure proposed by [84] (illustrated for a bivariate *copula*). Next, a brief description of this procedure is provided. Taking two probability distributions in a function of two variables $F(x, y)$ with functions of marginal distribution $u = g(x)$, $v = h(y)$, g and h determine the shape of the distribution $F(x, y)$. Isolating the copula function implies vanishing the effect of g and h over the $F(x, y)$. To this end, the inverse functions g^{-1} and h^{-1} are first obtained from $x = g^{-1}(u)$ and $y = h^{-1}(v)$. u and v are the probability for each value on x and y , which means that u and v are distributed in a uniform way between $[0, 1]$. The next step is to obtain $F(x, y) = F(g^{-1}(u), h^{-1}(v))$, which means a copula $C(u, v)$. According to [85], every function F with marginals F_1, \dots, F_r could be written as $F(x_1, \dots, x_r) = C(F_1(x_1), \dots, F_r(x_r))$. Consequently, any copula C could be used to join a set of univariate distribution functions like this: $C(u) = C(u_1, \dots, u_r) = F(F_1^{-1}(u_1), \dots, F_r^{-1}(u_r))$.

Following [7], the r -dimensional Gaussian copula takes the form of

$$C_p^G(u) = \Phi_p^r(\Phi^{-1}(u_1), \dots, \Phi^{-1}(u_r)) \quad (3)$$

where Φ^{-1} is the inverse of a standard Gaussian univariate CDF, and Φ_p is the standardized multivariate Gaussian distribution function with a P correlation matrix. Thus, the parameter that needs to be estimated for the Gaussian copula is P . See [86] and [87] for more information about the properties of the Gaussian copula.

3.3. Phase 3: Modelling LDA using the Gaussian copula

This paper follows [51] to assess the OpVaR when dependence is involved using a Gaussian copula (see the aforementioned reference for details on the algorithm). The algorithm is summarized as follows:

Algorithm 1. LDA using Gaussian copulas

i. Generate a multivariate random uniform vector U with marginals which follows a uniform distribution between $[0, 1]$ for the specific copula C . C has a CDF called F^C , and the severity of the BL type j has a CDF $F(X_j)$. Then U_j is calculated as follows:

$$U_j = F(F(X_j)) \text{ for every } j = 1, \dots, 8$$

ii. Obtain a loss scenario l'_{s_j} for every BL. The l'_{s_j} is obtained from the inverse of U_j with the cumulative distribution function $F(L_j)$ calculated in Eq. (1).

$$F(L_j)^{-1}(U_j) = l'_{s_j} \text{ for every } j = 1, \dots, 8$$

iii. Obtain a scenario for the total loss l'_s , adding all de l'_{s_j} in each j , as follows:

$$I'_s = \sum_{j=1}^8 I'_{s_j}$$

iv. Repeat the three previous steps K times, for example $K = 100,000$.

3.4. OpVaR and diversification benefit calculation

The OpVaR estimation when multivariate dependence is explicitly included (in this case, by implementing a Gaussian copula in the LDA) is calculated as follows:

$$OpVaR_\alpha(L) = VaR_\alpha\left(\sum_{j=1}^8 I'_{s_j}\right) = VaR_\alpha(I'_s) \quad (4)$$

To quantify the diversification benefit, the measure proposed by [88] is adopted here. The diversification benefit is then calculated as the percentage of variation comparing Eqs. (2) and (4), as follows:

$$D_\alpha = \frac{OpVaR_\alpha\left(\sum_{j=1}^8 I'_{s_j}\right) - \sum_{j=1}^8 VaR_\alpha(L_j)}{\sum_{j=1}^8 VaR_\alpha(L_j)} \quad (5)$$

A diversification benefit would imply that high quantiles of the total annual loss distribution would be less than the sum of the corresponding quantiles of the annual loss distribution from each category. In other words, there is a diversification benefit if the VaR of the total loss (Gaussian *copula* model) is smaller than the sum of the individual VaR (LDA standard model).

4. Data

This paper analyzes the SAS® Operational Risk Global Data loss dataset (SAS OpRisk Global Data). The data contains over 29.000 operational losses greater than USD 100.000 over the period between 1900 and 2013 for firms located in emerging markets (Brazil, Chile, China, Colombia, Czech Republic, Egypt, Greece, Hungary, India, Indonesia, Malaysia, Mexico, Pakistan, Peru, the Philippines, Poland, Qatar, Russia, South Africa, South Korea, Taiwan, Thailand, Turkey, and the United Arab Emirates). The data was filtered by selecting the NAICS code 52 (financial sector), and the business lines-event types included in Table II. The filtered data has 1.320 registers with a total loss value of USD 85.000 million. Fig. 2a shows the total frequency and severity by region. The highest total value of losses and the highest number of losses are in Asia. A small quantity of frequencies was reported in Europe, America, and Africa. Fig. 2b illustrates the annual total losses in thousands of million USD as well as the frequency. It is clear that the total number of losses increased in 2009 and then declined. The sharp increase was due to the global financial crisis.

Table III shows the total frequency and total losses by business lines and event types. Table III indicates that most of the risk events come from the intersection of the business line retail banking with the internal and external fraud events (20,23 and 17,35 % of the total risk events). Such behavior indicates that fraud events are the most common operative risk events in emerging markets. It is observed that internal fraud in retail banking has the greatest impact on total losses (USD 27.200 million), followed by clients, products, and business practices in retail banking (USD 21.212 million). Such behavior indicates that the total losses produced by operational risk in emerging markets stem mainly from fraud or failures in business practices.

5. Gaussian *copula* parameters

Table IV shows the parametric distributions and the parameters that best fit the distribution of frequencies and severities, respectively.

As it was explained in section 3, the total aggregated losses per business line are obtained using MCS, where the distribution of frequencies (discrete distributions) and distribution of severities (continuous distribution) are combined. Fig. 3, which shows the total aggregated losses for the business lines payment and settlement, illustrates the typical behavior of the distribution of aggregated operational losses, where high losses have a low probability of occurrence, and small losses have a high probability. The aggregated distribution in Fig. 3 was obtained after 100.000 iterations.

After modeling the distribution of total aggregate losses for each business line, the inputs for the standard LDA model are completed, and the parameters of the Gaussian *copula* are calculated.

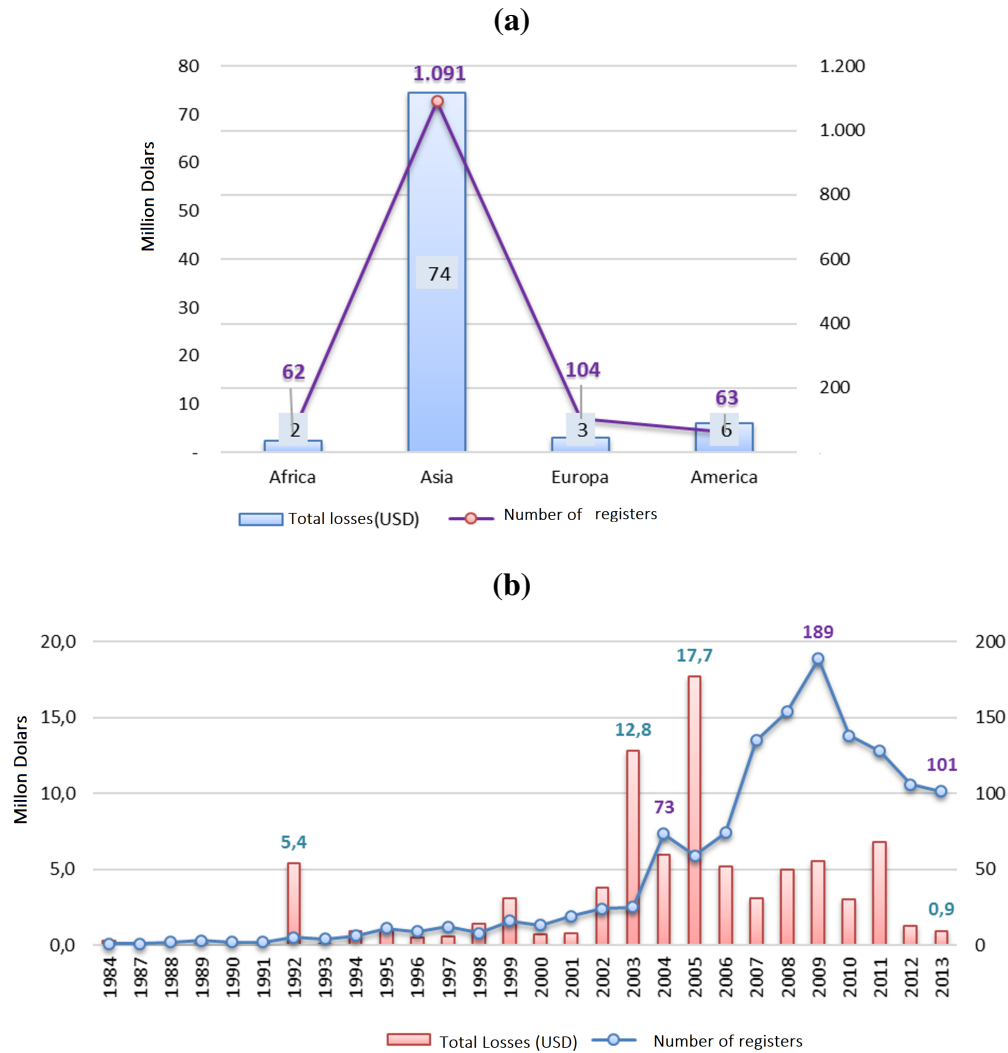


Figure 2. (a) registers by region; (b) annually aggregated number of operational risk events and total losses

Table V shows the parameters for the Gaussian *copula*, the correlation matrix P . Correlation values under 0,3 indicate a low correlation, and values higher than 0,5 indicate a high correlation.

6. Results

Table VI and Fig. 4 show the estimation of the OpVaR using the two discussed models: (i) estimated capital requirements for operational risk using the standard LDA model (BCBS 2004) model; (ii) the multivariate analysis of dependences between operational losses (severities) incorporated into the LDA using the multivariate Gaussian *copula*.

From Table VI and Fig. 4, it is clear that modeling multivariate dependence across business lines reduces the capital requirement that banks should allocate to cover operational risk exposure. Fig. 4 also shows a sharp capital increase between the 99,5 and 99,9 % percentiles for both models. Hence, the OpVaR capital difference between the Gaussian *copula* model and the standard LDA Basel model are more noticeable.

Table III. Matrix of frequency and total losses by business lines and event types (from SAS® OpRisk Global Data)

Business Lines	Internal fraud		External fraud		Employment practices and workplace safety		Clients, products, and business practices		Damage to physical as-sets		Business disruption and system failures		Execution, delivery, and process management		Total	
	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S	F	S
Corporate finance	7	404					9	314							16	718
Trading and sales	8	708	1	0			21	1.027					1	19	31	1.755
Retail Banking	267	15.409	229	1.269	4	272	108	21.212	19	238	1	0	42	38	670	38.439
Commercial banking	203	27.200	124	3.480			72	7.821	7	1.616	2	20	6	2	414	40.139
Payment and settlement	4	369	3	80			34	54			1	0	1	6	43	510
Agency services	3	24	1	11			1	54							5	90
Asset management	8	510	1	5			7	105					1	2	17	621
Retail brokerage	14	774	1	8	1	0	16	279			1	3	1	0	34	1.065
Corporate finance	20	430	11	319			58	1.655			1	125			90	2.528
Total	534	45.828	371	5.173	5	272	326	32.521	26	1.854	6	147	52	68	1.320	85.864

*F: frequency (number of losses), S: severities of total losses (million US dollars).

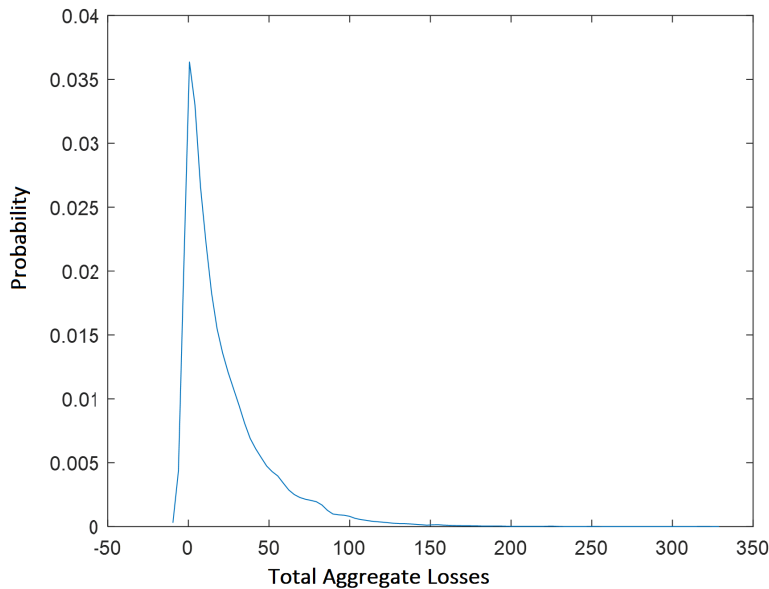


Figure 3. Total aggregate losses distribution, business line payment and settlement

Table IV. Results of the fitting process for event frequencies and severities (from SAS® OpRisk Global Data)

Business lines	Distribution of frequencies				Distribution of severities		
	Discrete distribution	Parameters			Continuous distribution	Parameters	
		Lambda	R	P		Theta	Tau
Corporate finance	Poisson	1,6			Weibull	5,665 39	2,6595 6
Trading and sales	Poisson	2,818 18			Weibull	6,908 89	3,8696 6
Retail Banking	Negative		0,694	0.0243	Gamma	0,620 02	12,406 28
	Binomial		9	9			
Commercial banking	Negative		1,120	0.0542	Weibull	9,797 86	9,4548 8
	Binomial		1				
Payment and settlement	Negative		0,802	0.1438	Weibull	5,254 32	2,6130 7
	Binomial		6				
Agency services	Poisson	1,7			Weibull	5,497 48	3,0361 8
Asset management	Poisson	2,125			Weibull	5,166 63	2,0089 2
Retail brokerage	Negative Bino- mial		1,294 1	0,1675	Weibull	7,192 16	5,0760 9

Table V. Results of the fitting process for event frequencies and severities (from SAS® OpRisk Global Data)

	Corporate finance	Trading and sales	Retail Banking	Commercial Banking	Payment and Settlement	Agency services	Asset management
Corporate finance	0,06	0,49	0,22	0,53	0,42	0,59	0,49
Trading and sales		0,50	0,51	0,24	0,44	0,03	0,60
Retail banking			0,54	0,26	0,39	0,33	0,72
Commercial banking				0,37	0,30	-0,02	0,50
Payment and settlement					0,47	0,51	0,53
Agency services						0,24	0,51
	0 < rho <0,3 %	0,3 < rho <0,5	0,5 < rho <1,0				

Positive correlations represent direct correlation, and negative values indicate inverse correlation.

Table VI. OpVaR – Standard LDA and Gaussian copula (from SAS® OpRisk Global Data)

	90,0 %	95,0 %	99,0 %	99,5 %	99,9 %
Standard LDA-OpVaR	1.199,76	1.577,11	2.478,84	2.854,11	3.706,22
Gaussian copula OpVaR	805,98	1.049,80	1.635,80	1.888,70	2.479,70

**Data expressed in natural logarithm of million US dollars.*

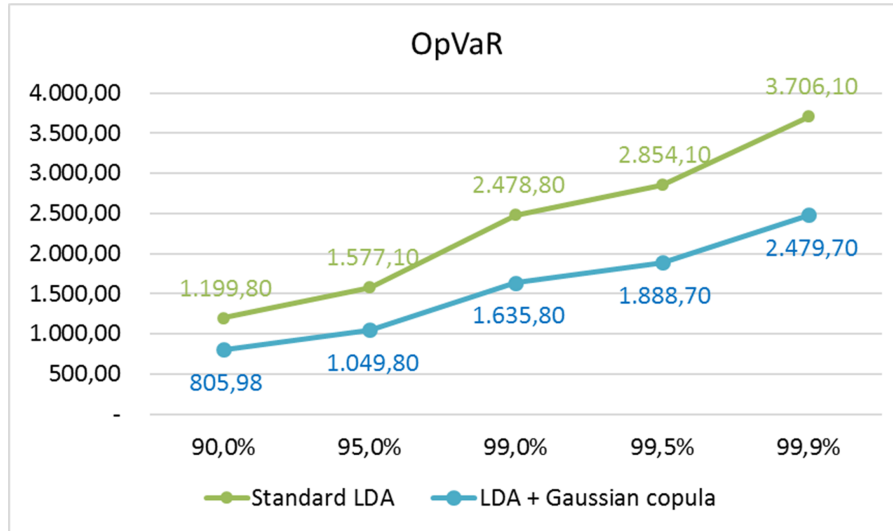


Figure 4. Estimated OpVaR

Finally, Fig. 5 shows the diversification benefit obtained from the application of the Gaussian copula model. Since the values presented in Fig. 5 are negative, the existence of the diversification benefit is corroborated. Therefore, the incorporation of dependency modeling using a Gaussian multivariate *copula* in the LDA standard model provides a significant reduction in capital requirement for operational risk in the financial institutions of emerging markets in comparison with the capital for operational risk estimated under the standard LDA model.

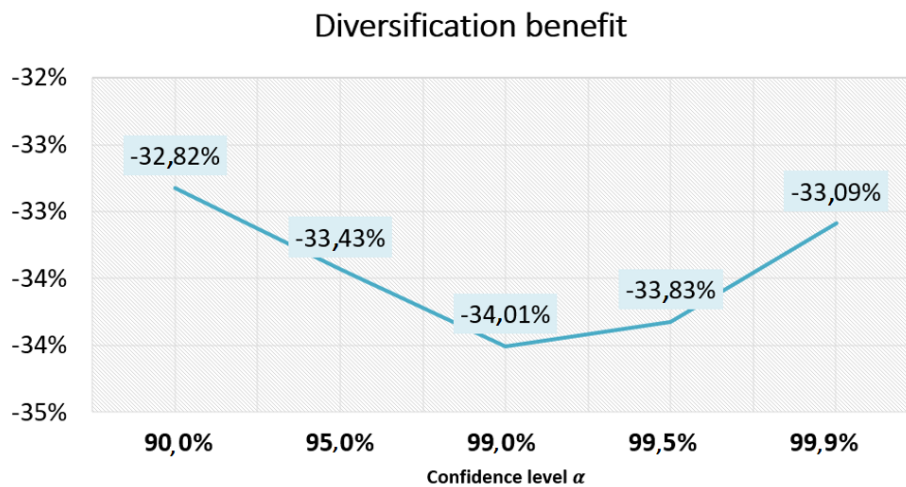


Figure 5. Diversification benefit

7. Conclusions

The main contribution of this paper is the empirical application of the modeling of multivariate dependencies between operational losses (severities) using the multivariate Gaussian *copula* in the estimation of operational risk capital under the Advanced Measurement Approach (AMA) in the financial institutions of emerging markets. This research presents empirical evidence in favor of a more sophisticated technique to estimate capital requirement for operational risk. Thus, tools are provided for decision-making [69] and for the management of operational risk in financial entities from emerging markets.

By incorporating the multivariate modeling of the dependency in the calculation of the OpVaR in financial entities of emerging markets, a reduction in the capital charge for operational risk was obtained (by up to 34 %) in the model that uses the Gaussian *copula*. Therefore, this is an important result in terms of the capital required by the financial institution that adopts this approach.

This paper makes valuable contributions to academia, since the presented results enhance the understanding of modeling operational risk in emerging markets, and researchers can use our results as a benchmark or reference framework. The results of this research are an important contribution not only for the academic community, but also for the financial entities of emerging markets, policy makers, and regulators, as it provides evidence to stride towards compliance with international standards.

References

- [1] A. A. Jobst, "Consistent Quantitative Operational Risk Measurement.," in *Operational Risk Towards Basel III, Best Practices and Issues in Modeling, Management and Regulation*, 1st ed., G. N. Gregoriou, Ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2009. ↑2, 4
- [2] V. Chavez-Demoulin, P. Embrechts, and J. Nešlehová, "Quantitative models for operational risk: Extremes, dependence and aggregation," *J. Bank. Financ.*, vol. 30, no. 10, pp. 2635-2658, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2005.11.008> ↑2, 3
- [3] T. Ivell, T. Jaeggi, and E. Sekeris, "Principal BEYOND AMA PUTTING OPERATIONAL RISK MODELS TO GOOD USE," 2016. ↑2
- [4] Basel Committee on Banking Supervision, *Basel II. International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards. A Revised Framework*. Basel, Switzerland: Bank for International Settlements, 2006. ↑2, 5, 6
- [5] Basel Committee on Banking Supervision, *Basel III: A global regulatory framework for more resilient banks and banking systems*. Basel, Switzerland: Bank for International Settlements, 2011. ↑2
- [6] W. Breymann, A. Dias, and P. Embrechts, "Dependence Structures for Multivariate High-Frequency Data in Finance," *Quant. Financ.*, vol. 3, no. 1, pp. 1-14, Apr. 2003. <https://doi.org/10.1080/713666155> ↑2, 3
- [7] A. J. McNeil, R. Frey, and P. Embrechts, *Quantitative risk management: concepts, techniques and tools*, 1st ed. New Jersey: Princeton University Press, 2015. ↑2, 3, 8
- [8] M. Wright, I. Filatotchev, R. E. Hoskisson, and M. Peng, "Strategic research in emerging markets: challenging the conventional wisdom," *J. Manag. Stud.*, vol. 42, no. 1, pp. 1-33, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2005.00487.x> ↑3
- [9] Y. Zhang, J. Yang, J. Tang, K. Au, and H. Xue, "Prior Experience and Social Class as Moderators of the Planning-Performance Relationship in China's Emerging Economy," *Strateg. Entrep. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 214-229, Sep. 2013. <https://doi.org/10.1002/sej.1155> ↑3
- [10] R. E. Hoskisson, L. Eden, C. M. Lau, and M. Wright, "Strategy in Emerging Economies" *Acad. Manag. J.*, vol. 43, no. 3, pp. 249-267, Jun. 2000. <https://doi.org/10.5465/1556394> ↑3

- [11] G. D. Bruton, I. Filatotchev, S. Si, and M. Wright, "Entrepreneurship and Strategy in Emerging Economies," *Strateg. Entrep. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 169-180, 2013. <https://doi.org/10.1002/sej.1159> ↑3
- [12] MSCI, "Index methodology - MSCI," 2018. [Online]. Available: <https://www.msci.com/index-methodology>. (accessed Mar. 5, 2020). ↑3
- [13] M. Fort, "Nick Leeson 'El principal delito de la banca es su estupidez,'" *La Vanguardia*, p. 1, Feb. 19, 2013. ↑3
- [14] E. Riveroll-Nava, "Lecciones del pasado en administración de riesgos," *Boletín Técnico*, no. 50, 2004. https://www.imef.org.mx/publicaciones/boletinstecnicosorig/BOL_50_04_CTN_AR.PDF ↑3
- [15] Agencias, "El fraude del banco AIB duró cinco años," *El país*, p. 1, Feb., 2002. ↑3
- [16] R. Martínez de Rituerto, "Once aseguradoras demandan a JP Morgan por el 'caso Enron'," *El país*, Feb. 25, 2002. https://elpais.com/diario/2002/02/26/economia/1014678010_850215.html ↑3
- [17] P. Ruiz and G. Huesca, "El BCE intentó evitar la quiebra del Banco Popular con un plan de rescate hasta 2018," *La información*, Oct. 18, 2018. <https://www.lainformacion.com/espana/popular-quiebra-bce-santander/6434988/> ↑3
- [18] H. López, M. Villena, and B. Sifón, "15 años del caso Inverlink: los \$30 mil millones que faltan para recuperar el 'jarrón perdido,'" *Pulso*, Jan. 28, 2018. <https://www.latercera.com/pulso/15-anos-del-caso-inverlink-los-30-mil-millones-faltan-recuperar-jarron-perdido/#:~:text=De%20todos%20modos%2C%20a%20pesar,%C3%ADntegramente%2C%20seg%C3%BAAn%20nuestras%20expectativas%22.> ↑3
- [19] M. Álvarez, "Pérdidas de los bancos latinoamericanos por fraudes informáticos llegan a US\$93 mil millones en 2011", *Pulso*, Aug. 21, 2012. <https://www.latercera.com/pulso/perdidas-de-los-bancos-latinoamericanos-por-fraudes-informaticos-llegan-a-us-93-mil-millones-en-2011/> ↑3
- [20] ANSA Latina, "México, líder mundial en fraudes bancarios," Agencia Italiana de Noticias, Jun. 28, 2019. https://www.ansalatina.com/americalatina/noticia/mexico/2019/06/28/lider-mundial-en-fraudes-financieros_ee6b87a2-7dab-4399-a102-e7fb17500930.html ↑3
- [21] Melvecs, "Banco estatal indio atrapado en fraude de \$ 2 mil millones de dólares," *La verdad nos espera*, Mar. 5, 2018. <https://melvecsblog.wordpress.com/2018/03/05/banco-estatal-indio-atrapado-en-fraude-de-2-mil-millones-de-dolares/> ↑3
- [22] "Registran más de 3,500 casos de fraude en línea en Malasia," *Bernama.com*, Nov. 6, 2019. <https://www.bernama.com/es/otras.php?id=1787073> ↑3
- [23] A. García-Herrero and S. Gavilá, "Posible impacto de Basilea II en los países emergentes," *Documentos Ocasionales*, no. 0606, 2006. <https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesSeriadas/DocumentosOcasionales/06/Fic/do0606.pdf> ↑3, 4
- [24] K. Böcker and C. Klüppelberg, "Operational VaR: a Closed-Form Approximation" [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.178.5006&rep=rep1&type=pdf> ↑3
- [25] L. C. Franco and J. G. Murillo, "Loss distribution approach (LDA): Metodología actuarial aplicada al riesgo operacional," *Rev. Ing. Univ. Medellín*, vol. 7, no. 13, pp. 143-156, 2008. ↑3
- [26] J. Li, J. Feng, and J. Chen. "A piecewise-defined severity distribution-based loss distribution approach to estimate operational risk: evidence from chinese national commercial banks". *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak.*, vol. 08, no. 04, pp. 727-747, Dec. 2009. <https://doi.org/10.1142/S0219622009003727> ↑3, 4
- [27] J. L. King, *Operational risk : measurement and modelling*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2001. ↑3
- [28] M. G. Cruz, *Modeling, measuring and hedging operational risk*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2002. ↑3, 6
- [29] M. Moscadelli, "The Modeling of Operational Risk: Experience with the analysis of the data collected by the Basel Committee," *Bank Italy, Bank. Superv. Dep.*, no. 517, 2004. <https://doi.org/10.2139/ssrn.557214> ↑3, 5
- [30] H. H. Panjer, *Operational Risk*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. ↑3
- [31] A. Frachot, P. Georges, and T. Roncalli, *Loss distribution approach for operational risk*, Rochester, NY, USA: SSRN, 2001. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1032523> ↑3
- [32] A. Chapelle, Y. Crama, G. Hübner, and J.-P. Peters, "Practical methods for measuring and managing operational risk in the financial sector: A clinical study," *J. Bank. Financ.*, vol. 32, no. 6, pp. 1049-1061, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2007.09.017> ↑3

- [33] O. Rachedi and D. Fantazzini, "Multivariate Models for Operational Risk: A Copula Approach Using Extreme Value Theory and Poisson Shock Models," in *Operational Risk toward Basel III: Best Practices and Issues in Modeling, Management, and Regulation*, G. N. Gregoriou, Ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 197-218. <https://doi.org/10.1002/9781118267066.ch10> ↑4
- [34] G. N. Gregoriou, *Operational Risk toward Basel III: Best Practices and Issues in Modeling, Management, and Regulation*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013. ↑4
- [35] R. Giacometti, S. Rachev, A. Chernobai, M. Bertocchi, and G. Consigli, "Heavy-tailed distributional model," *J. Oper. Risk*, vol. 2, no. 1, pp. 55-90, 2007. <https://doi.org/10.21314/JOP.2007.022> ↑4, 6
- [36] S. Inanoglu, H., Ulman, "Revisiting Copula Dependency Modeling: A Case for Conservatism, Federal Deposit Insurance Corporation" 2009. ↑4
- [37] A. Ozun and A. Cifter, "Portfolio Value-at-Risk with Time-Varying Copula: Evidence from Latin America," *J. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 14, pp. 1916-1923, Dec. 2007. <https://doi.org/10.3923/jas.2007.1916.1923> ↑4
- [38] G. I. Torres-Avenidaño and A. M. Olarte-Cadavid, "Valor en riesgo desde un enfoque de cópulas," *AD-MINISTER*, no. 15, 2009. <http://hdl.handle.net/10784/14020> ↑4, 7
- [39] A. Mora-Valencia, "Una recomendación para cuantificar el riesgo operativo en entidades financieras en Colombia," [Online]. Available: https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/eventos/archivos/mora_docum_0.pdf ↑4
- [40] A. Quintero Gil, "modelo para la administración de riesgo operativo en los procesos de la pequeña empresa prestadora de servicios financieros," Escuela de Ingeniería de Antioquia, Ingeniería Administrativa Envigado. 2012. ↑4
- [41] A. Mora-Valencia, "Una comparación de algunos métodos para cuantificar riesgo operativo," Jun. 2010. <https://repository.cesa.e-du.co/bitstream/handle/10726/243/39.Una%20comparacion%20de%20algunos%20metodos.pdf?sequence=6&isAllowed=y> ↑4
- [42] O. I. Nikonov, V. E. Vlasov, and M. A. Medvedeva, "Operational risk economic capital allocation," AIP Conf. Proc., vol. 1558, no. 1, p. 1550, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4825820> ↑4
- [43] P. Jorion, *Value at Risk: The New Benchmark for Managing Financial Risk*, New York, NY, USA: McGraw Hill, 2000. ↑
- [44] C. M. Cumming and B. J. Hirtle, "The Challenges of Risk Management in Diversified Financial Companies," *FRBNY Econ. Policy Rev.*, vol. 7, no. 1, pp. 1-17, 2001. <https://www.newyorkfed.org/medialibrary/media/research/epr/01v07n1/0103cumm.pdf> ↑
- [45] P. Shevchenko and G. Temnov, "Modeling operational risk data reported above a time-varying threshold," *J. Oper. Risk*, vol. 4, no. 2, pp. 19-42, Jun. 2009. <https://doi.org/10.21314/JOP.2009.060> ↑7
- [46] F. Monti, M. Brunner, F. Piacenza, and D. Bazzarello, "Diversification effects in operational risk: A robust approach," *J. Risk Man. Financ. Inst.*, vol. 3, no. 3, pp. 243-258, 2010. <https://hstalks.com/article/2695/diversification-effects-in-operational-risk-a-robu/> ↑
- [47] C. A. Johnson, "VALUE AT RISK: TEORIA Y APLICACIONES," *Estudios de Economía*, vol. 28, no. 2, pp. 217-247, Dec. 2001. <https://econ.uchile.cl/uploads/publicacion/d21e154f-3899-428d-9a68-255c3a876963.pdf> ↑
- [48] S. Peters, "Riesgos y oportunidades de los mercados emergentes: Los casos de India y China," *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, no. 89/90, pp. 127-148, 2010. <https://www.jstor.org/stable/25746491> ↑
- [49] S. Mittnik, S. Paterlini, and T. Yener, "Operational-Risk Dependencies and the Determination of Risk Capital," *J. Oper. Risk*, vol. 8, no. 4, pp. 83-104, 2006. <https://doi.org/10.21314/JOP.2013.133> ↑
- [50] A. Di Clemente and C. Romano, "Measuring and Optimizing Portfolio Credit Risk: A Copula-based Approach*," *Econ. Notes*, vol. 33, no. 3, pp. 325-357, Nov. 2004. <https://doi.org/10.1111/j.0391-5026.2004.00135.x> ↑6
- [51] F. E. Posada-Espinal, "Identificación de una metodología de medición del riesgo operacional utilizando redes bayesianas," Master's Thesis, Fac. de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 2012 [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11227> ↑8
- [52] G. Becerra, A. Guzmán, and M. A. Trujillo, *La importancia de la administración del riesgo operativo en las entidades crediticias*, *Revista Universidad & Empresa*, vol. 8, no. 10. 2006. <https://revistas.urosario.edu.co/index.php/empresa/article/view/937/838> ↑
- [53] E. C. Brechmann and C. Czado, "Risk management with high-dimensional vine copulas: An analysis of the Euro Stoxx 50," *Stat. Risk Mod.*, 2013. <https://doi.org/10.1524/strm.2013.2002> ↑

- [54] M. Flores, “Cuantificación del riesgo operacional mediante modelos de pérdidas agregadas y simulación Monte Carlo,” 2013 [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4647633.pdf> ↑
- [55] P. De Fontnouvelle, V. Dejesus-Rueff, J. S. Jordan, and E. S. Rosengreen, “Capital and Risk : New Evidence on Implications of,” *J. Money. Credit. Bank.*, vol. 38, no. 7, pp. 1819-1846, 2006. <https://doi.org/10.1353/mcb.2006.0088> ↑
- [56] J. F. Martínez-Sánchez and F. Venegas-Martínez, “Riesgo operacional en la banca trasnacional: un enfoque bayesiano,” *Investigación Económica*, vol. 72, no. 286, 2013. [https://doi.org/10.1016/S0185-1667\(13\)72603-1](https://doi.org/10.1016/S0185-1667(13)72603-1) ↑
- [57] H. H. Panjer, *Operational risk: modeling analytics*, Hoboken, NJ, USA: Wiley Interscience, 2006. <https://doi.org/10.1002/0470051310> ↑
- [58] F. M. Páez-Tovar and J. E. Gómez-González, “Estimación del capital necesario para mitigar el riesgo operativo en el mercado asegurador colombiano,” Undergraduate Thesis, Fac. de Economía, Universidad de los Andes, 2013 [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/19733> ↑
- [59] R. Varela and S. Rodríguez, “Impacto de las metodologías propuestas por el Comité de Basilea para el cálculo de los requerimientos de capital por riesgo operativo en el sector bancario colombiano,” Undergraduate Thesis, Dep. de Ing. Industrial, Universidad de los Andes, 2004 [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/21035> ↑
- [60] E. Brechmann, C. Czado, and S. Paterlini, “Flexible dependence modeling of operational risk losses and its impact on total capital requirements,” *J. Bank. Financ.*, vol. 40, pp. 271-285, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2013.11.040> ↑
- [61] A. Chernobai, S. T. Rachev, and F. J. Fabozzi, “Composite goodness-of-fit tests for left-truncated loss samples,” *Handb. Financ. Econom. Stat.*, vol. 1, no. 805, pp. 575-596, 2015. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7750-1_20 ↑
- [62] J. M. Fera-Domínguez, E. Jiménez-Rodríguez, and O. Sholarin, “Tackling the over-dispersion of operational risk: Implications on capital adequacy requirements,” *North Am. J. Econ. Financ.*, vol. 31, pp. 206-221, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2014.11.004> ↑
- [63] P. V. Shevchenko, “Implementing loss distribution approach for operational risk,” *Appl. Stoch. Model. Bus. Ind.*, vol. 23, no. January, pp. 157-164, 2007. ↑
- [64] J.-M. Figuet, T. Humblot, and D. Lahet, “Cross-border banking claims on emerging countries: The Basel III Banking Reforms in a push and pull framework,” *J. Int. Financ. Mark. Institutions Money*, vol. 34, pp. 294-310, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.intfin.2014.11.016> ↑
- [65] S. Mitra, A. Karathanasopoulos, G. Sermpinis, C. Dunis, and J. Hood, “Operational risk: Emerging markets, sectors and measurement,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 241, no. 1, pp. 122-132, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.08.021> ↑
- [66] W. Hu and A. N. Kercheval, “The skewed t distribution for portfolio credit risk,” *Adv. Econom.*, vol. 22, pp. 55-83, 2008. [https://doi.org/10.1016/S0731-9053\(08\)22003-7](https://doi.org/10.1016/S0731-9053(08)22003-7) ↑
- [67] B. J. Garzón-Rozo, J. Crook, and F. Moreira, “Modelling Operational Risk Using Extreme Value Theory and Skew t-Copulas via Bayesian Inference,” 2016 [Online]. Available: <https://publications.waset.org/abstracts/19385/modelling-operational-risk-using-extreme-value-theory-and-skew-t-copulas-via-bayesian-inference> ↑
- [68] L. M. Pinto Gaviria and A. Leyva Lemarie, “Administración del Riesgo Operacional Comité de Basilea sobre Supervisión Bancaria Administración del Riesgo Operacional,” *AD Minist. Univ. EAFIT*, vol. 12, pp. 89-106, 2008. ↑
- [69] D. Bedoya, “Propuesta para el modelamiento del riesgo operativo en una entidad financiera,” Master’s Thesis, Fac. de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 2009 [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70029/71279193.2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y> ↑14
- [70] W. Mensi, S. Hammoudeh, S. J. H. Shahzad, and M. Shahbaz, “Modeling systemic risk and dependence structure between oil and stock markets using a variational mode decomposition-based copula method,” *J. Bank. Financ.*, vol. 75, pp. 258-279, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2016.11.017> ↑
- [71] A. Correa-Vilizzio and G. Klot, “Requerimiento de Capital por Riesgo Operativo. Referencia al caso Uruguayo,” Undergraduate Thesis, Fac. de Ciencias Económicas y de Administración, Universidad de la República (Uruguay),

- 2009 [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/703> ↑5
- [72] W. Mensi, S. Hammoudeh, S. J. H. Shahzad, K. H. Al-Yahyaee, and M. Shahbaz, “Oil and foreign exchange market tail dependence and risk spillovers for MENA, emerging and developed countries: VMD decomposition based copulas,” *Energy Econ.*, vol. 67, pp. 476-495, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.08.036> ↑
- [73] E. Gourier, D. Abbate, and W. Farkas, “Operational risk quantification using extreme value theory and copulas: from theory to practice,” *J. Oper. Risk.*, vol. 3, pp. 1-24, Jul. 2009. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1160167> ↑
- [74] F. A. de Oliveira, S. F. Maia, D. P. de Jesús, and C. da N. Besarria, “Which information matters to market risk spreading in Brazil? Volatility transmission modelling using MGARCH-BEKK, DCC, t-Copulas,” *North Am. J. Econ. Financ.*, vol. 45, pp. 83-100, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2018.02.003> ↑
- [75] “Aligning Operational Risk and Insurance,” Institute of Risk Management, 2018 [Online]. Available: <https://www.theirm.org/news/aligning-operational-risk-and-insurance/> ↑
- [76] C. M. Lopera, M. C. Jaramillo, and L. D. Arcila, “Selection of a Copula Model to Fit Bivariate Dependent Data,” *Revista Dyna(Colombia)*, vol. 76, no. 158, pp. 253-264, 2009. ↑
- [77] Q. Ji, E. Bouri, D. Roubaud, and S. J. H. Shahzad, “Risk spillover between energy and agricultural commodity markets: A dependence-switching CoVaR-copula model,” *Energy Econ.*, vol. 75, pp. 14-27, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.015> ↑
- [78] J. G. Murillo Gómez, “Extreme Value Theory and Operational Risk: An Application to a Financial Institution,” *Rev. Ing. Medellín*, vol. 8, no. 15, suppl. 1, pp. 59-70, 2009. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242009000300007&script=sci_abstract&tlng=en ↑
- [79] X. Li and Y. Wei, “The dependence and risk spillover between crude oil market and China stock market: New evidence from a variational mode decomposition-based copula method,” *Energy Econ.*, vol. 74, pp. 565-581, Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.07.011> ↑
- [80] P. Otero and O. Venerio, “Determinación del requerimiento de capital por riesgo operacional,” *Quantum*, vol. IV, no. 1, 2009. ↑5
- [81] A. Mora Valencia, “Cuantificación del riesgo financieras en Colombia,” *Banrep*, vol. 23, no. 41, pp. 185-211, 2010. ↑7
- [82] P. Penza and V. K. Bansal, *Measuring market risk with value at risk*, Hoboken NJ, USA: John Wiley, 2001. ↑7
- [83] T. Wiecki, “An intuitive, visual guide to copulas,” 2018 [Online]. Available: <https://twiecki.io/blog/2018/05/03/copulas/> ↑7
- [84] L. L. Lloréns, “Teoría de cópulas. Introducción y aplicaciones a Solvencia II,” 2017 [Online]. Available: <https://www.fundacion-mapfre.org/publicaciones/todas/introduccion-teoria-copulas-aplicaciones-a-solvencia-ii/> ↑7
- [85] A. Sklar, “Fonctions de Répartition à n Dimensions et Leurs Marges” *Publications de l’Institut Statistique de l’Université de Paris*, vol. 8, pp. 229-231, 1959 [Online]. Available: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjtlaadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1834923](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtlaadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1834923) ↑7
- [86] R. B. Nelsen, *An Introduction to Copulas*, 1st ed. New York, NY, USA: Springer, 1999. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3076-0_1 ↑8
- [87] U. Cherubini, E. Luciano, and W. Vecchiato, *Copula Methods in Finance*, 1st ed. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd, 2013. ↑8
- [88] P. Embrechts, “Copulas: A personal view,” *J. Risk Insur.*, vol. 76, no. 3, pp. 639-650, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6975.2009.01310.x> ↑8
- [89] Economy Watch, “Emerging Markets | Economy Watch,” 2010. ↑2

Garzón-Rozo Betty Johanna

PhD in Management Science, University of Edinburgh; MSc Industrial Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Research Fellow – Credit Research Centre (CRC) University of Edinburgh.

Email: johanna.garzon@ed.ac.uk

Martín-Bernal Claudia Paola

MSc Industrial Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Specialist in Booking and Control of International Settlements Department at Banco de la República de Colombia.

Email: cmartibe@banrep.gov.co

Rueda-Velasco Feizar

PhD in Engineering, Universidad Nacional de Colombia; MSc Industrial Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Assistant Professor, Department of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Email: fjruedav@udistrital.edu.co

Evaluation of the Accuracy of the Sound Field Separation Method under Variations in the Location of the Sampling Points

Evaluación de la precisión del método de separación de campos sonoros bajo variaciones en la ubicación de los puntos de muestreo

Sebastián López-Mejía^{ID}*¹, Andrés Felipe Piedrahita-Montes^{ID}¹

¹GIMSC, Facultad de Ingenierías, Universidad de San Buenaventura (Medellín, Colombia).
correspondence e-mail: sebastian.lopez@usbmed.edu.co

Received: 15/08/2021. Modified: 15/08/2021. Accepted: 15/09/2021.

Abstract

Context: Measuring the directivity characteristics and the frequency response of acoustic sources is a difficult process, as the dimensions and boundary conditions of the testing rooms used could constrain the measurement procedure. The testing room should guarantee a free-field condition, which is usually satisfied by using big acoustic absorbers with fibrous materials with high absorption coefficients. However, standing wave patterns can be easily developed due to the frequency range exciting the testing room.

Method: The sound field separation method can isolate the radiated field of an acoustic source by sampling the sound field around it over two holographic spheres. The coordinates of the sampling points are used in a set of equations, whose solution can estimate the radiated field. In this paper, the effect of the variability on the actual positions of these sampling points is investigated.

Results: Two numerical simulations with and without external sources outside the holographic spheres were performed. In all simulations, variations in the radial position of the sampling points were induced, and the relative reconstruction error, the directivity index, and the frequency response were studied. The results indicate that, for estimating the directivity of low-frequency acoustic sources, regardless of the presence of external sources, radial positioning of the sensors does not have to be exact to obtain an accurate reconstruction.

Conclusions: This study suggests that, in the experimental characterization in conventional testing rooms of the radiated field from acoustic sources whose main frequency region corresponds to low frequencies, *e.g.* subwoofers, the SFS method could be used, thus obtaining high accuracy in the estimation of the directivity of the source.

Keywords: sound field separation, acoustic radiation, spherical harmonics

Language: English

Open access



Cite as: López-Mejía, S., Piedrahita-Montes, A. F., "Evaluation of the Accuracy of the Sound Field Separation Method under Variations in the Location of the Sampling Points," *Ing*, vol. 27, no. 1, 2022. e18466.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18466>

Resumen

Contexto: La medición de las características de directividad y de respuesta en frecuencia de fuentes acústicas es un procedimiento difícil debido a que las dimensiones y condiciones de frontera del recinto dentro del cual se hace el ensayo podrían limitar el procedimiento de medición. El recinto de ensayo debería garantizar condición de campo libre, lo cual se consigue usualmente con absorbentes acústicos de gran dimensión hechos de materiales fibrosos con altos coeficientes de absorción. Sin embargo, se pueden desarrollar con facilidad patrones de ondas estacionarias debido al rango de frecuencia que hace vibrar el recinto de ensayo.

Método: El método de separación de campos sonoros puede aislar el campo irradiado por una fuente acústica a través del muestreo del campo sonoro alrededor de ella en dos esferas holográficas. Las coordenadas de los puntos de muestreo se usan en un conjunto de ecuaciones cuya solución permite estimar el campo irradiado. En este artículo se investiga el efecto de la variación en las posiciones reales de los puntos de muestreo.

Resultados: Se hicieron dos simulaciones numéricas fuera de las esferas holográficas, una sin fuentes externas y otra con fuentes externas. En todas las simulaciones se indujeron variaciones en las posiciones radiales de los puntos de muestreo y se estimaron el error relativo de reconstrucción, el índice de directividad y la respuesta de frecuencia. Los resultados indican que, para estimar el índice de directividad de fuentes acústicas de bajas frecuencias, independientemente de la presencia de fuentes externas, la posición radial de los sensores no tiene que ser exacta para lograr una estimación precisa.

Conclusiones: Este estudio sugiere que, en la caracterización experimental en recintos convencionales del campo irradiado por fuentes acústicas cuyo rango de frecuencia predominante es el de bajas frecuencias, por ejemplo, *subwoofers*, el método de separación de campos puede ser usado, obteniendo resultados de alta precisión en la estimación de la directividad de la fuente.

Palabras clave: separación de campos sonoros, radiación acústica, armónicos esféricos

Idioma: Inglés

1. Introduction

The experimental characterization of sound fields from acoustic sources radiating in the low frequency range, such as the case of subwoofer speakers, poses a physical limitation since the dimensions of the testing rooms that guarantee free-field conditions, *i.e.*, anechoic chambers, must be larger than a quarter of the wavelength λ of the lowest frequency of interest and there are no testing rooms big enough to satisfy this condition. Additionally, due to the frequency range of the sound field radiated by a subwoofer speaker, standing waves can easily be generated in such rooms, thus infringing the free-field condition by the superposition of the standing waves with the radiated field. The fibrous materials present in the testing room to control reverberation and guarantee free-field conditions should have dimensions comparable to the wavelength of the lowest frequency of interest, thus forcing these elements to be robust and big while making the realization of free-field conditions difficult.

Several methods have been proposed in the past to overcome the difficulties stated above. Some of them try to isolate the reflections from the testing room by applying a time window to the impulse response estimated when the acoustic source is radiating in the room [1], [2]. However, special care should be taken while selecting a testing room big enough, so that the early reflections do not overlap with the direct energy from the source.

The development of the Near-field Acoustic Holography (NAH) technique [3] allowed the possibility to decompose a radiated sound field from a source in terms of plane waves by sampling the acoustic pressure in the near field. By separating the forward and backward propagating fields, the radiated field can be estimated. Other methods such as the Helmholtz equation least-square (HELs) in [4] showed significant accuracy while estimating the directivity of the pressure field radiated by a rectangular plate.

In 1980, [5] formulated and experimentally applied the Sound Field Separation (SFS) method, where, by means of an expansion of the sound field in terms of spherical waves as described in [6], the outward and inward propagating fields can be estimated. With this separation of fields, the radiated field of an acoustic source was estimated in the near field, thus avoiding the guarantee of having free-field conditions and allowing the estimation of the acoustic radiation in normal rooms. [7] compared four different techniques to measure the frequency response and directivity of subwoofer speakers. The evaluated methods were the measurement of a subwoofer in an anechoic chamber, in a pseudo-free field, in a reference chamber, and with the SFS method. By comparing the data obtained from the experimental characterization with each method, the SFS method proved to be the most accurate at estimating the radiated field. Other application areas of the SFS method include the estimation of the scattered sound field from a rigid sphere under the incident propagation of a spherical sound field [8]. In recent years, several methods have been proposed to estimate characteristics of an acoustic signal using a decomposition on spherical harmonics, such as the estimation of the power spectral density [9] and spatial perception of a source [10]. In their research, [10] propose a novel method to measure subwoofers in virtual free-field conditions. Such conditions are achieved precisely by separating the sound fields of several sources into spherical harmonics and then reconstructing the field of the single source in question, which was placed inside a spherical sensor array in [11]. According to the above, field separation allows characterizing acoustic sources in spaces where it is usually not possible due to disturbances in the sound field. Finally, [12] propose an experiment in which they combine near-field acoustic holography with a field separation method, so that it can be determined how convenient it is to use the NAH method with a double layer of sensors in environments characterized by not being in free field. It is concluded that the method works by largely eliminating interference from other sources and reconstructing the field of the source in question. At the same time, they determine that, when performing this experiment with a single layer of sensors, it is not possible to determine the position of the source under analysis, especially at high frequencies; while, using a double layer of sensors, it is possible to reconstruct the sound field [12].

The basic principle in the application of the SFS method is the use of a dual-layer measurement sphere, from now on called 'holographic spheres'. By sampling the acoustic field over these holographic spheres and decomposing the total field in terms of spherical waves, the incoming and outgoing propagating fields can be estimated. However, the exact location of each sampling point (measurement point) must be accurately known in order to reconstruct the outgoing field, as the analytical expansion method estimates the radial magnitude and phase shift in each measured direction. This study aims at evaluating, by means of numerical simulations, the accuracy of the SFS method in the reconstruction of the radiated field from an acoustic source with the presence of variation in the radial location of the sampling points. This, to simulate a real-life application where the sampling points are not placed accurately.

This research paper is organized as follows: the theoretical background (Section 2) of the expansion of a sound field in terms of spherical waves and the mathematical procedure of the SFS method is described in section. The configuration, problem statements, and indexes for evaluation for the numerical simulations are addressed in Section 3. Section 4 presents the results and discussion of the numerical simulations. Finally, in Section 5, the conclusions of the study are presented.

2. Theoretical background

2.1. Sound field representation in spherical coordinates

The acoustic pressure $p(k, r, \theta, \phi)$ of a sound field propagating in a medium can be represented in spherical coordinates as

$$p(k, r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \left[C_{mn} h_n^{(1)}(kr) + D_{mn} h_n^{(2)}(kr) \right] Y_n^m(\theta, \phi) \quad (1)$$

and $h_n^{(2)}$ is the spherical Hankel function of the second kind and order n , which represents the incoming spherical waves. C_{mn} and D_{mn} are coefficients weighting each term of the spherical wave expansion. $k = \omega/c$ is the wavenumber corresponding to the ratio of the angular frequency ω with respect to the propagating speed of sound c . Y_n^m are the spherical harmonics, defined as

$$Y_n^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi(n+m)!}} P_n^m(\cos \theta) \quad (2)$$

with i being the imaginary unit, and $P_n^m(\cos \theta)$ the associated Legendre function.

The spherical wave spectrum $P_{mn}(k, r)$ of the sound field $p(k, r, \theta, \phi)$ at a distance r can be defined as

$$P_{mn}(k, r) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(k, r, \theta, \phi) Y_n^m(\theta, \phi)^* \sin \theta \, d\theta \, d\phi \quad (3)$$

where $(\cdot)^*$ denotes the complex conjugate operator. Eq. (3) can be regarded as the forward Fourier transform with basis function $Y_n^m(\theta, \phi)$, and the corresponding inverse Fourier transform is

$$p(k, r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n P_{mn}(k, r) Y_n^m(\theta, \phi) \quad (4)$$

Fig. 1 shows an acoustic source Π of arbitrary shape radiating a sound field. The radiated sound field can be expressed according to Eq. (1) at two holographic (measurement) spheres of radii r_1 and r_2 , thus obtaining $p(k, r_1, \theta, \phi)$ and $p(k, r_2, \theta, \phi)$, respectively. The spherical wave spectrum $P_{mn}(k, r)$ of the acoustic pressures of each of these holographic spheres can be estimated by means of Eq. (3), thus obtaining $P_{mn}(k, r_1)$ and $P_{mn}(k, r_2)$. These spherical wave spectrums are related to each other by the extrapolation principle of the wavefield as

$$P_{mn}(k, r_2) = \frac{h_n(kr_2)}{h_n(kr_1)} P_{mn}(k, r_1) \quad (5)$$

with $h_n(kr)$ being the spherical Hankel function of the first or second kind.

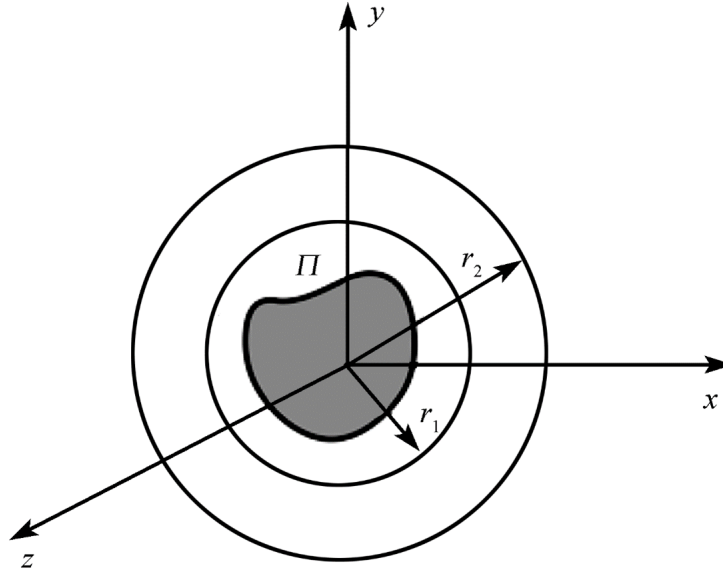


Figure 1. Holographic measurement planes located at radii r_1 and r_2 [8]

2.2. Sound field separation theory

The main objective in the application of the sound field separation (SFS) technique corresponds to the reconstruction of the outgoing wavefield radiated by an acoustic source propagating in a domain with non-free-field boundary conditions. The acoustic pressure $p(k, r, \theta, \phi)$ at a holographic sphere with radius r around the acoustic source Π can be represented according to Eqs. (1) and (4), as

$$P_{mn}(k, r) = A_{mn}h_n^{(1)}(kr) + D_{mn}h_n^{(2)}(kr) \quad (6)$$

thus, representing the superposition of outgoing and incoming spherical waves in the spherical wave spectrum $P_{mn}(k, r)$.

As the radiated sound field from the acoustic source only contains outgoing spherical waves, the spherical wave spectrum of the radiated field $P_{mn}^O(k, r)$ can be defined as

$$P_{mn}^O(k, r) = A_{mn}^O h_n^{(1)}(kr) \quad (7)$$

When two holographic spheres with radii r_1 and r_2 are used, as shown in Fig. 1, the spherical wave spectrums of the radiated field are related following Eqs. (5) and (7), as

$$P_{mn}^O(k, r_2) = \frac{h_n^{(1)}(kr_2)}{h_n^{(1)}(kr_1)} P_{mn}^O(k, r_1) = A_{mn}^O h_n^{(1)}(kr_2) \quad (8)$$

The reflected acoustic field contains outgoing and incoming spherical waves, which can be represented with the spherical wave spectrum:

$$P_{mn}^I(k, r) = A_{mn}^I h_n^{(1)}(kr) + C_{mn}^I h_n^{(2)}(kr) \quad (9)$$

expressed according to Eq. (6). The spherical Hankel function of the first and second kind, $h_n^{(1)}$ and $h_n^{(2)}$, respectively, can be expressed as

$$\begin{aligned} h_n^{(1)}(kr) &= j_n(kr) + i y_n(kr) \\ h_n^{(2)}(kr) &= j_n(kr) - i y_n(kr) \end{aligned} \quad (10)$$

with j_n and y_n being the spherical Bessel functions of the first and second kind, respectively. The substitution of Eq. (10) into (9) yields

$$\begin{aligned} P_{mn}^I(kr) &= A_{mn}^I[j_n(kr) + i y_n(kr)] + C_{mn}^I[j_n(kr) - i y_n(kr)] \\ &= (A_{mn}^I + C_{mn}^I)j_n(kr) + i(A_{mn}^I - C_{mn}^I)y_n(kr) \end{aligned} \quad (11)$$

The functional behavior of the spherical Bessel function of the second kind y_n indicates that, when the radius of the holographic sphere $r = 0$, $y_n(0) \rightarrow -\infty$. However, as the acoustic field at such position must be finite, then $A_{mn}^I = C_{mn}^I$ to satisfy this physical condition.

The spherical wave spectrum of the total acoustic field P_{mn} at the holographic spheres in Fig. 1 becomes

$$\begin{aligned} P_{mn}^T(k, r_1) &= P_{mn}^O(k, r_1) + P_{mn}^I(k, r_1) \\ &= A_{mn}^O h_n^{(1)}(kr_1) + A_{mn}^I h_n^{(1)}(kr_1) + C_{mn}^I h_n^{(2)}(kr_1) \\ &= A_{mn}^T h_n^{(1)}(kr_1) + C_{mn}^I h_n^{(2)}(kr_1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_{mn}^T(k, r_2) &= P_{mn}^O(k, r_2) + P_{mn}^I(k, r_2) \\ &= A_{mn}^O h_n^{(1)}(kr_2) + A_{mn}^I h_n^{(1)}(kr_2) + C_{mn}^I h_n^{(2)}(kr_2) \\ &= A_{mn}^T h_n^{(1)}(kr_2) + C_{mn}^I h_n^{(2)}(kr_2) \end{aligned} \quad (13)$$

by combining Eqs. (7), (8), and (9). The coefficients for the outgoing waves of the total acoustic field are $A_{mn}^T = A_{mn}^O + A_{mn}^I$. Recalling that $A_{mn}^I = C_{mn}^I$ in order to guarantee a finite sound field at $r = 0$, then $A_{mn}^O = A_{mn}^T - C_{mn}^I$. Solving for A_{mn}^T and C_{mn}^I from Eqs. (12) and (13) yields

$$A_{mn}^T = \frac{P_{mn}^T(k, r_2)h_n^{(2)}(kr_1) - P_{mn}^T(k, r_1)h_n^{(2)}(kr_2)}{h_n^{(1)}(kr_2)h_n^{(2)}(kr_1) - h_n^{(2)}(kr_2)h_n^{(1)}(kr_1)} \quad (14)$$

$$C_{mn}^I = \frac{-P_{mn}^T(k, r_2)h_n^{(1)}(kr_1) - P_{mn}^T(k, r_1)h_n^{(1)}(kr_2)}{h_n^{(1)}(kr_2)h_n^{(2)}(kr_1) - h_n^{(2)}(kr_2)h_n^{(1)}(kr_1)} \quad (15)$$

which can be estimated from the spherical wave spectrum of the total acoustic field.

Recalling Eq. (8), if the radiated sound field from the acoustic source were to be estimated at a reconstruction sphere with radius $r = r_0$, the spherical wave spectrum would be

$$P_{mn}^O(k, r_0) = A_{mn}^O h_n^{(1)}(kr_0) = (A_{mn}^T - C_{mn}^I) h_n^{(1)}(kr_0) \quad (16)$$

Finally, the acoustic pressure radiated from the source can be estimated using the inverse Fourier transform in Eq. (4) using the spherical wave spectrum from the radiated field $P_{mn}^O(k, r_0)$ from Eq. (16).

2.3. Singularity of the sound field separation method

A key aspect in the estimation of the acoustic pressure radiated from the source is the calculation of the weighting coefficients A_{mn}^T and C_{mn}^I according to Eqs. (14) and (15), respectively, where both equations have the same denominator. The behavior of the denominator will constrain the stability of the estimation of the radiated field, as there might be values for kr where both Eqs. (14) and (15) might become singular [8].

Recalling Eq. (10), the following relationship between the spherical Hankel functions of the first and second kind can be established:

$$h_n^{(1)}(kr) = [h_n^{(2)}(kr)]^* \quad (17)$$

Therefore, the denominator in Eqs. (14) and (15) can be expressed in terms of (17), thus yielding

$$\begin{aligned} & h_n^{(1)}(kr_2)[h_n^{(1)}(kr_1)]^* - [h_n^{(1)}(kr_2)]^* h_n^{(1)}(kr_1) \\ &= 2i \operatorname{Im} \left\{ h_n^{(1)}(kr_2) \left[h_n^{(1)}(kr_1) \right]^* \right\} \\ &= 2i [j_n(kr_1) y_n(kr_2) - j_n(kr_2) y_n(kr_1)] \\ &= 2i \Delta_n \end{aligned} \quad (18)$$

Therefore, Eq. (18) will exhibit a singular behavior under certain values for the variables k , r_1 and r_2 , which are dependent on the separation distance between the holographic spheres $d = r_2 - r_1$. Fig. 2 shows the functional behavior of Δ_n in Eq. (18), where the zero-crossing points have been marked. It can be observed that, for a separation distance ($d = 0,1 \text{ m}$), the first zero-crossing point occurs at 1.716,6 Hz, whereas, for ($d = 0,2 \text{ m}$), it is located at 860,4 Hz. Then, the first singular point can be shifted to higher frequencies by decreasing the separation distance between the holographic spheres d , thus implying that, when $d \ll \lambda$, where λ is the wavelength of the highest frequency of interest, the frequency range of the reconstruction can be extended.

2.4. Sound field separation with finite sampling points

The representation of the acoustic pressure radiated by the source according to the inverse Fourier transform in Eq. (4) indicates that it is necessary to consider an infinite number of terms in order to properly represent the acoustic field $p(k, r, \theta, \phi)$ in terms of the spherical wave spectrum $P_{mn}(k, r)$ and the spherical harmonics $Y_n^m(\theta, \phi)$. On the other hand, Eq. (3) can be regarded as the representation of the acoustic pressure over a continuous holographic sphere.

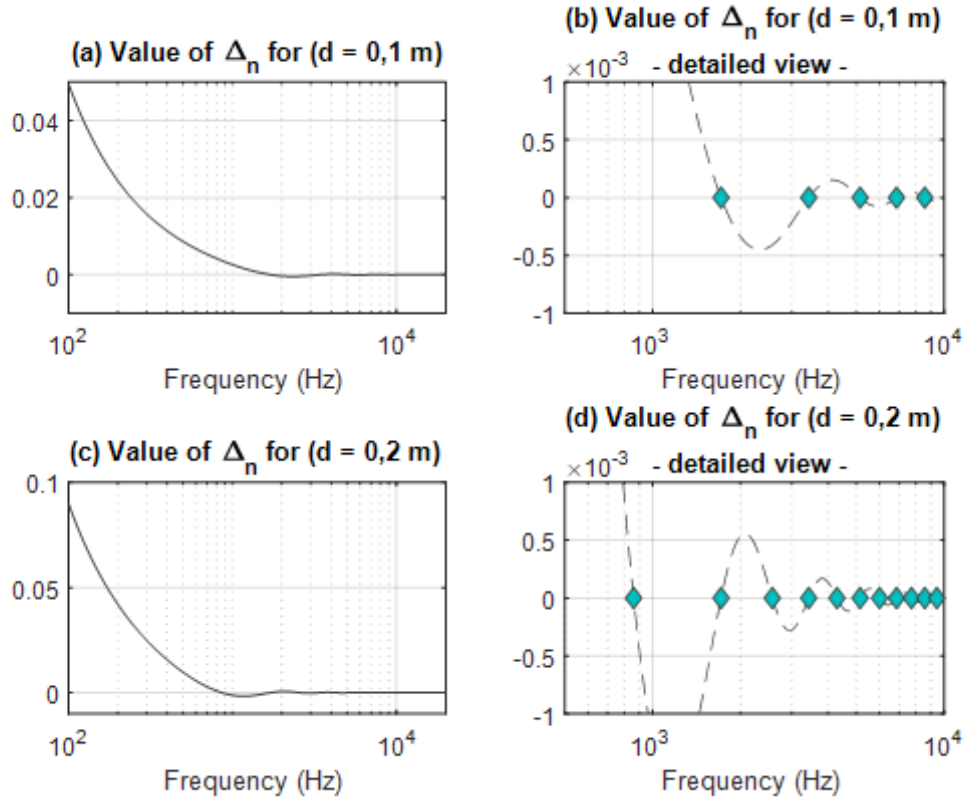


Figure 2. Singular behavior of the denominator in Eqs. (14) and (15) for a separation distance between the holographic spheres as ($d = 0,1 \text{ cm}$) (top) and ($d = 0,2 \text{ m}$) (bottom). Zero-crossing points marked with (\diamond) in (b) and (d).

In practice, the two holographic spheres with radii r_1 and r_2 would be discretized with M sampling points, so that each point over the sphere would be located at $(\eta_l, \theta_l, \phi_l)$ with $l = 1, 2, \dots, M$. The order η of the expansion in Eq. (4) would be truncated to an order N , so it would be expressed as

$$p(k, r_l, \theta_l, \phi_l) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n P_{mn}(k, r_l) Y_n^m(\theta_l, \phi_l) \quad (19)$$

representing a finite set of linear equations, of which $P_{mn}(k, r_l)$ are unknowns that should be determined. A least-squares solution for this set of linear equations can be applied to solve for the spherical wave spectrums $P_{mn}(k, r_l)$. However, in order to guarantee the existence of a least-squares solution, the system must be overdetermined, thus implying that the number of sampling points M must be equal to or greater than the number of unknowns. Recalling that, for each spherical wave spectrum $P_{mn}(k, r)$, a pair of A_{mn} and C_{mn} coefficients could be needed. The total amount of unknowns to be determined equals $2(N+1)^2$, so that the least-squares solution can be estimated if $M \geq 2(N+1)^2$. Eq. (19) can be written in matrix form:

$$\mathbf{p} = \mathbf{Y} \mathbf{p}_{mn} \quad (20)$$

from which the least-squares solution for the vector \mathbf{p}_{mn} is given by

$$\mathbf{p}_{mn} = \mathbf{Y}^+ \mathbf{p} \quad (21)$$

where $(\cdot)^+$ indicates the Moore-Penrose pseudo-inverse.

3. Numerical simulation

This section describes the configuration given to different parameters involved in the SFS method. The objective of the study was to evaluate the accuracy of the reconstruction of the radiated field by an acoustic source, located at the center of two holographic spheres, under the presence of variations in the location of the sampling points around said spheres, while assuming that the actual location of each sampling point was the same as the one used in the reconstruction of the field. The intention was to simulate a real-life application, where the distances r_l of each sampling point used in the reconstruction procedure described in Section 2.2 are different to the real positions used during the measurement. To this effect, two numerical simulations were performed in MATLAB. The first simulation consisted of the reconstruction of a radiated field under free-field conditions without the presence of any other source. The second simulation aimed at reconstructing the same radiated field while other acoustic sources were located outside the farthest holographic sphere. This, to simulate the presence of external sources that would contaminate the sampled acoustic field by propagating incoming spherical waves into the holographic spheres. For each simulation, the same amounts of variation on the distances r_l of the measurement points were induced. The problem statements and configurations for each numerical simulation are presented in Section 3.1, and the indexes for the evaluation in Section 3.2.

3.1. Stating the problem

Simulation without external sources

The first simulation consisted of the reconstruction of the sound field radiated by an acoustic source located at the center of two holographic spheres. A monopole source was located at the origin of the coordinate system. The acoustic radiation from the monopole source was set in such a way that a sound pressure level of 94 dB would be obtained 1 m away from the source for all the frequencies under free-field conditions, *i.e.*, the spectrum from the radiated field would be flat in all frequencies. As the radiated field is symmetrical in all directions, the estimation can be studied only in the horizontal orbit by setting the elevation of all the sampling as $\theta_l = 0$. A first set of sampling points was distributed over a holographic sphere, whose center was located at the same position of the monopole source. The radius of this sphere was set to $r_1 = 1$ m, so the distances of all the sampling points over this sphere would be at 1 m. A second set of sampling points was located at a second holographic sphere with a radius $r_2 = 1,2$ m, so the two holographic spheres were separated with a distance $d = r_2 - r_1 = 0,2$ m.

The angular separation between the sampling points over each holographic sphere was determined to replicate a conventional measurement procedure, where an angular resolution of $\Delta\theta = 5^\circ$ is commonly used. In this way, there were 71 sampling points, so the order of the spherical wave expansion in Eq. (19) would be $N = 5$.

Simulation with external sources

The configuration in terms of the location of the radiating source and the sampling points for the second simulation was the same as the one described in the previous section. In this case, the only

difference corresponded to the addition of eight monopole sources located as shown in Fig. 3. The location of these additional monopole sources was set outside the holographic sphere, whose radius was $r_2 = 1,2 \text{ m}$.

The goal with this distribution of the sources was to simulate the presence of external sources that would contaminate the radiated acoustic field to later evaluate the performance of the SFS method. The radiation from each of the eight external sources was set in such a way that a sound pressure level of 88 dB would be measured 1 m away from each source. To avoid having correlated external sources, random noise with a standard deviation of 1,0 dB was added to the acoustic pressure of each external source.

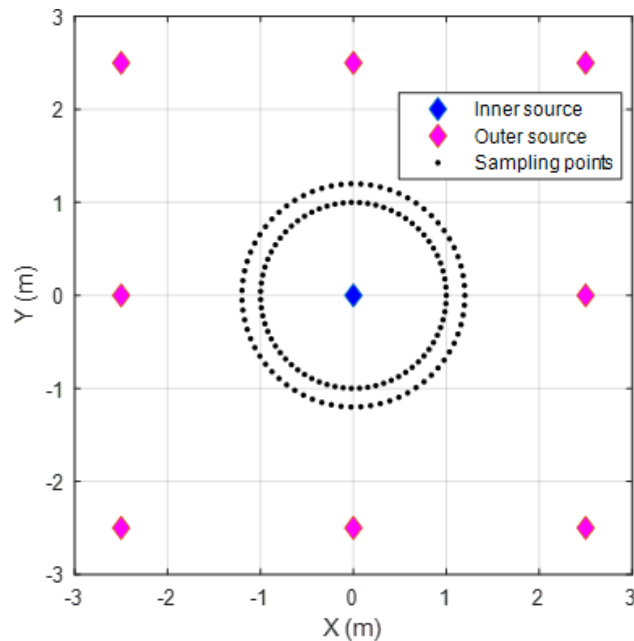


Figure 3. Distribution of internal and external sources and sampling points in the second numerical simulation

Variation of the sampling points' location

To simulate a real-life application where there could be variability in the location of the sampling points during the measurement procedure with respect to the assumed locations used during the SFS method, a random variation in the distances of each sampling point r_l was induced. For each of the above-mentioned simulation, the distances r_l of each set of sampling points were varied with a normal distribution, whose mean corresponds to the radius of each holographic sphere. Four different standard deviation values were considered: ($\sigma_r = 0,0 \text{ m}, 0,005 \text{ m}, 0,02 \text{ m}, 0,05 \text{ m}$).

3.2. Indices for evaluation

The evaluation of the performance of the SFS method under the influence of the position variability of the sampling points was conducted by estimating the relative error and comparing the normalized frequency response and directivity index for each standard deviation on both simulations.

Relative error

The error norm used for the evaluation of the performance of the SFS method is the total mean square difference between the theoretical radiated field at each sampling point $p_l(k, r_l, \theta_l, \phi_l)$ and the reconstructed values $\tilde{p}_l(k, r_l, \theta_l, \phi_l)$, defined as

$$\%E(\omega) = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^M |p_l(k, r_l, \theta_l, \phi_l) - \tilde{p}_l(k, r_l, \theta_l, \phi_l)|^2}{\sum_{l=1}^M |p_l(k, r_l, \theta_l, \phi_l)|^2}} * 100 \% \quad (22)$$

Normalized frequency response

The frequency response function of the reconstructed field at the axial direction $\tilde{p}_l(k, r_1, 0, 0)$ was normalized with respect to the acoustic pressure radiated by the inner source at 1 kHz, $p_{1kHz}(r_1, 0, 0)$ as follows:

$$H(\omega) = 20 \log_{10} \left[\frac{\tilde{p}_l(k, r_1, 0, 0)}{p_{1kHz}(r_1, 0, 0)} \right] \quad (23)$$

Directivity index

Due to the importance of accurately reconstructing the directive characteristics of the radiated field, the directivity index was defined as

$$DI(\omega) = 10 \log_{10} \left[\frac{|p(k, r_1, 0, 0)|^2}{\sum_{l=1}^{M-1} \frac{|p(k, r_1, \theta_l, \phi_l)|^2}{M}} \right] \quad (24)$$

where $p(k, r_1, 0, 0)$ represents the acoustic pressure of the sampled field in the axial direction, and $p(k, r_1, \theta_l, \phi_l)$ is the acoustic pressure at every other position l .

4. Results and discussion

This section shows the results obtained for the two configurations of the proposed numerical simulations in Section 3. After performing the simulations, several analyses were carried out to understand the different variations in the accuracy of the SFS method. The results for the four standard deviations were overlapped, so that the variations in their behavior could be easily analyzed. First, the relative errors of the reconstruction of the radiated fields for each configuration and standard deviation σ_r are presented in Section 4.1. Next, the accuracy in the reconstruction of the directive characteristics of the radiated field are addressed in Section 4.2 by estimating the directivity indexes. Finally, Section 4.3 presents the evaluation of the normalized frequency responses reconstructed in the axial direction for each simulation.

4.1. Evaluation of the relative error

Fig. 4 shows the estimation of the relative error according to Eq. (22). Figs. 4a and b correspond to the estimated error when the radiated sound field is reconstructed without the presence of any

external source, as described in Section 3.1. Figs. 4c and d correspond to the estimation of the relative error in the construction of the radiated field under the presence of external sources. The left figures represent the reconstruction with a separation $d = 0,1 m$, and right figures $d = 0,2 m$. For all possible configurations, the relative error of the reconstruction exhibits a discontinuous behavior beyond certain frequency. For the case where the separation distance corresponds to $d = 0,1 m$, this behavior occurs from approximately 1,7 kHz, whereas, for the separation distance of $d = 0,2 m$, this cutoff frequency is shifted to a lower range of approximately 860 Hz, which is consistent with the singular behavior described in Section 2.3.

For larger standard deviations, the amount of relative error generally increases at higher frequencies. However, at low frequencies, there is no significant difference between the theoretical value

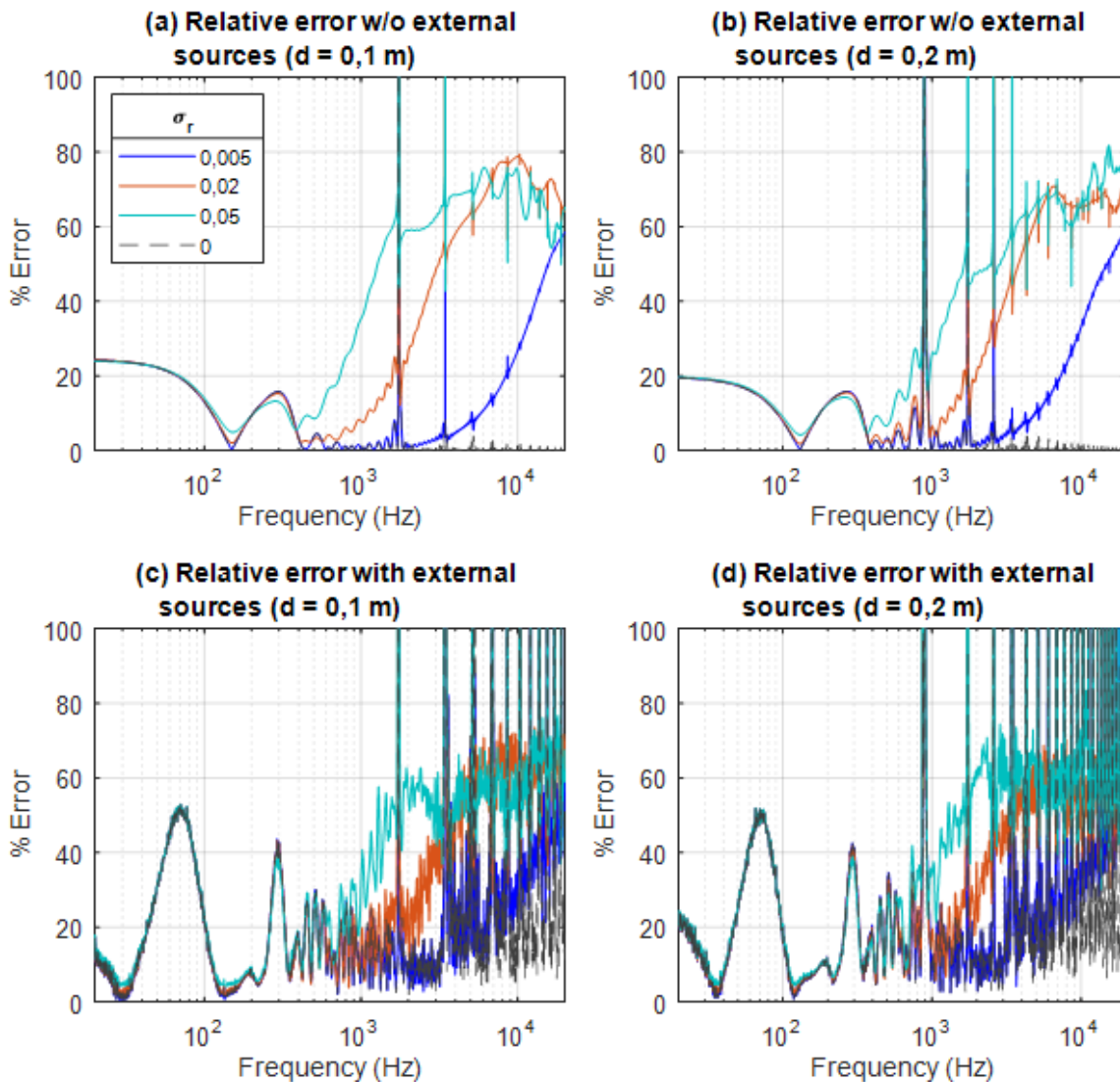


Figure 4. Relative error for the different configurations of the numerical simulations. Reconstruction without external sources in (a) and (b), and with external sources radiating in (c) and (d). Separation distance d between the holographic spheres: $d = 0,1 m$ in (a) and (c), and $d = 0,2 m$ in (b) and (d).

and the standard deviations in the different configurations. In Fig. 4b, an acceptable relative error rate of up to 860 Hz with a maximum of 20 % can be seen. In addition, a minimum relative error can be noticed around 130 Hz. Also, a singular behavior starting at 860 Hz is evidenced, where the amplitude tends to increase, and a discontinuous behavior begins.

In Figs. 4c and d, when the external sources are contributing to the pressure field, a ripple appears, and the relative error is significantly increased at low frequencies such as 71,6 Hz and 300 Hz. The trend of standard deviations remains the same, meaning that, while the standard deviation increases, the amount of relative error also increases at higher frequencies. It can also be noticed in Fig. 4d that there is an increase in the relative error of the region above the singular points that first appeared in Fig. 4b, which can be attributed to presence of the external sources influencing the reconstruction accuracy of the SFS method. Additionally, the instability of the approximated solution is determined by the singular behavior described in Section 2.3, which can also be worsened by the least-squares method, recalling that the reconstruction procedure needs to estimate the pseudo-inverse of the matrix Y , as described in Section 2.4. The first peak appears at 71,6 Hz with a relative error of 51 %, more than twice the error observed at the same frequency in the simulation without any external sources. Finally, in Figs. 4a and c, the cutoff frequency from which the singular behavior appears is shifted to a higher frequency with respect to 4b and d, as anticipated in Section 2.3. However, these changes do not seem to affect the trend of the relative error in each standard deviation. The amplitudes of the relative error increased slightly for low frequencies, while they decreased at mid-high frequencies.

4.2. Evaluation of directivity indexes

In Figs. 5a and b, the directivity index shows consistent values on lower frequencies for each standard deviation, which means that, regardless of the deviations induced in the radial location of the sampling points, the directivity of the source can be properly reconstructed up to a certain frequency. Again, for a separation distance $d = 0,2 m$ the directivity index presents large variations starting at 900 Hz, whereas decreasing this distance by half ($d = 0,1 m$) shows a shift in these variations, which agrees with the relative error described in Section 4.1. It should be noted that the variations are larger, as the standard deviation is also larger. With the presence of external sources, in Figs. 5c and d, the directivity index has the same ripple seen in Fig. 4. For the separation distance $d = 0,2 m$, between 200 Hz and 300 Hz, the directivity index starts to deviate from the theoretical value of 0 dB, and, beyond these frequencies, the SFS method fails at reconstructing the directivity of the radiated field. It is important to note that, regardless the value of the standard deviation, the result is the same up to 860 Hz, which suggests that these amounts of standard deviations do not affect accuracy while reconstructing the directivity index.

4.3. Evaluation of the normalized frequency responses

Finally, Fig. 6 shows the normalized frequency response of the reconstructed field for the different configurations. Here, the frequencies where the singular behavior appears match those in Fig. 4. As expected, when $d = 0,2 m$, the first peak appears at 860 Hz, and, for $d = 0,1 m$, the peak is shifted to a higher frequency. At low frequencies, the frequency response is almost the same for each standard deviation matching the behavior described in Section 4.1, Fig. 4.

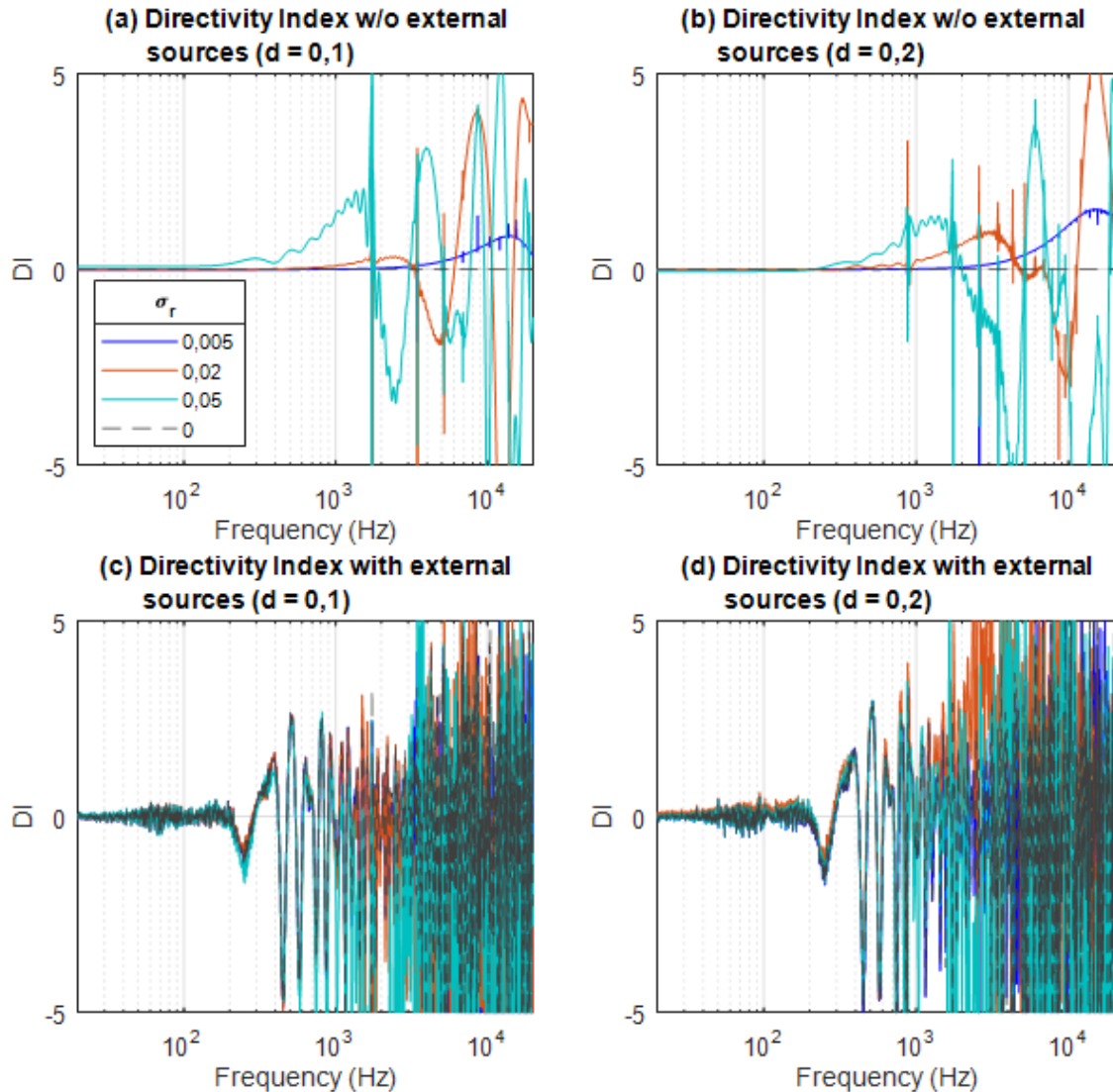


Figure 5. Estimation of the directivity index for the different configurations of the numerical simulations. Reconstruction without external sources in (a) and (b), and with external sources radiating in (c) and (d). Separation distance d between the holographic spheres: $d = 0,1 m$ in (a) and (c), and $d = 0,2 m$ in (b) and (d). The location of the external sources is shown in Fig. 3.

In Fig. 6c, where $d = 0,1 m$, there is a slight difference between the magnitude of the frequency responses for each standard deviation in the low frequencies. This is to say, lower distances between the holographic spheres could mean an increase in the contribution of the standard deviations to the normalized frequency response, as these standard deviations σ_r become comparable with the separation distance between the holographic spheres, d . This suggests that the separation distance between the holographic spheres should be selected with care if the intention is to reconstruct the radiated field in the low frequency region.

As this study is focused on low frequencies, it is necessary to evaluate some critical points. Fig. 4b shows that, at 71,6 Hz, there is a relative error of 14,3 %, which is increased when the external sources contribute to the pressure field, as can be seen in Fig. 4d. However, this amount of error

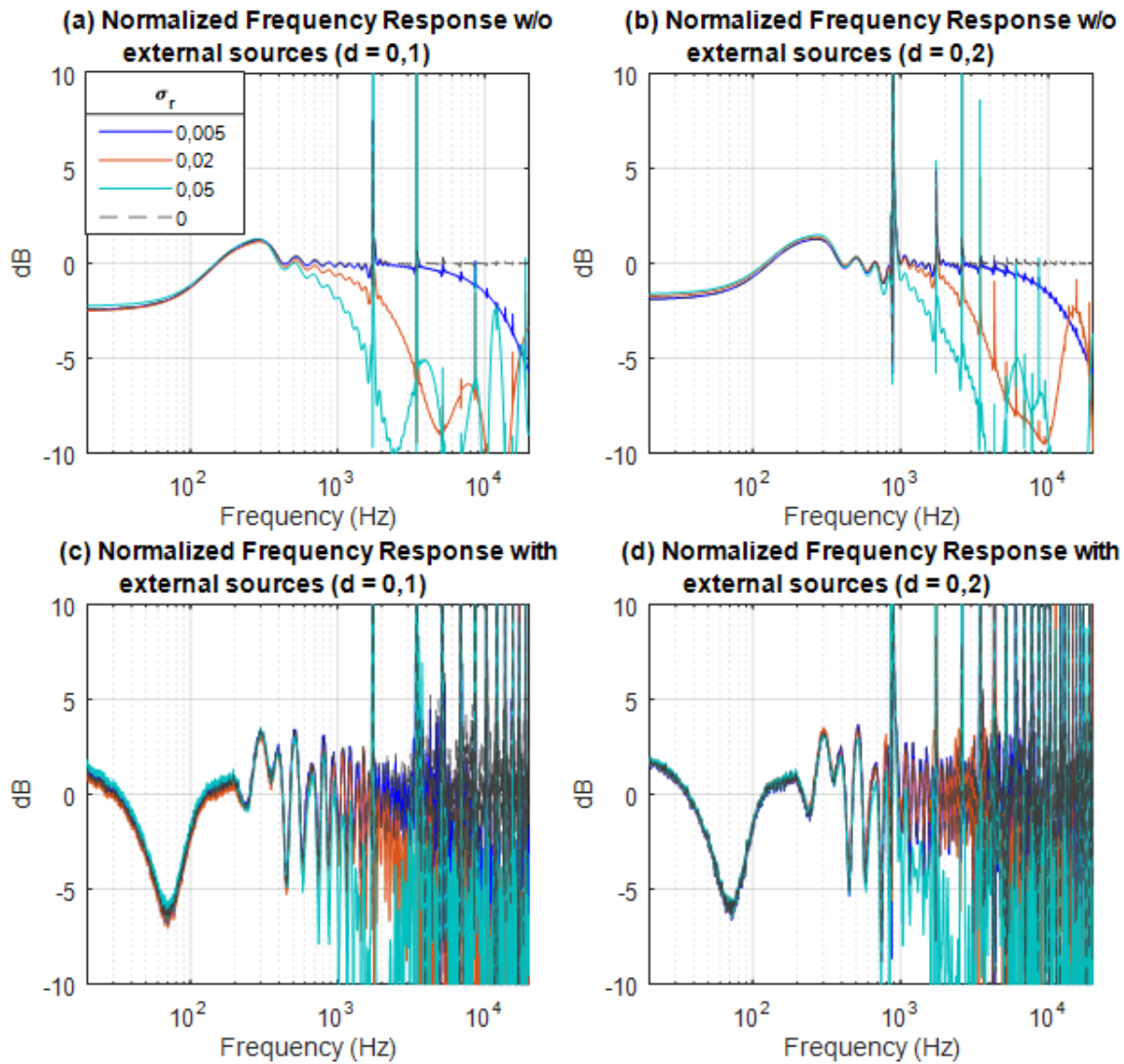


Figure 6. Normalized frequency response estimated in the axial direction for the different configurations of the numerical simulations. Reconstruction without external sources in (a) and (b), and with external sources radiating in (c) and (d). For separation distance d between the holographic spheres of $d = 0,1$ m in (a) and (c), and $d = 0,2$ m in (b) and (d). The location of the external sources is shown in Fig. 3.

may be due to variations in the directivity index or the frequency response. Fig. 6d shows that the relative error is due to the frequency response reconstruction. In addition, the frequency with the lower error before the singular behavior appears corresponds to 135,2 Hz. Figs. 5 and 6 validate that the frequency response and the directivity index are properly calculated at 135,2 Hz, regardless of the distance between the holographic spheres or the presence of any external sources. Fig. 6 shows the low accuracy of the SFS method in reconstructing the frequency response, especially at 71,6 Hz. As stated above, this is an important point to analyze, so Fig. 7 shows the polar pattern for this frequency.

The SFS method at 71,6 Hz appears to properly reconstruct the omnidirectional behavior of the source, albeit with an amplitude mismatch, as shown in Fig. 7. Moreover, the polar pattern at 71,6

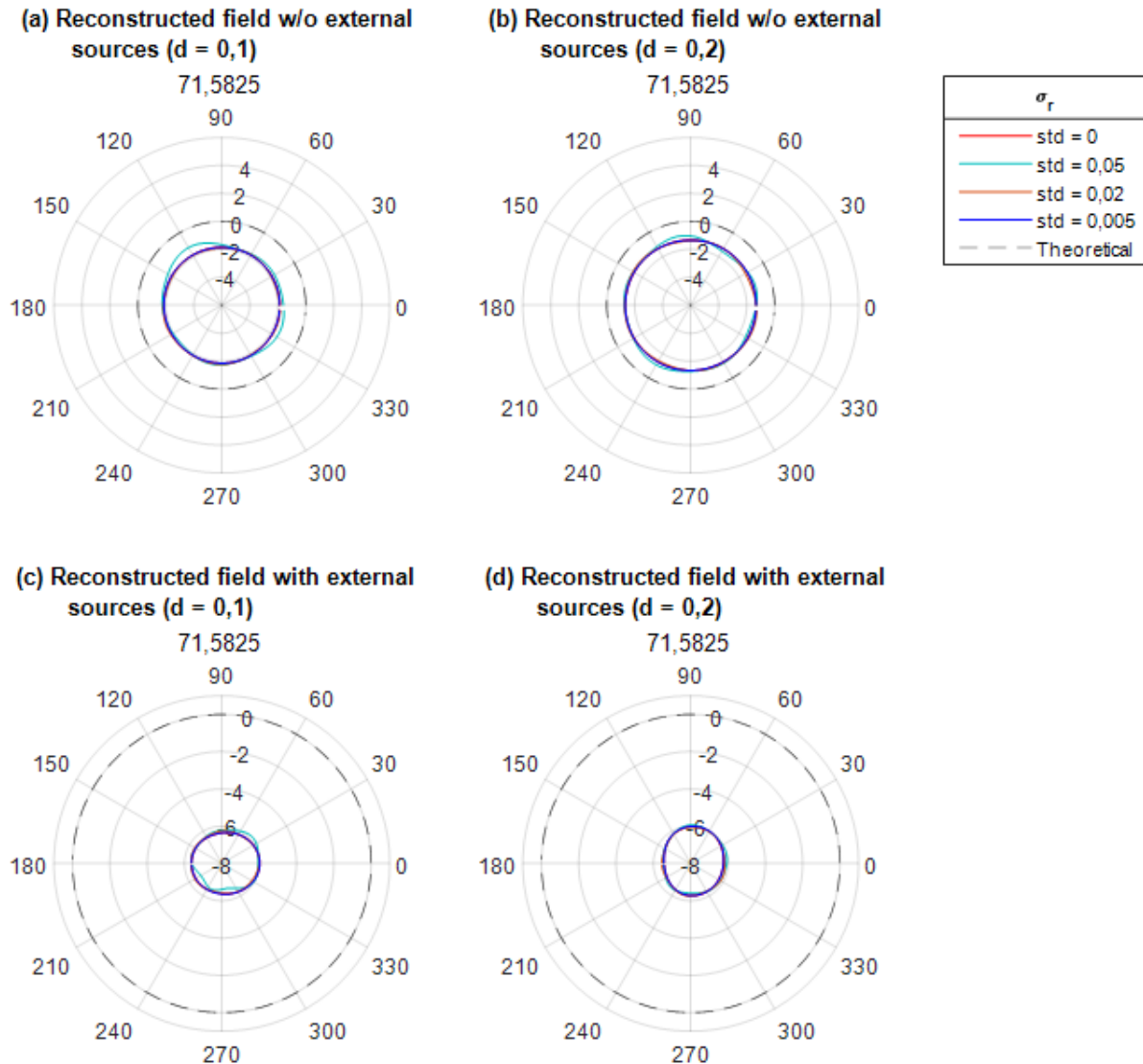


Figure 7. Normalized polar plot estimated at 71,6 Hz for the different configurations of the numerical simulations. Reconstruction without external sources in (a) and (b), and with external sources radiating in (c) and (d). Separation distance d between the holographic spheres: $d = 0,1$ m in (a) and (c), and $d = 0,2$ m in (b) and (d). The location of the external sources is shown in Fig. 3.

Hz shows inconsistencies of 2 dB in the magnitude reconstruction for each configuration. Again, despite the presence of external sources and the variation of the distance between the holographic spheres, the SFS method cannot properly reconstruct the frequency response of the source.

Finally, Fig. 8 shows the polar pattern for 135,2 Hz, where the directivity index and the frequency response appear to be properly reconstructed, which can be validated in Fig. 4, with a low amount of relative error. An important fact to keep in mind is that magnitude differences between the theoretical and the reconstructed sound fields imply a large relative error. On the other hand, differences in the directivity index do not considerably affect the relative error of the field reconstruction, as can be seen in Figs. 4d, 5d, and 6d for 300 Hz.

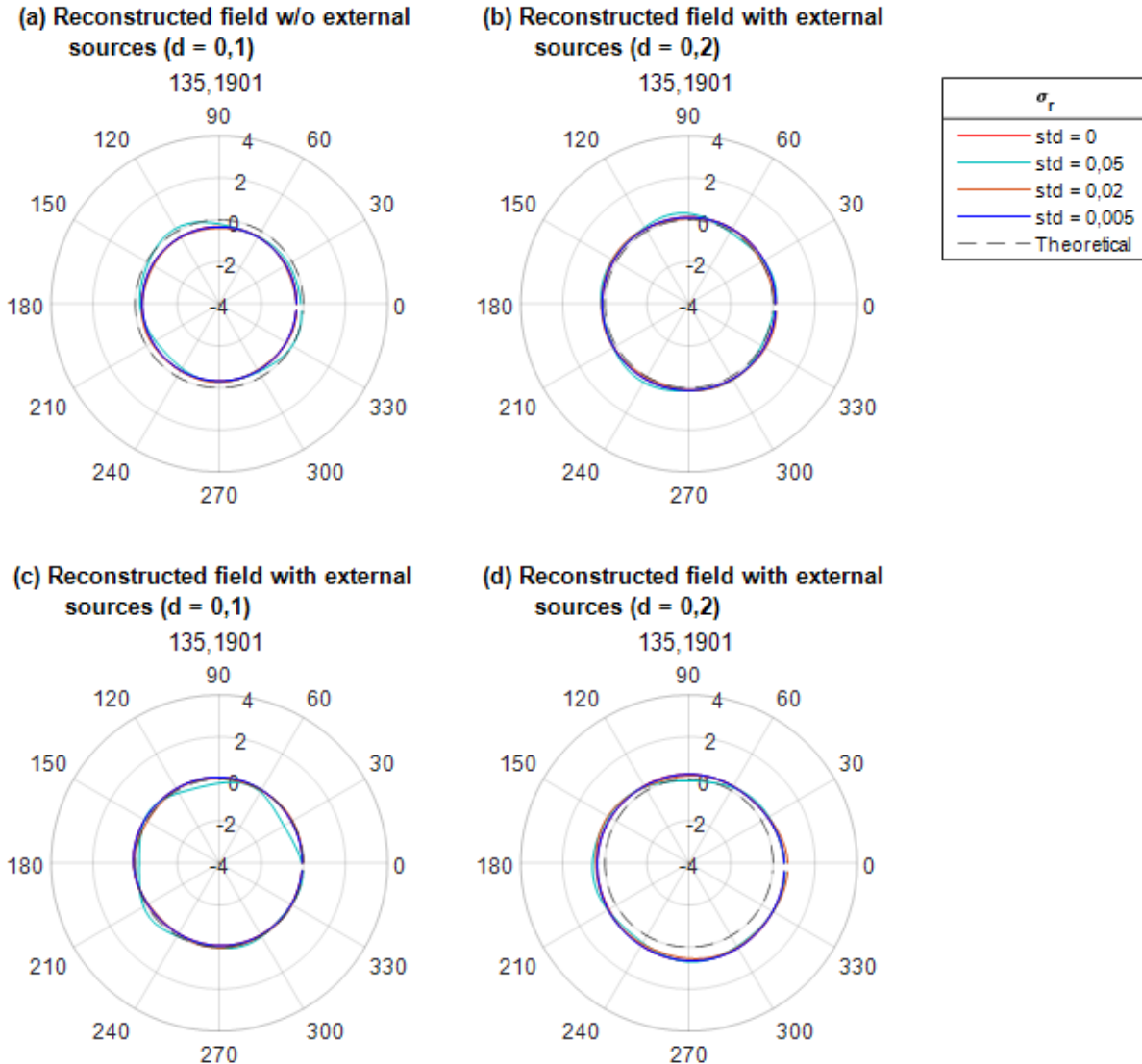


Figure 8. Normalized polar plot estimated at 135,2 Hz for the different configurations of the numerical simulations. Reconstruction without external sources in (a) and (b), and with external sources radiating in (c) and (d). Separation distance d between the holographic spheres: $d=0,1$ m in (a) and (c), and $d=0,2$ m in (b) and (d). The location of the external sources is shown in Fig. 3.

5. Conclusions

In this research paper, we evaluated the accuracy of the reconstruction of the sound field separation (SFS) method under the presence of variations in the location of the sampling points around two holographic spheres, while assuming that the actual location of each sampling point was the same as the one used in the reconstruction of the field. The aim was to investigate a possible real-life application where the distances r_l of each sampling point used in the reconstruction were different to the real positions used during the measurement of the radiated field from an acoustic source. Special attention was given to the evaluation in the low frequency region, thus recognizing, as described in Section 1, that the experimental characterization of the radiated field from low-frequency sound sources poses difficulties related to acoustic constraints in conventional testing rooms.

Two different configurations were investigated by means of numerical simulations. In the first case, the sound field radiating from a monopole source under free-field conditions was reconstructed; while, in the second case, the sound field from the same monopole source was reconstructed, but with the presence of external sources that would contaminate the sampled acoustic field and increase the difficulty of the reconstruction process. In all configurations, a variability in the actual position of the sampling points was induced with four different standard deviations ($\sigma_r = 0, 0 \text{ m}, 0, 005 \text{ m}, 0, 02 \text{ m}, 0, 05 \text{ m}$).

The results showed that, in the low frequency region, the SFS method accurately reconstructed the omnidirectional directivity of the monopole source, regardless of the presence of external sources, the standard deviation σ_r induced in the actual position of the sampling points and the evaluated separation distance d between the two holographic spheres. However, the results showed discrepancies for the low frequency region in the estimation of the frequency response observed in the axial direction of the source, meaning that the SFS method does not accurately reconstruct the magnitude of the acoustic pressure of the reconstructed field. It was also observed that, under the presence of external sources, the frequency response in the axial direction of the reconstructed field was influenced by the amount of standard deviation σ_r induced in the sampling points. This frequency response was also affected by the separation distance d between the holographic spheres, as a lower separation distance exhibited a higher dependency on the amount of standard deviation σ_r , thus suggesting that care must be taken when selecting the appropriate separation distance. Nevertheless, the directivity index for every studied case was appropriately estimated in the low frequency region.

The outcomes of this study suggest that, in the experimental characterization of conventional testing rooms regarding the radiated field from acoustic sources whose main frequency region corresponds to low frequencies (*e.g.*, subwoofer speakers), the SFS method can be used as it exhibits a high accuracy in the estimation of the directivity of the source. Furthermore, the positioning of the sampling points (measurement points) around the source does not have to be very precise, and even standard variations of up to 5 cm can be allowed without losing reconstruction accuracy. These findings can greatly improve the measurement time by decreasing the rigor in the placement of the sensors during the measurement procedure.

References

- [1] R. Heyser, "Acoustical measurements by time delay spectrometry," *J. Audio Eng. Soc.* vol. 15, no. 4, pp. 370-382, 1967. <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=1084> ↑2
- [2] J. M. Berman and L. R. Fincham, "Application of digital techniques to the measurement of loudspeakers," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 25, no. 6, pp. 370-384, 1977. <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=3366> ↑2
- [3] E. G. Williams, J. D. Maynard, and E. Skudrzyk, "Sound source reconstructions using a microphone array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, no. 1, pp. 340-344, 1980. <https://doi.org/10.1121/1.384602> ↑3
- [4] D. Keele Jr., B. Don, H. Lu, and S. Wu, "High-accuracy full-sphere electro acoustic polar measurements at high frequencies using the HELS method," in *Audio Engineering Society Convention 121*, San Francisco, CA, USA, 2006. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=13715> ↑3
- [5] G. Weinreich and E. B. Arnold, "Method for measuring acoustic radiation fields," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, no. 2, pp. 404-411, 1980. <https://doi.org/10.1121/1.384751> ↑3
- [6] E. G. Williams, *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Near-field Acoustic Holography*, Cambridge, MA, USA: Academic Press, 1999. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-753960-7.X5000-1> ↑3

- [7] M. Melon, C. Langrenne, D. Rousseau, and P. Herzog, “Comparison of four subwoofer measurement techniques,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 55 no. 12, pp. 1077-1091, 2007. <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14183> ↑3
- [8] W. B. Li, M. Z. Lian, C. X. Bi, J. Chen, and X. Z. Chen, “Separation theory of the incident and scattered sound fields in spherical coordinate,” *Sci. China, Ser. E Technol. Sci.*, vol. 50, no. 3, pp. 631-370, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11431-007-0014-4> ↑3, 5, 7
- [9] A. Fahim, P. N. Samarasinghe, and T. D. Abhayapala, “PSD Estimation and Source Separation in a Noisy Reverberant Environment Using a Spherical Microphone Array,” in *IEEE/ACM Transactions on audio, speech, and language processing*, 2018. <https://doi.org/10.1109/WASPAA.2017.8169998>) ↑3
- [10] A. Amir, J. Ahrens, M. Geier, S. Spors, H. Wierstorf, and B. Rafaely, “Spatial perception of sound fields recorded by spherical microphone arrays with varying spatial resolution,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 133, no. 5, May 2013. <https://doi.org/10.1121/1.4795780> ↑3
- [11] P. Zhang, Z. Kuang, M. Wu, and J. Yang, “A novel method for measuring acoustic radiation fields of subwoofers based on non free-field aspheric measurements,” International Congress on Sound and Vibration, 2014. ↑3
- [12] P. Zhang and X. Bi, “Patch nearfield acoustic holography combined with sound field separation technique applied to non-free field,” *Sci. China Phys. Mech. Astr.*, vol. 58, no. 2, pp. 1-9, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11433-014-5467-4> ↑3

Sebastian López Mejía

Magister en Ciencias de la Ingeniería Mecánica del Korea Advanced Institute of Science and Technology -KAIST- (Corea del Sur); Ingeniero de Sonido de la Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá; Docente Investigador del Programa de Ingeniería de Sonido y Miembro del Grupo de Investigación en Modelamiento y Simulación Computacional -GIMSC- de la Universidad de San Buenaventura, Seccional Medellín.
Correo electrónico: sebastian.lopez@usbmed.edu.co

Andres Felipe Piedrahita Montes

Estudiante del Programa de Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura, Seccional Medellín.
Correo electrónico: andrespiedrahita2903@gmail.com

A P-Robustness Approach for the Stochastic Inventory Routing Problem

Una aproximación a través del modelo p -robusto para el problema estocástico de ruteo e inventario

Carlos Franco¹, **Juan Carlos Figueroa-García**^{*2}, **Jhoan Sebastián Tenjo-García**³

¹Universidad del Rosario (Bogotá, Colombia), ²Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia), ³Universidad Nacional de Colombia (Bogotá, Colombia)

*Correspondence e-mail: carlosa.franco@urosario.edu.co

Received: 15/08/2021. Modified: 27/08/2021. Accepted: 15/09/2021.

Abstract

Context: Approaches to logistics solutions through mathematical optimization are widely studied in the literature given their importance for business operations and their computational complexity. In this way, studying the uncertainty associated to operations is a key factor in modeling and decision-making.

Method: A stochastic mathematical model is proposed for the Inventory Routing Problem (IRP), considering scenarios with variation in the demands. To obtain a suitable approach, a p -robustness approach and the reformulation of the classical IRP are presented.

Results: The performed experiments show the benefits of including uncertainty through a p -robust approach when they are analyzed within an instance of the IRP. Moreover, given the selected modeling, the benefits of combining the approaches can be analyzed.

Conclusions: The development of stochastic approaches for decision-making applied to the IRP allow analysts to handle uncertainty and also reduce the complexity of decision when combining different types of problems (Routing + Inventory) in the same model.

Keywords: inventory routing problem, p -robustness, uncertainty

Language: English.

Open access



Cite as: Franco, C., Figueroa-García, J., J. Tenjo-García. "A P-Robustness Approach for the Stochastic Inventory Routing Problem". *Ing*, vol. 27, no. 1, 2022. e18468.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.18468>

Resumen

Contexto: Las aproximaciones de soluciones logísticas a través de la optimización matemática son altamente estudiadas en la literatura debido a su importancia en las operaciones de las compañías y su complejidad computacional. En este sentido, el estudio de la incertidumbre asociada a la operación es un factor fundamental del modelamiento y la toma de decisiones.

Método: Un modelo matemático estocástico es propuesto para el problema combinado de ruteo e inventario (IRP), considerando escenarios de variaciones en la demanda. Para obtener un enfoque adecuado, se presenta una aproximación de p -robusto y la reformulación del problema clásico de aplicación.

Resultados: Los experimentos realizados muestran los beneficios de incluir la incertidumbre a través de la aproximación de p -robusto cuando se analizan en el marco de una instancia del IRP. También, dado el tipo de modelado seleccionado, se pueden analizar los beneficios de combinar las aproximaciones.

Conclusiones: El desarrollo de aproximaciones estocásticas de toma de decisiones aplicadas al problema IRP permite a los analistas gestionar la incertidumbre y reducir la complejidad de las decisiones cuando se combinan diferentes tipos de problemas (Ruteo + Inventario) en un mismo modelo.

Palabras clave: problema de ruteo e inventarios, p -robusto, incertidumbre

Idioma: Inglés

1. Introduction

Setting up all supply chain elements is a key factor that companies face in the short and long term (it is seen as a planning task). Most manufacturing and logistics companies aim to produce and/or distribute goods to final customers, so the role of an efficient supply chain and its distribution network is essential in order to guarantee profits, sustainability, and operability. In this way, the integration of decision-making at different levels becomes a key factor for any supply chain, and the integration of inventory routing decisions integrates tactical problems (inventory management) and operative problems (routing) [1]. The integration of both levels into decision-making is known as the Inventory Routing Problem (IRP), inspired by the Vendor Managed Inventory (VMI) strategy, which consists of centralizing inventory-related decision-making.

Thereupon, the IRP implies coordinating two logistic decisions (inventory + routing), whose goal is to minimize the overall costs generated by inventory holding costs plus routing costs over a given planning horizon [2]. The decisions to be taken are summarized as follows: when to deliver goods required by each customer, their quantities, and how to ship them all while considering several constraints such as allowable inventory levels and vehicle capacity [3], [4]. This model has been widely studied in the literature because of its importance in terms of applicability, where most of its variants deal with different practical issues that require designing appropriate solution methods. Most of the literature deals with deterministic parameters; it considers decision-makers to have complete information beforehand, but several factors have no deterministic behavior, which creates the need to include uncertainty in the analysis (seen as a degree-of-freedom factor). Now, one of the main issues that affects logistic operations over the planning horizon are customer demands, which induce variability/uncertainty since they are hard to estimate in many cases [5].

This paper is organized as follows: Section 2 presents a literature review; in Section 3, the mathematical model of our proposal is presented; Section 4 presents the results in a practical scenario; and Section 5 shows the conclusions of the study.

2. Literature review

Several approaches deal with the classic inventory routing problem, and their main efforts are steered towards finding optimal solutions within reasonable computing times. One of the main approaches for optimally solving this deterministic problem was presented in [6], while its stochastic version is still a challenge. Some authors have approached solving the stochastic IRP; for instance [7] presents an approach for the stochastic IRP considering two uncertainty sources, demands and travel times, which were also considered to be stationary, where the main approach is to solve a robust version of the IRP based on a robust optimal distribution plan solved by a combination of optimization and Monte Carlo simulation methods.

Similarly, [8] developed two approaches for solving two IRP instances: dynamic and stochastic. In the dynamic version, the information is revealed for each time period (i.e., demands which are considered as a source of uncertainty), so decision making happens at the beginning of each period. The stochastic version assumes the involvement of stochastic uncertainty, which affects predictions that are used for decision-making before demands occur. The authors then proposed the use of several heuristics to analyze how a moving horizon period increases computing efforts but does not improve the optimal solution of the problem.

A multi-objective approach is developed in [9], which is based on economic performance, shortage/delivery delays, and environmental footprint as three goals to be evaluated. The authors also considered different uncertainty sources such as the demands and transportation costs. The approach to modeling uncertainty is fuzzy sets and systems, which is divided into two parts: the first is the transformation of the proposed fuzzy mathematical model into an equivalent deterministic/crisp via a fuzzy possibilistic approach, while the second one corresponds to the NSGA-II (Non-Sorting Genetic Algorithm II).

In [10], the authors propose the use of Markov chains along with simulated annealing, pattern search/ranking, and selection procedures to evaluate near-optimal solutions. Authors also solve a periodical stochastic inventory model with auto correlated demands using empirical probability distributions. The proposed method is a simulation-based optimization approach whose results show that inventory performance significantly declines as autocorrelation increases and it is then disregarded.

An interesting IRP application of industrial gases is shown in [11], where the authors propose a Lagrangian relaxation method that obtains an approximate of 8 % in savings. Similarly, [12] presents an inventory control system with periodic review to analyze replenishment decisions by choosing an appropriate replenishment size with different service levels.

Another stochastic IRP is analyzed in [13]. The authors propose the use of the order-up-to-level policy, which consists of replenishing when necessary up to the top level of inventory capacity. The main approach here is to penalize stockouts and model the problem as a dynamic programming problem using a hybrid rollout algorithm, which can reduce computing time of large instances to reasonable times, thus constituting an improvement of the benchmark algorithms existing in the literature.

3. Mathematical approach

The main formulation considers the same basic ideas presented by [1]–[3] handling stochastic uncertainty through the adaptation of the p-robustness criteria presented in [4] and [5], generating scenarios for modeling uncertainty such as those presented in [6]. Therefore, the mathematical model contemplates a set of nodes $V_p = 2, \dots, n$ as the set of customers, where node “1” corresponds to the central depot that distributes products to the network, where, at each time period $t \in T$, there is an amount rt_t of product available at the depot.

For each time period, each customer has a demand dt_i^{st} that is uncertain and is modeled with the scenario $s \in S$. The variable I_i^{st} represents the inventory levels at the depot and the customers, where each has a lower (L_i) and upper (C_i) bound to be kept in inventory. Moreover, the depot must decide if there will be a delivery made by a vehicle represented by the set K , which has a specific capacity Q_k , and each delivery is modeled with the variable q_i^{kt} . Finally, there are the binary variables X_{ij}^{kt} and Y_i^{kt} , which determine if a customer is visited or not. This model considers uncertainty mainly with a two-stochastic optimization approach [19], where first-stage decisions are related to selecting visiting customers, second-stage decisions are related to inventory levels (customers/depot), and the decisions related to the amount of goods to be delivered to each customer per scenario. The mathematical model used is as follows:

$$Min Z = \sum_{s \in S} q_s \left[\sum_{i \in V} \sum_{t \in T} h_i I_i^{st} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{ij} X_{ij}^{kt} \right] \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{t \in T} h_i I_i^{st} + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} C_{ij} X_{ij}^{kt} \leq (1 + \rho) z_s^* \quad \forall s \in S \quad (2)$$

$$I_1^{st} = I_1^{st-1} + rt - \sum_{i \in V_p} \sum_{k \in K} q_i^{kt} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (3)$$

$$I_0^{st} \geq 0 \quad \forall t \in T, s \in S, \quad (4)$$

$$I_i^{st} = I_i^{st-1} + \sum_{k \in K} q_i^{skt} - dt_i^{st} \quad \forall i \in V_p, t \in T, s \in S \quad (5)$$

$$I_i^{st} \geq 0 \quad \forall i \in V_p, t \in T, s \in S \quad (6)$$

$$I_i^{st} \geq L_i \quad \forall i \in V_p, t \in T, s \in S \quad (7)$$

$$I_i^{st} \geq C_i \quad \forall i \in V_p, t \in T, s \in S \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} q_i^{skt} \leq C_i - I_i^{st-1} \quad \forall i \in V_p, t \in T, s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} q_i^{skt} \leq C_i \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} X_{ij}^{kt} \quad \forall i \in V_p, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} q_i^{skt} \leq Q_k \quad \forall t \in T, k \in K \quad (11)$$

$$q_i^{skt} \leq Y_i^{kt} C_i \quad \forall i \in V_p, t \in T, k \in K, s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ij}^{kt} = \sum_{j \in V} X_{ji}^{kt} \quad \forall i \in V_p, t \in T, k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ij}^{kt} = T_i^{kt} \quad \forall i \in V_p, t \in T, k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{j \in V_p} X_{1j}^{kt} \leq 1 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{k \in K} Y_i^{kt} \leq 1 \quad \forall i \in V_p, t \in T \quad (16)$$

$$\begin{aligned} X_{ij}^{kt}, Y_i^{kt} &\in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V_p, i \neq j, t \in T, k \in K \\ q_i^{st} &\geq 0 \quad \forall i \in V_p, t \in T, k \in K, s \in S \end{aligned} \quad (17)$$

The objective function aims to minimize the expected costs made up by the inventory/holding and transportation costs. Said function is presented in Eq. (1) which represents the overall scenario. Constraint (2) enforces the p -robustness condition, which considers the optimal function for each scenario and a predefined p -robustness. Constraints (3) and (4) determine inventory levels in the depot. Eqs. (5), (6), (7), and (8) determine the upper/lower bounds of inventory levels for every customer. Eq. (9) represents quantities to be delivered to each customer given the maximum capacity allowed by Eq. (10), which also establishes a relationship between integer and binary variables.

Eq. (11) represents the fixed vehicle capacity, while (12) sets the relationship between the amount of products delivered, the capacity, and a binary variable that activates if a customer is visited. Flow constraints are shown in (13), and the relationship between the two binary variables is presented in (14). Finally, routing constraints are presented in (15) and (16), and (17) sets up the nature of delivering quantities. To get a better understanding of the problem, Fig. 1 presents a graphical description. The example is composed of four different time periods, where a delivery decision must be made for each customer (five in total, as represented by the blue circles). Each customer has their own inventory level constraints (maximum and minimum, represented by the bar) which must be fulfilled. For each time period, from the depot, it must be decided if a replenishment must be done (and the routing process), considering that demand over each time period is stochastic (thus, it is not known beforehand).

3.1. P -robustness description

The p -robustness approach [4] is based on a probability-based robustness measure, which is the deviation of a feasible solution provided by a scenario to the global optimal solution. This method

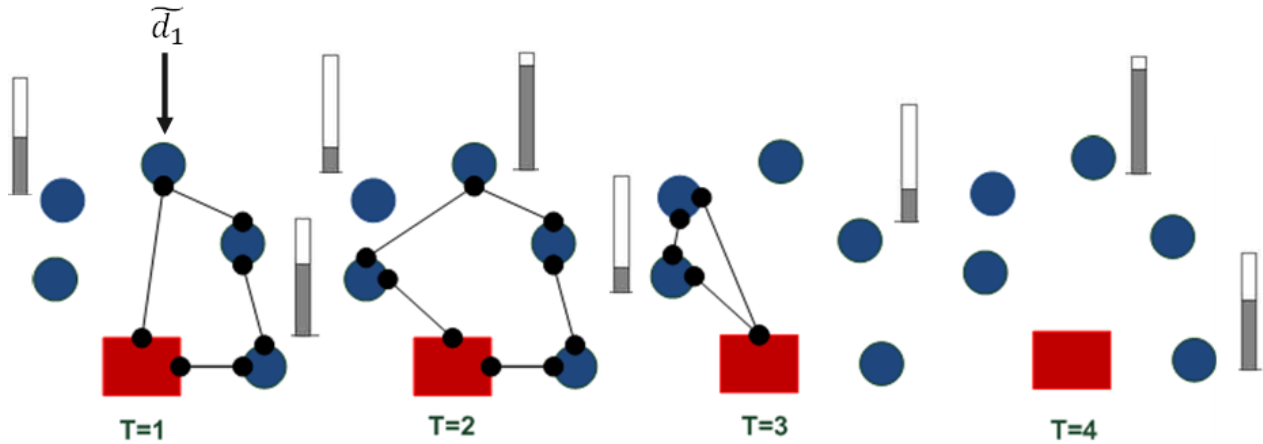


Figure 1. Description of the problem under study

proposes the combination of the benefits of stochastic and robust optimization models by the minimization of the expected costs and the min-max cost or regret. The approach then uses a set S of scenarios, where X is a feasible solution of the mathematical model, and a solution is deemed to be robust if the following constraint is guaranteed:

$$\frac{Z_s(X) - Z_2^*}{Z_s^*} \leq \rho \quad (18)$$

where z_s^* is the optimal objective function for each scenario $s \in S$; $z_s(X)$ is the objective function of a feasible solution X ; and ρ is the desired robustness level or maximum allowable regret. To solve the problem, it is mandatory to have the optimal values of each scenario, which are solved as single deterministic problems. The left part of the equation corresponds to the relative regret for each scenario, where the combination of the ρ -robustness version (or constraint) with the minimization of the expected cost (as objective function) generates the stochastic ρ -robustness measure.

4. Experimentation and results

The mathematical model presented in section 3 is tested with the modification of instances presented in different studies [4], [15], [20], considering the scenario generation presented by [18]. In this case the scenarios generated are 20, and they aim to analyze the variability of demand, where the model is solved using FICO-Xpress-MP v. 12.1. The analyzed instance has the reference “abs1n5_HC3”, which is composed of 6 customers that have different values of demand over three time periods of the planning horizon (the deterministic version has 65, 35, 58, 24, and 11 units of demand, respectively), and the scenarios are generated according to the behavior of the deterministic demand given variations of $\pm 20\%$. The capacity of each vehicle is fixed to 289 units, and the amount of product available at the depot corresponds to 193 units. In this sense, in Fig. 1, we present the results for a single instance contrasting the variation of the objective function in terms of the p -robustness parameter.

Fig. 2 shows that analyzing the trade-off between the p -robustness and the objective function (which measures the overall logistic costs) shows that, as the p -robustness value increases, the ove-

rall objective function decreases. This means that decision-makers can achieve cost reductions by choosing higher values of the p -robust parameter. In order to analyze the behavior of the obtained solution and regret for different scenarios, we have presented the results in Table I, where the first column corresponds to the uncertainty scenario, the second column is its optimal value, and the third column is the regret.

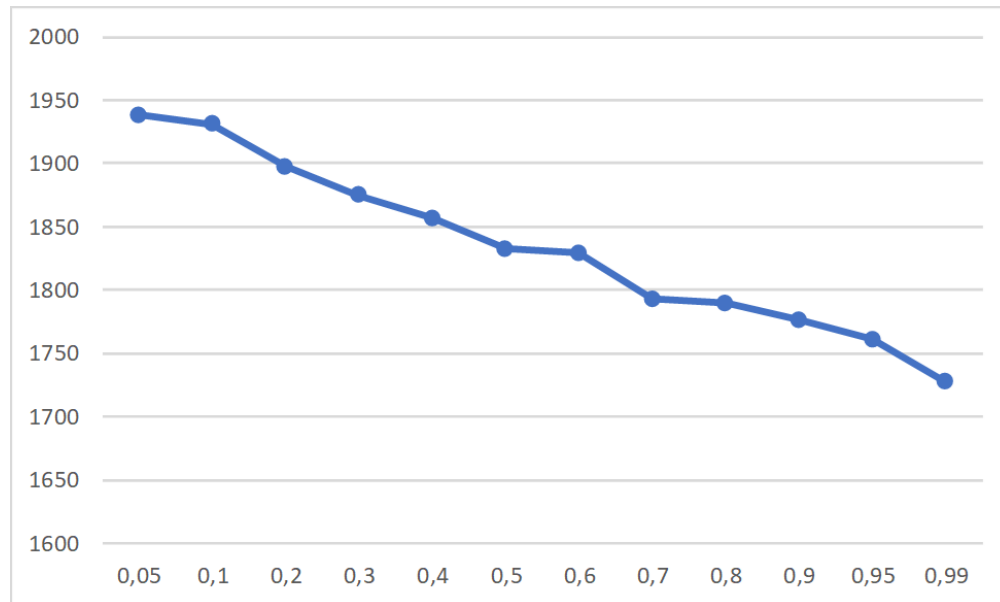


Figure 2. Variation of the objective function in terms of the p -robustness value

Table I shows the overall performance of the regret in every scenario of the optimization model. Roughly speaking, the obtained values are in some cases greater than those obtained by the deterministic model due to the uncertainty of the delivered quantities and the demand used in each scenario. On the other hand, as the regret obtained in different scenarios is somehow small, this model allows analysts to obtain robust solutions in order to deal with uncertain demands and manage logistic costs composed of the inventory holding and routing costs.

5. Conclusions

In this paper, we have presented a mathematical model approach for the Inventory Routing Problem with demand uncertainty, where the modeling is carried out through the use of the p -robustness criteria, which minimizes the worst-case cost or regret and combines the two objectives by minimizing the expected cost while bounding the relative regret in each scenario of uncertainty. The mathematical model contemplates a single-depot and single product but considers several customers within a planning horizon with variations in the demand. The experiments performed allow us to analyze the trade-offs obtained with the objective function contrasted with the parameter of the approach selected. To solve the proposed approach, the p -robustness model requires that several mathematical models are solved (given the number of scenarios) for using this information in the general version as a parameter for building the p -robustness criteria (Constraint (2)).

Table I. Regret over scenarios

Scenario	O.F	Regret
1	2.023,9281	0,7628
2	2.301,7102	0,4235
3	1.983,5125	0,5649
4	2.096,5508	0,7825
5	2.224,9500	0,7207
6	2.351,1462	0,7047
7	2.064,4355	0,4654
8	1.965,1252	0,2361
9	2.352,8536	0,3342
10	1.943,7287	0,4465
11	2.087,4798	0,4078
12	2.166,7138	0,1340
13	1.965,8118	0,2151
14	2.110,1409	0,4687
15	2.350,2671	0,2974
16	2.094,8021	0,4025
17	2.361,5050	0,8206
18	2.296,7829	0,4072
19	2.007,2951	0,3264
20	2.300,3686	0,3024

This model can be extended to perform different analyses and increase the complexity of decisions; the impacts of several depots and products can be analyzed, and different types of sources of uncertainty can be considered, such as the transportation and inventory costs and the heterogeneity of vehicles. On the other hand, different methods for solving bigger instances can be proposed, such as heuristics, metaheuristics, or matheuristics, given the computational complexity of the basic problem, which is increased by the uncertainty.

6. Acknowledgements

We would like to thank the Fair Isaac Corporation (FICO) for providing us with Xpress-MP licenses under the Academic Partner Program subscribed with Universidad del Rosario.

References

- [1] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, "Consistency in multi-vehicle inventory-routing," *Transp. Res. Part C* [1] C. Franco-Franco and J. C. Figueroa-García, "A column generation-based algorithm for solving combined inventory and routing problems," *Ingeniare*, vol. 24, no. 2, 2016, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000200012>. ↑2,4
- [2] E.-H. Aghezzaf, B. Raa, and H. Van Landeghem, "Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 169, no. 3, pp. 1048–1063, Mar. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.008>. ↑2,4

- [3] C. Archetti, L. Bertazzi, G. Laporte, and M. G. Speranza, “A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem,” *Transp. Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 382–391, Aug. 2007, doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0188>. ↑2, 4
- [4] L. C. Coelho and G. Laporte, “The exact solution of several classes of inventory-routing problems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 558–565, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.012>. ↑2, 4, 5, 6
- [5] E. Yadollahi, E. H. Aghezzaf, J. Walraevens, B. Raa, and D. Claeys, “Evaluating approximate solution models for the stochastic periodic inventory routing problem,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 50, pp. 25–35, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.001>. ↑2, 4
- [6] L. C. Coelho and G. Laporte, “The exact solution of several classes of inventory-routing problems,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 558–565, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.012>. ↑3, 4
- [7] E. H. Aghezzaf, “Robust distribution planning for supplier-managed inventory agreements when demand rates and travel times are stationary,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 59, no. 8, pp. 1055–1065, 2008, doi: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602444>. ↑3
- [8] L. C. Coelho, J. F. Cordeau, and G. Laporte, “Heuristics for dynamic and stochastic inventory-routing,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 52, no. PART A, pp. 55–67, Dec. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.001>. ↑3
- [9] M. Rahimi, A. Baboli, and Y. Rezik, “Multi-objective inventory routing problem: A stochastic model to consider profit, service level and green criteria,” *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 101, pp. 59–83, May 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.03.001>. ↑3
- [10] R. Diaz, M. P. Bailey, and S. Kumar, “Analyzing a lost-sale stochastic inventory model with Markov- modulated demands: A simulation-based optimization study,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 38, pp. 1–12, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.09.007>. ↑3
- [11] W. J. Bell et al., “Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-Line Computerized Routing and Scheduling Optimizer,” *Interfaces (Providence)*, vol. 13, no. 6, pp. 4–23, Dec. 1983, doi: <https://doi.org/10.1287/inte.13.6.4>. ↑3
- [12] Q. J. Yeh, T. P. Chang, and H. C. Chang, “An inventory control model with Gamma distribution,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 37, no. 8, pp. 1197–1201, Aug. 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(96\)00295-8](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(96)00295-8). ↑3
- [13] F. Rayat, M. Musavi, and A. Bozorgi-Amiri, “Bi-objective reliable location-inventory-routing problem with partial backordering under disruption risks: A modified AMOSA approach,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 59, pp. 622–643, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.06.036>. ↑3
- [14] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, “Consistency in multi-vehicle inventory-routing,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 24, pp. 270–287, Oct. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.03.007>. ↑
- [15] L. C. Coelho and G. Laporte, “Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 47, pp. 42–52, Jul. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.013>. ↑6
- [16] L. V. Snyder and M. S. Daskin, “Stochastic p -robust location problems,” *IIE Trans.*, vol. 38, no. 11, pp. 971–985, Nov. 2006, doi: <https://doi.org/10.1080/07408170500469113>. ↑
- [17] C. Franco, V. Augusto, T. Garaix, E. Alfonso-Lizarazo, M. Bourdelin, and H. Bontemps, “Strategic territorial deployment of hospital pharmacy robots using a stochastic p -robust optimization approach,” in *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Aug. 2018, pp. 390–395, doi: <https://doi.org/10.1109/COASE.2018.8560374>. ↑
- [18] C. Franco Diana Guzmán Cortés Juan Carlos Figueroa García and N. L. Díaz Aldana, “Mathematical model for centralized supply chains with sharing resources decisions,” *Ingeniería*, vol. 25, no. 3, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.14483/23448393.16921>. ↑6
- [19] C. Franco and E. Alfonso-Lizarazo, “Optimization under uncertainty of the pharmaceutical supply chain in hospitals,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 135, p. 106689, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106689>. ↑4
- [20] F. Morales, C. Franco, and G. Mendez-Giraldo, “Dynamic inventory routing problem: Policies considering network disruptions,” *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 9, no. 4, 2018, doi: <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.11.001>. ↑6

Carlos Franco

PhD In Logistics and Supply Chain from Universidad la Sabana; MSc in Industrial Engineering with a major in Operations Research and Statistics from Universidad de los Andes; Bachelor's degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Full professor at Universidad del Rosario. He works on the management group of Universidad del Rosario under the Supply Chain Management research area. His main research interests are related with mathematical modeling for logistic and healthcare systems.

E-mail: carlosa.franco@urosario.edu.co

Juan Carlos Figueroa-García

He received the BSc and MSc degrees in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2002/2009, and the PhD degree in Industrial Engineering (meritorious degree) from Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2014. Since 2006, he has been a full-time teacher and researcher of the Engineering Department at Universidad Distrital Francisco José de Caldas in the area of statistics and operations research. He has co-edited different Springer LNCS/CCIS volumes and IEEE conference proceedings. He has also authored several book chapters and multiple scientific papers. He was awarded with the International Fuzzy Systems Association's (IFSA) "Young Scientist Award" in 2012, the North American Fuzzy Information Processing Society's (NAFIPS) "Best Interval paper award" in the NAFIPS-IFSA conference in 2013, and the NAFIPS "Outstanding Paper" award in 2010. He is an IEEE Senior member, and currently serves as one of the board of directors of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS). His main research interests include fuzzy measure, Type-2 fuzzy sets, fuzzy optimization and fuzzy statistics.

E-mail: jcfigueroag@udistrital.edu.co

Jhoan Sebastián Tenjo-García

He obtained the BSc degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2017, and he is currently studying mathematics at Universidad Nacional de Colombia, Bogotá Campus. He is author of several scientific papers published by Springer-Nature LNCS/CCIS series. His main research interests include fuzzy sets, fuzzy mathematics, optimization, and statistics.

E-mail: jtenjo@unal.edu.co

Conservación de piña mínimamente procesada: evaluación de parámetros fisicoquímicos

Preservation of Minimally Processed Pineapple: Evaluation of Physicochemical Parameters

Claudia L. Vargas-Serna^{ID}*¹, **Vanessa González**¹, **Claudia Ochoa-Martínez**¹, **Carlos Vélez Pasos**¹

¹Escuela de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

*Correspondence e-mail: claudia.vargas@correounivalle.edu.co

Recibido: 07/02/2021. Modificado: 28/05/2021. Aceptado: 17/09/2021.

Abstract

Context: The high consumption of pineapple worldwide requires that the market offer different commercialization alternatives, including minimally processed products. Undesirable changes in the product during storage can be reduced by its processing and packaging conditions. This work aimed to evaluate the effect of the type of packaging, the pretreatment, and the type of cut on fresh-cut pineapple quality parameters.

Method: The pineapple was cut into 2 cm cubes and quarter slices of 1,5 cm thickness. Samples were stored in PET containers with or without an absorbent pad. The precooling of the samples was also evaluated. The quality properties of the fruit were evaluated during 14 days of storage.

Results: The quarter slices showed less weight loss and maintained their color, vitamin C content, polyphenols, and antioxidant capacity, whereas the cut in cubes showed a better performance in terms of firmness. The use of absorbent pads accelerated the weight loss. Precooling did not show a significant effect in the response variables.

Conclusions: The results obtained suggest that it is possible to maintain the quality properties of minimally processed pineapple of the MD2 variety when it is cut in quarter slices and packaged in PET containers, thus preserving the vitamin C content and phenolic compounds.

Keywords: absorbent pad, precooling, type of cut, refrigeration, pineapple

Language: Spanish

Open access



Cite as: Vargas-Serna, C. L., González, V., Ochoa-Martínez, C., Vélez Pasos, C. "Conservación de piña mínimamente procesada: evaluación de parámetros fisicoquímicos". *Ing.*, vol. 27, no. 1, 2022. e17564.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17564>

Resumen

Contexto: El alto consumo de piña a nivel mundial requiere que el mercado ofrezca diferentes alternativas de comercialización, incluyendo productos mínimamente procesados. Los cambios indeseables en el producto durante el almacenamiento pueden reducirse mediante las condiciones de procesamiento y empaque. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del tipo de empaque, el pretratamiento y el tipo de corte sobre parámetros de calidad de piña fresca cortada.

Método: La piña fue cortada en cubos de 2 cm de lado y en cuartos de rodaja de 1,5 cm de espesor. Las muestras se almacenaron en envases PET con o sin almohadilla absorbente. Se evaluó además el preenfriamiento de las muestras. Se evaluaron propiedades de calidad del producto durante 14 días de almacenamiento.

Resultados: Los cuartos de rodaja presentaron menor pérdida de peso, mantuvieron el color, el contenido de vitamina C, los polifenoles y la capacidad antioxidante, mientras el corte en cubos presentó mejor comportamiento en cuanto a la firmeza. El uso de almohadillas absorbentes aceleró la pérdida de peso, el preenfriamiento no mostró un efecto significativo en las variables de respuesta.

Conclusiones: Los resultados obtenidos sugieren que es posible mantener las propiedades de calidad de piña variedad MD2 mínimamente procesada cortada en cuartos de rodaja y empacada en envases PET conservando la vitamina C y los compuestos fenólicos.

Palabras clave: almohadilla absorbente, preenfriamiento, tipo de corte, refrigeración, piña

Idioma: Español

1. Introducción

La piña es una fruta tropical de alto consumo por sus propiedades organolépticas y nutricionales (vitamina C y compuestos antioxidantes) [1]. Cerca del 70 % de la producción mundial se consume en fresco y el resto se destina a productos como jugos, mermeladas y enlatados, entre otros [2], [3]. Debido al tamaño del fruto, a su cáscara no comestible y a la dificultad para pelar, se reduce la aceptación del consumidor que busca frutas de consumo inmediato [4]. Esto ha incrementado el consumo de frutas mínimamente procesadas en los últimos años. El corte y la manipulación durante la elaboración de este tipo de productos generan daños mecánicos que reducen su vida útil, de ahí que el empaque sea un aspecto clave para mantener las propiedades del producto [5].

Una alternativa de conservación es el uso de empaques en los cuales se incorporan absorbentes y modificadores de atmósferas que actúan sobre el producto perecedero y su entorno [6]. Entre ellos están los agentes hidrofílicos tales como las almohadillas absorbentes, que tienen la función de absorber el exceso de agua en estado líquido [7], [8], evitando el crecimiento microbiano en el lixiviado que se deposita en el fondo del empaque. Sin embargo, no se han reportado suficientes estudios que evidencien la calidad y la vida útil del producto.

Por otra parte, el uso de pretratamientos ha mostrado tener un efecto positivo en productos mínimamente procesados. En piña mínimamente procesada se han usado diferentes pretratamientos como el 1-MCP (1 metil ciclo propano) [9], radiación Gamma [10] y luz ultravioleta [11]. Estos tratamientos han mostrado ser efectivos en el control del crecimiento microbiano, la pérdida de textura y los cambios en el pH. Sin embargo, no muestran efecto en otros parámetros de calidad como el color o el contenido de vitamina C. Otra alternativa de pretratamiento es el preenfriamiento, de

fácil implementación y con una relación costo beneficio mayor a la de otros pretratamientos [12]. El objetivo del preenfriamiento es poner en equilibrio la atmósfera dentro del recipiente con la del refrigerador antes del almacenamiento [13]. El preenfriamiento reduce la tasa metabólica de los frutos, limita el crecimiento de patógenos, reduce la pérdida de agua y aumenta la vida útil [14]. Además, previene la aparición de desórdenes fisiológicos y retarda la maduración o senescencia del fruto.

Productos como la espinaca que son comercializados como mínimamente procesados requieren de preenfriamiento para prevenir la pérdida de agua y el rápido deterioro del producto [15]. En productos como manzanas y melones se ha demostrado que el enfriamiento previene la pérdida de firmeza, peso y vitamina C [13]. Los productos mínimamente procesados tienden a aumentar su tasa de respiración y producción de etileno, el control de la temperatura y la adaptación al ambiente de almacenamiento pueden reducir el efecto del corte sobre el deterioro acelerado del producto [16].

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto combinado del uso de preenfriamiento y almohadillas absorbentes sobre parámetros de calidad (peso, pH, acidez, sólidos solubles, color, firmeza, vitamina C, polifenoles totales y capacidad antioxidante) de piña variedad MD2 mínimamente procesada con dos tipos de corte.

2. Metodología

2.1. Procesamiento de la piña

Se usó piña recién cosechada variedad MD2 proveniente de los cultivos CBH (Valle del Cauca, Colombia), con un estado de madurez entre 0 y 1 (90 % cáscara color verde) y sin daños por microorganismos. Las piñas se lavaron, se desinfectaron con hipoclorito de sodio (10 ppm) durante 10 min y se enjuagaron con agua potable. Se pelaron manualmente, se les retiró el corazón y se cortaron en cubos de 2 cm o en cuartos de rodaja de 1,5 cm de espesor según el diseño experimental. El proceso general se presenta en la Figura 1.

2.2. Materiales de empaque

Las muestras se empacaron en cajas de tereftalato de polietileno (PET) de $11 \times 9 \times 3$ cm, con capacidad de 200 g cada una. Se evaluó el uso de almohadillas (TAS2) como absorbentes del lixiviado. Las almohadillas, con una capacidad de absorción máxima de $3300 \text{ cm}^3/\text{m}^2$, están formadas por tres capas, la inferior y la superior son de una mezcla impermeable de polietileno (PE) y la intermedia es de celulosa con SAF (fibra súper absorbente).

2.3. Empaque, preenfriamiento y almacenamiento

Para los ensayos se utilizaron aproximadamente 190 g de fruta cortada. Las muestras sin preenfriamiento se almacenaron 14 días a 4°C . Las muestras con preenfriamiento se mantuvieron a 4°C durante 3 h con los empaques abiertos. Posteriormente se cerraron y se almacenaron 14 días a 4°C . Se realizó seguimiento de los parámetros fisicoquímicos los días 0, 2, 6, 8, 12 y 14.

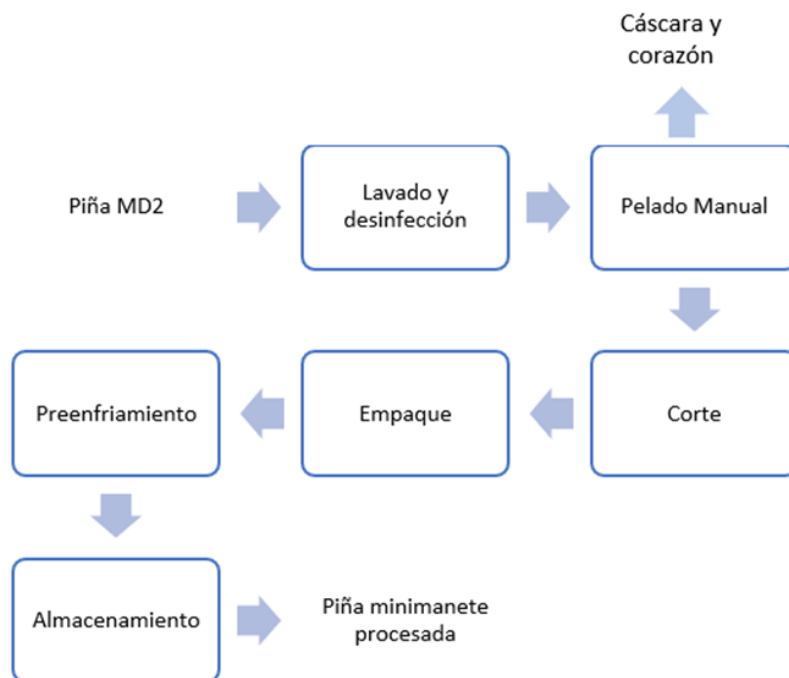


Figura 1. Proceso de obtención de piña mínimamente procesada

2.4. Diseño experimental

Se utilizó un diseño factorial 2^3 cuyos factores fueron tipo de empaque (con y sin almohadilla), tipo de corte (cubos y cuartos de rodaja) y pretratamiento (con y sin preenfriamiento). Todos los tratamientos se realizaron por triplicado. Se empleó la siguiente nomenclatura: ACP (con almohadilla, cubos, preenfriado), ACS (con almohadilla, cubos, sin preenfriado), NCP (sin almohadilla, cubos, preenfriado), NCS (sin almohadilla, cubos, sin preenfriado), ARP (con almohadilla, cuartos de rodaja, preenfriado), ARS (con almohadilla, cuartos de rodaja, sin preenfriado), NRP (sin almohadilla, cuartos de rodaja, preenfriado), NRS (sin almohadilla, cuartos de rodaja, sin preenfriado).

2.5. Evaluación de parámetros fisicoquímicos

2.5.1. Pérdida de peso

Para evaluar la pérdida de peso (porcentaje respecto al peso inicial) se utilizó una balanza (Ohaus, Suiza, precisión 0,01 g).

2.5.2. Color

La medición del color se realizó con un colorímetro (ColorFlex® EZ de Hunterlab). Se eligieron aleatoriamente tres muestras por empaque a las cuales se les midió el color en dos puntos. El color se expresó en términos de los parámetros L^* (luminosidad), a^* (cromaticidad verde) y b^* (cromaticidad amarilla).

2.5.3. Firmeza

La firmeza (N) se midió con un texturómetro (Shimadzu) usando una celda de carga de 500 N con punzón de punta plana de 3 mm de diámetro. La prueba se realizó con un desplazamiento de 10 mm y una velocidad de penetración de 50 mm/min. Para realizar la medición se eligieron al azar tres muestras por empaque.

2.5.4. Sólidos solubles totales

La determinación del contenido de sólidos solubles totales (SST), reportados en °Brix, se realizó a 20 °C en un refractómetro (Atago RX-700 α).

2.5.5. pH y acidez titulable

El pH se determinó empleando un pH-metro digital (Hanna). La acidez titulable (% de ácido cítrico) se realizó por el método estándar AOAC942.15 [17].

2.5.6. Vitamina C, contenido total de polifenoles y capacidad antioxidante

La determinación del contenido de ácido ascórbico (AA) se realizó en jugo de piña por el método reflectométrico (Reflectoquant®) con tiras de ensayo de 25 a 450 mg/l. Se realizó una dilución 1:1 con ácido oxálico al 1 %. Los datos se reportan en mg de ácido ascórbico/100 g. El cálculo se realizó usando la Ecuación (1).

$$AA = \frac{(C)(V)}{P}(100) \quad (1)$$

Donde C es la concentración medida por el equipo (mg/l), V es el volumen de ácido oxálico (l) y P es el peso de la muestra (g).

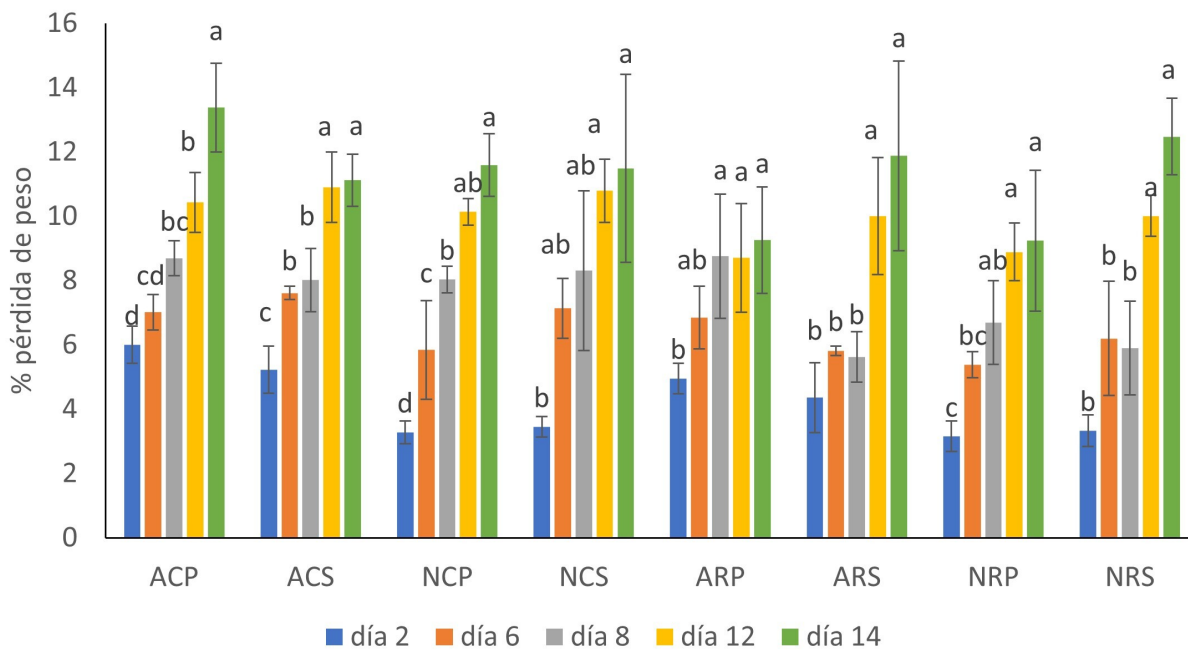
Para la extracción de los polifenoles se empleó un horno de microondas (marca LG referencia MS-0746T), durante 1 min con una potencia de 1000 W. Se usó 1 g de muestra y 15 ml de etanol (96 %). Se retiró el sobrenadante y los extractos se almacenaron protegidos de la luz hasta su análisis. La determinación del contenido total de polifenoles se realizó por espectrofotometría según el método propuesto por Ainsworth y Gillespie [18] y modificado por Ozturk *et al.* [19]. Se mezclaron 1.560 μ L de agua destilada con 40 μ L de extracto, 100 μ L de reactivo de Folin-Ciocalteu (PanReac AppliChem) y 300 μ L de solución filtrada de carbonato de sodio al 20 % (Loba Chemie PVT). La mezcla se vació en tubos de ensayo y se realizó agitación manual durante 1 min. Posteriormente se almacenó en la oscuridad durante 1 h. La lectura se hizo a 755 nm en un espectrofotómetro (GenesysTM 20 de Thermo Scientific) usando etanol como blanco. La curva de calibración se realizó con ácido gálico siguiendo el procedimiento descrito con concentraciones de 0,04, 0,1, 0,16, 0,2 y 0,3 mg de ácido gálico/ml de solución. Los resultados se expresan como mg AGE/100g. La neutralización de los radicales libres de 2,20-difenil-1-picrílihidrazil (DPPH) se midió por método espectrofotométrico. La reacción se llevó a cabo usando 300 μ L de extracto con 3.700 μ L de solución de DPPH (Sigma-Aldrich) al 100 μ M (en metanol). La solución se mezcló y se dejó 1 h en la oscuridad. La absorbancia de la solución se midió a 515 nm en espectrofotómetro (GenesysTM 20

de Thermo Scientific) usando metanol en lugar de extracto como solución control. Los resultados se presentan como mM TE/100g.

3. Resultados y discusión

3.1. Pérdida de peso

En la Figura 2 se presenta la pérdida de peso para los tratamientos evaluados. Al final del ensayo se obtuvieron valores entre 9 % y 14 %. En otros trabajos se han reportado pérdidas de peso entre 12 % y 14 % después de 15 días de almacenamiento [4], [20]. Los tratamientos evaluados presentaron pérdida de peso significativa durante el almacenamiento (variación en el tiempo dentro de cada tratamiento).



Nota: letras diferentes indican diferencias dentro de cada tratamiento.

Figura 2. Pérdida de peso de muestras de piña mínimamente procesadas. ACP (con almohadilla, cubos, preenfriado), ACS (con almohadilla, cubos, sin preenfriado), NCP (sin almohadilla, cubos, preenfriado), NCS (sin almohadilla, cubos, sin preenfriado), ARP (con almohadilla, cuartos de rodaja, preenfriado), ARS (con almohadilla, cuartos de rodaja, sin preenfriado), NRP (sin almohadilla cuartos de rodaja, preenfriado), NRS (sin almohadilla, cuartos de rodaja, sin pre enfriado).

La Tabla I muestra el análisis de varianza para los factores individuales, se encontró que la pérdida de peso aumentó con el tiempo de almacenamiento. Se observó un efecto significativo del empaque y el tipo de corte; para el empaque con almohadilla y las muestras en cubos la pérdida de peso fue mayor. El pretratamiento no tuvo efecto significativo sobre esta variable.

Las muestras empacadas con almohadilla perdieron cerca de 0,5 % más que las muestras empacadas sin almohadilla; además, las muestras en cubos perdieron 1 % más de peso que las muestras en cuartos de rodaja. La mayor pérdida de peso en las muestras empacadas con almohadilla se debe

Tabla I. Análisis de varianza y prueba Tukey para la pérdida de peso

Factor	Valor de P	Prueba de Tukey	
		Media	Agrupación
Día			
0	0,000	0,000	F
2		4,2215	E
6		6,4837	D
8		7,5080	C
12		9,9856	B
14		11,3051	A
Empaque			
Almohadilla	0,006	6,8604	A
Sin almohadilla		6,3076	B
Corte			
Cubos	0,000	7,0215	A
Cuartos de rodaja		6,1465	B
Pretratamiento			
Sin preenfriamiento	0,480	6,6538	A
Con preenfriamiento		6,5142	A

Nota: los valores de $p < 0,05$ representan efecto significativo del factor.

a la alta capacidad de absorción que tienen los materiales de celulosa en ambientes con humedades relativas altas [21]. A pesar de la pérdida de peso, aproximadamente el 50 % del lixiviado fue absorbido por la almohadilla, lo cual podría ser atractivo para el consumidor que observa menor pérdida de fase líquida en el envase.

Con relación al tipo de corte, la mayor pérdida se presenta en los cubos debido a su alta área superficial y al daño causado en las células por el corte, lo que provoca mayor pérdida de fase líquida. Estos resultados coinciden con Treviño Garza *et al.* [22] y Yousuf y Srivastava [23], quienes reportaron el aumento de la pérdida de peso de la piña cortada y almacenada en refrigeración.

3.2. Color

En la Tabla II se presentan los parámetros L^* , a^* y b^* normalizados (respecto al valor inicial).

Según Montero Calderón *et al.* [2] el patrón de maduración de la piña comienza desde la base y avanza hasta la corona, lo que da como resultado diferentes grados de maduración a lo largo del fruto. Debido a la estructura y al patrón de maduración de la fruta, la pulpa no es uniforme en color ni en textura, lo que puede explicar la variabilidad de los valores de L y b^* entre los tipos de cortes de piña.

El ANOVA (análisis de varianza) mostró que el tipo de corte tuvo efecto significativo sobre el parámetro L^* . Los cuartos de rodaja tuvieron valores de L^* por encima del valor inicial (mostrando mayor luminosidad), mientras que las muestras cortadas en cubos presentaron valores por debajo

Tabla II. Valores normalizados de L*, a* y b* de piña mínimamente procesada

	día 0	día 2	día 6	día 8	día 12	día 14
L*/L* inicial						
ACP	1,00±0,00aA	1,02±0,04aA	0,91±0,04aA	0,98±0,09aA	0,99±0,01aA	0,93±0,02aA
ACS	1,00±0,00aA	0,96±0,05aA	0,97±0,07aA	0,97±0,03aA	0,97±0,05aA	1,01±0,10aA
NCP	1,00±0,00aA	1,04±0,08aA	0,97±0,06aA	0,94±0,05aA	0,98±0,02aA	0,90±0,00aA
NCS	1,00±0,00aA	1,00±0,08aA	0,89±0,10aA	0,89±0,06aA	0,87±0,10aA	1,00±0,02aA
ARP	1,00±0,00aB	1,01±0,07aB	1,07±0,05aAB	1,06±0,04aAB	1,02±0,03aB	1,13±0,02aA
ARS	1,00±0,00aA	1,05±0,02aA	1,08±0,10aA	1,06±0,16aA	1,04±0,07aA	1,06±0,13aA
NRP	1,00±0,00aA	1,00±0,06aA	1,05±0,09aA	1,07±0,03aA	1,07±0,02aA	1,03±0,04aA
NRS	1,00±0,00aA	1,06±0,05aA	1,10±0,04aA	1,02±0,13aA	1,02±0,04aA	1,05±0,04aA
a*/a* inicial						
ACP	1,00±0,00aA	0,73±0,24abcA	1,02±0,19aA	0,45±0,10aA	0,58±1,07aA	0,20±0,16aA
ACS	1,00±0,00aA	0,26±0,16cA	0,55±0,36aA	0,96±0,47aA	0,44±0,11aA	0,18±0,49aA
NCP	1,00±0,00aA	0,60±0,38abcA	0,74±0,20aA	0,41±0,49aA	0,14±0,40aA	0,47±0,19aA
NCS	1,00±0,00aA	0,40±0,21bcBC	0,35±0,08aBC	1,25±0,40aA	0,25±0,47aBC	0,11±0,24aC
ARP	1,00±0,00aA	0,54±0,33abcAB	0,54±0,20aAB	0,26±0,09aB	0,84±0,41aAB	0,53±0,11aAB
ARS	1,00±0,00aA	0,95±0,00abcA	1,06±0,48aA	0,57±0,18aA	0,58±0,29aA	0,74±0,34aA
NRP	1,00±0,00aAB	1,14±0,06aA	0,25±0,44aC	0,32±0,20aC	0,50±0,07aBC	0,70±0,22aABC
NRS	1,00±0,00aA	0,84±0,18abcAB	0,80±0,54aAB	0,50±0,11aAB	0,62±0,03aAB	0,13±0,45aB
b*/b* inicial						
ACP	1,00±0,00aA	0,82±0,08aAB	0,86±0,00aAB	0,72±0,12aB	0,90±0,03aAB	0,78±0,15aAB
ACS	1,00±0,00aAB	0,73±0,13aC	0,82±0,10aBC	0,66±0,10aC	1,13±0,04aA	0,76±0,08aC
NCP	1,00±0,00aAB	0,87±0,07aAB	0,93±0,03aAB	0,82±0,10aAB	1,02±0,07aA	0,79±0,15aB
NCS	1,00±0,00aA	0,86±0,02aAB	0,71±0,04aB	0,83±0,09aAB	0,87±0,22aAB	1,01±0,02aA
ARP	1,00±0,00aA	0,80±0,08aA	0,90±0,03aA	0,92±0,02aA	0,96±0,19aA	0,95±0,12aA
ARS	1,00±0,00aA	0,91±0,10aA	1,07±0,03aA	0,99±0,09aA	0,94±0,13aA	0,92±0,25aA
NRP	1,00±0,00aA	0,94±0,01aA	0,87±0,08aA	0,88±0,04aA	1,02±0,06aA	1,05±0,16aA
NRS	1,00±0,00aA	0,92±0,05aA	0,91±0,00aA	0,93±0,12aA	1,09±0,03aA	0,95±0,06aA

*Los valores que no comparten letra son significativamente diferentes, las letras minúsculas indican diferencias entre las columnas, las letras mayúsculas diferencias entre las filas.

del valor inicial, lo que indica oscurecimiento de la muestra. Estos resultados son similares a los presentados por Dussán Sarria *et al.* [24]. Los cambios de color que se presentan en muestras de piña se deben principalmente a reacciones enzimáticas que disminuyen la luminosidad y la pureza del color; en general, las muestras tienden a volverse más oscuras y con un amarillo menos intenso [9].

De acuerdo con el ANOVA y la prueba de Tukey, las coordenadas a*(verde-rojo) y b*(azul-amarillo) mostraron diferencias. Para el parámetro a* se obtuvieron diferencias significativas úni-

camente con el tiempo de almacenamiento (comparando los días 0 y 14), mientras que el tiempo de almacenamiento, el tipo de empaque y el tipo de corte ($p < 0,05$) afectaron significativamente el parámetro b^* , siendo menor en los tratamientos en cubos y en los tratamientos con almohadilla. La disminución en el tiempo de los valores de b^* indica que los trozos adquieren una tonalidad menos amarilla (Figura 3). Buitrago Dueñas *et al.* [25] señala que esto puede deberse a una disminución de los carotenoides asociados a dicha coloración.

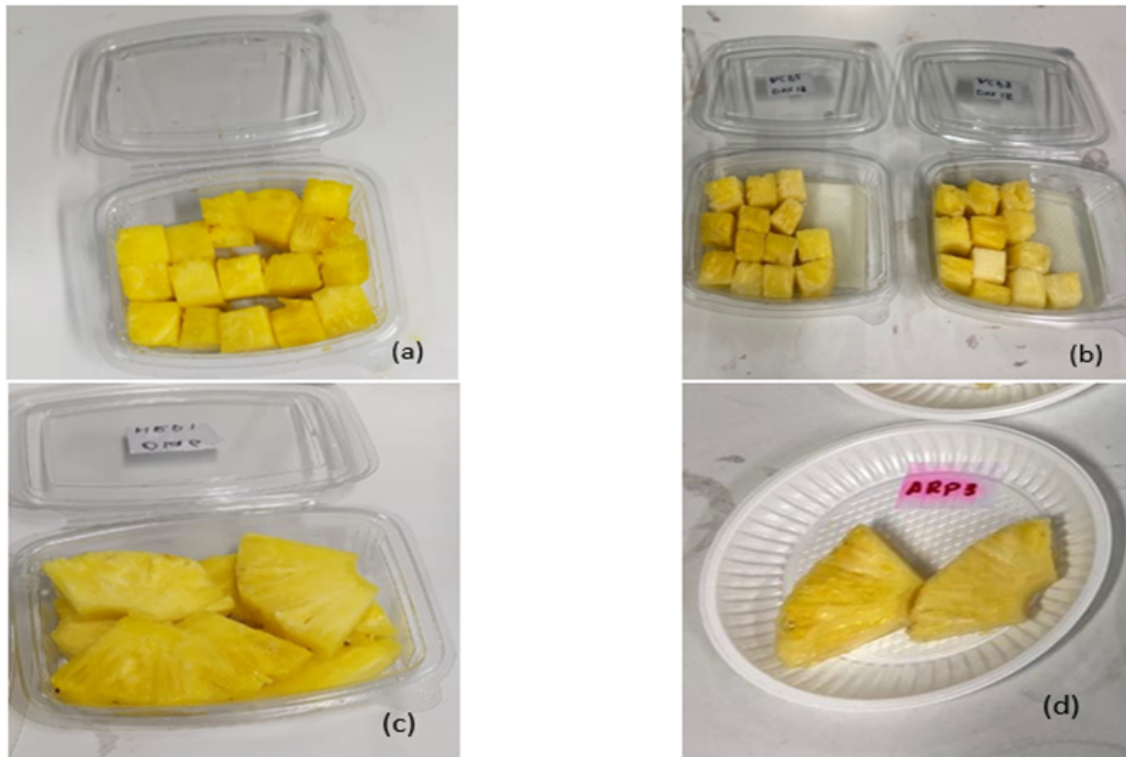
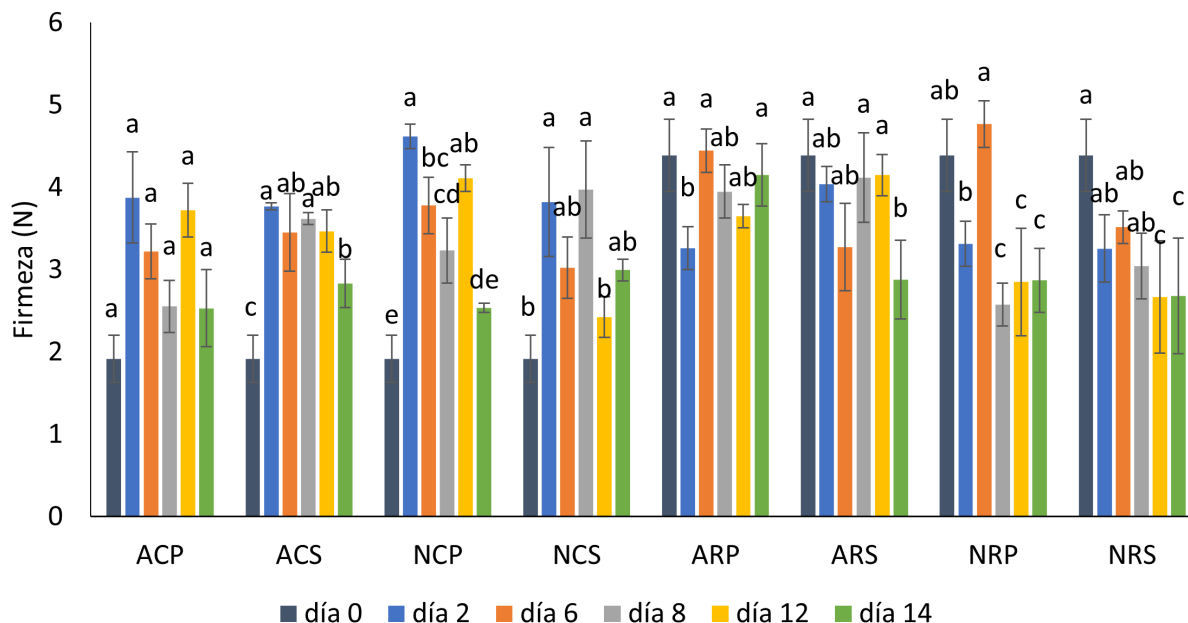


Figura 3. Diferencias de color en las muestras en cubos a) día 0 y b) día 14 y cuartos de rodajas c) día 0 y d) día 14 para los tratamientos ACP y ARP

Montero Calderón *et al.* [26], [27] encontraron disminución significativa de los parámetros L^* y b^* con el tiempo y lo atribuyen directamente al fenómeno de translucidez en la pulpa de la fruta, pero no encontraron diferencias significativas en los tipos de empaque utilizados, mientras que Manzocco *et al.* [11] observaron que los valores de L^* para la variedad MD2 disminuyeron durante los 15 días de almacenamiento y los parámetros a^* y b^* se mantuvieron estables.

3.3. Firmeza

En la Figura 4 se presentan los cambios de firmeza. Comparando estadísticamente los cambios de firmeza en el tiempo para cada tratamiento no se observó una tendencia clara. Debido a la diferencia de los valores iniciales entre las muestras cortadas en cubos y las muestras cortadas en rodajas y a la variabilidad observada (Figura 4), se normalizaron los datos para el análisis estadístico (Tabla III).



Nota: letras diferentes indican diferencias dentro de cada tratamiento.

Figura 4. Cambios de firmeza de muestras de piña mínimamente procesada. ACP (con almohadilla, cubos, preenfriado), ACS (con almohadilla, cubos, sin preenfriado), NCP (sin almohadilla, cubos, preenfriado), NCS (sin almohadilla, cubos, sin preenfriado), ARP (con almohadilla, cuartos de rodaja, preenfriado), ARS (con almohadilla, cuartos de rodaja, sin preenfriado), NRP (sin almohadilla cuartos de rodaja, preenfriado), NRS (sin almohadilla, cuartos de rodaja, sin pre enfriado).

Tabla III. Análisis de varianza y prueba Tukey para la firmeza (con datos normalizados)

Factor	Valor de P	Prueba de Tukey	
		Media	Agrupación
Día 0	0,000	1,0000	C
2		1,4649	A
6		1,3616	A B
8		1,2751	B
12		1,3017	A B
14		1,0927	C
Empaque		0,587	1,2587
Almohadilla	1,2399		A
Sin almohadilla			
Corte	0,000	1,5996	A
Cubos		0,8990	B
Cuartos de rodaja			
Pretratamiento	0,617	1,2407	A
Sin preenfriamiento		1,2579	A
Con preenfriamiento			

Nota: los valores de p <0,05 representan efecto significativo del factor.

De acuerdo con la prueba de Tukey no se presentaron diferencias significativas entre el día 0 y el día 14. Sin embargo, se observó un aumento durante el almacenamiento con una disminución posterior. En cuanto a las demás variables evaluadas (Tabla III), solo el tipo de corte tuvo efecto sobre la firmeza, mostrando que los cubos tuvieron un aumento en la firmeza respecto a la muestra inicial (valor normalizado > 1), mientras que los cuartos de rodaja presentaron menor valor (valor normalizado < 1).

El aumento de la textura después del segundo día de almacenamiento puede deberse al daño mecánico por corte y a la pérdida de agua superficial que ocasionan aceleración en la producción de lignina en los tejidos [28], la cual está asociada con mayor dureza y fibrosidad de los mismos [29]. La disminución de la textura al finalizar el almacenamiento puede deberse a la degradación de la lignina y otros compuestos, debido a factores enzimáticos y físicos que causan pérdida de turgencia en las células [30]. Este efecto es notorio en los cubos, por su mayor área superficial y el mayor daño por corte.

Los valores obtenidos en esta investigación son similares a los presentados por Benítez *et al.* [30] y Singh *et al.* [31]. Finnegan *et al.* [32] reportaron valores superiores (5,3 - 8,3 N) en piña MD2 cortada, empacada en atmósferas modificadas y almacenada a 4 °C. Estudios realizados con otras variedades de piña y usando técnicas de conservación como recubrimientos comestibles han mostrado una disminución significativa en la firmeza de la fruta durante el almacenamiento [33]. Treviño Garza *et al.* [22] y Prakash *et al.* [33] reportaron una disminución de la firmeza durante el almacenamiento en refrigeración de piñas mínimamente procesadas. Treviño Garza *et al.* [22] señalan que a medida que aumenta la pérdida de agua disminuye la firmeza; sin embargo, el uso de un empaque con barrera al vapor de agua y al oxígeno como el PET disminuye la pérdida de agua por deshidratación.

3.4. Sólidos solubles totales, pH y acidez

En la Tabla IV se presentan las propiedades fisicoquímicas (SST, pH y acidez). Los SST variaron entre $12,43 \pm 0,38$ y $17,45 \pm 0,40$ (°Brix). Los valores de pH variaron entre $3,51 \pm 0,07$ y $4,05 \pm 0,03$ y los valores de acidez, expresados como ácido cítrico (%), variaron entre $0,59 \pm 0,01$ y $0,85 \pm 0,07$.

No se encontró efecto significativo de los factores sobre los parámetros anteriores. Estos resultados se deben a las condiciones de almacenamiento a baja temperatura que reducen la velocidad de las reacciones de deterioro del producto y al carácter no climatérico de la piña. Las diferencias observadas entre los tratamientos pueden deberse a la heterogeneidad normal del producto.

Los resultados obtenidos son similares a los presentados por Prakash *et al.* [33], Padrón Mederos *et al.* [34], Buitrago Dueñas [35] y Lima *et al.* [5]. López Córdoba y Aldana Usme [36] y Pizato *et al.* [37] obtuvieron valores similares de acidez para el día 0 en piña fresca cortada, pero estos disminuyeron considerablemente con el tiempo en las muestras empacadas y almacenadas a 4 °C.

En cuanto a los valores de sólidos solubles, Treviño Garza *et al.* [22] observaron un aumento en todos los tratamientos evaluados para piña mínimamente procesada y almacenada a 4 °C. Los valores de SST fueron ligeramente mayores (2 °Brix) a los obtenidos por Finnegan *et al.* [32], Buitrago

Tabla IV. Propiedades fisicoquímicas de piña mínimamente procesada

	día 0	día 2	día 6	día 8	día 12	día 14
SST						
(°Brix)						
ACP	13,47±0,05aAB	14,65±0,79abA	13,82±0,18aAB	13,82±0,18aAB	12,82±0,84aB	12,98±0,33cdB
ACS	13,47±0,05aAB	13,38±0,44bAB	14,10±1,54aA	14,10±1,54aA	12,88±0,99aAB	13,40±0,61bcdAB
NCP	13,47±0,05aA	13,78±1,03bA	13,18±0,69aA	13,18±0,69aA	13,43±0,20aA	13,78±0,20bcdA
NCS	13,47±0,05aAB	13,90±0,91bA	12,68±0,56aAB	12,68±0,56aAB	13,93±0,33aA	12,43±0,38dB
ARP	14,13±0,57aA	15,22±1,29abA	15,92±0,39aA	15,92±0,39aA	15,17±0,71aA	14,53±1,00abcA
ARS	14,13±0,057aC	16,58±0,85aAB	17,45±0,40aA	17,45±0,40aA	14,70±0,48aC	14,15±0,93abcdC
NRP	14,13±0,57aC	17,07±0,88aA	14,20±0,26aC	14,20±0,26aC	15,27±0,93aBC	14,88±0,43abBC
NRS	14,13±0,57abA	15,57±0,64abA	15,37±2,63aA	15,37±2,63aA	15,22±0,95aA	15,92±0,75aA
pH						
ACP	3,85±0,02aA	3,90±0,04aA	3,83±0,03abA	3,83±0,03abA	3,81±0,08aA	3,91±0,07abA
ACS	3,85±0,02aB	3,98±0,10aAB	3,91±0,06abAB	3,91±0,06abAB	3,87±0,05aB	4,07±0,06aA
NCP	3,85±0,02aA	3,81±0,02abA	3,83±0,02aA	3,83±0,02aA	3,85±0,04aA	3,81±0,01bA
NCS	3,85±0,02aAB	3,96±0,04aA	3,75±0,05aB	3,75±0,05aB	3,88±0,08aAB	3,78±0,08bB
ARP	3,78±0,07aAB	3,51±0,08cB	3,85±0,11bA	3,85±0,11bA	3,91±0,17aA	3,88±0,15abA
ARS	3,78±0,07aA	3,64±0,06bcA	3,78±0,13bA	3,78±0,13bA	3,76±0,03aA	3,82±0,17abA
NRP	3,78±0,07aAB	3,66±0,09bcB	3,71±0,03abAB	3,71±0,03abAB	3,79±0,06aAB	3,87±0,03abAB
Acidez						
ACP	0,67±0,01aA	0,65±0,05bA	0,67±0,01aA	0,67±0,01aA	0,68±0,03aA	0,66±0,02bA
ACS	0,67±0,01aAB	0,64±0,08bAB	0,65±0,01aAb	0,65±0,01aAb	0,70±0,02aA	0,60±0,02bB
NCP	0,67±0,01aA	0,66±0,02bA	0,63±0,00aA	0,63±0,00aA	0,64±0,01aA	0,67±0,01bA
NCS	0,67±0,01aA	0,65±0,01bAB	0,68±0,01aA	0,68±0,01aA	0,62±0,02aB	0,64±0,00bAB
ARP	0,74±0,02aAB	0,82±0,04aA	0,60±0,05aB	0,60±0,05aB	0,75±0,08aAB	0,69±0,09bAB
ARS	0,74±0,02aAB	0,68±0,01bAB	0,83±0,13aA	0,83±0,13aA	0,70±0,04aAB	0,81±0,07aAB
NRP	0,74±0,02aA	0,70±0,03bAB	0,73±0,00aA	0,73±0,00aA	0,67±0,02aB	0,61±0,01bC
NRS	0,74±0,02aA	0,75±0,04abA	0,85±0,07aA	0,85±0,07aA	0,72±0,09aAB	0,59±0,01bB

*Los valores que no comparten letra son significativamente diferentes, las letras minúsculas indican diferencias entre las columnas, las letras mayúsculas diferencias entre las filas.

Dueñas [35], Ding y Syazwani [38] y Mercado Ruiz *et al.* [39] para piñas variedad MD2. Esto puede ser un indicador competitivo para comercializar internacionalmente este tipo de producto, debido a su alto contenido de azúcares, lo que aumenta el sabor dulce de la fruta.

3.5. Vitamina C, contenido total de polifenoles y capacidad antioxidante

En la Tabla V se presenta el contenido de ácido ascórbico (AA), el contenido total de polifenoles (CTP) y la capacidad antioxidante (CA), y en la Tabla VI se muestra la prueba de Tukey para los

datos normalizados. Los valores del contenido de vitamina C y del contenido total de polifenoles encontrados son superiores a los reportados en otras investigaciones [23], [37].

Tabla V. Contenido de ácido ascórbico, compuestos fenólicos totales y capacidad antioxidante de piña mínimamente procesada

	día 0	día 2	día 6	día 8	día 12	día 14
AA						
(mg/kg)						
ACP	244,28±12,47aA	197,67±14,30cdA	184,40±12,47aA	175,22±28,69bA	189,17±35,68aA	206,18±4,08bA
ACS	244,28±12,47aA	212,64±12,92bcdAB	192,23±12,18aBC	192,91±36,74bBC	182,36±10,72aBC	145,28±12,18bC
NCP	244,28±12,47aA	178,96±16,53dBC	192,40±20,92aB	118,06±23,22cD	141,87±10,61bCD	150,04±0,00cBCD
NCS	244,28±12,47aA	155,48±15,69dBC	137,79±27,00bBC	121,12±20,27cBC	113,30±1,02bC	165,35±14,47cB
ARP	201,40±30,89bC	329,66±19,38aA	249,46±1,48aB	216,00±23,13aB	194,51±7,64aC	188,94±20,66bcC
ARS	201,40±30,89bBC	252,90±15,47bcA	234,53±6,70aAB	234,86±13,58aAB	184,67±11,66aC	223,38±18,44bcAB
NRP	201,40±30,89bAB	255,85±27,39bcA	242,73±12,30aA	238,14±29,08aA	202,71±22,18aAB	177,46±15,32aB
NRS	201,40±30,89bB	262,08±35,35bA	220,10±21,83bAB	219,77±2,84aAB	172,21±16,55aB	265,04±20,32aA
CTP						
(mg AGE /100g)						
ACP	49,02±0,70aA	36,11±3,25bcB	24,26±1,72bC	37,92±4,88aB	31,38±4,32abBC	27,13±3,74bcC
ACS	49,02±0,70aB	63,19±4,72aA	22,67±1,13bD	7,50±1,42eE	32,17±5,61abC	20,01±3,71cdeD
NCP	49,02±0,70aA	31,61±5,53bcC	20,94±2,03bD	13,61±3,52dDE	40,04±0,36aB	11,77±1,47eE
NCS	49,02±0,70aA	32,12±4,30bcB	23,77±3,22bC	13,74±0,35dD	24,10±3,74bC	19,87±0,82cdeCD
ARP	22,50±2,00bAB	30,49±6,97cA	26,24±4,14aAB	27,06±2,15bcAB	23,46±3,09bAB	18,29±2,22dB
ARS	22,50±2,00bB	43,56±0,00bA	29,99±6,63aB	25,71±4,70bcB	26,47±1,70bB	21,46±2,70cdB
NRP	22,50±2,00bC	26,88±3,18cABC	31,62±3,79aABC	32,39±4,63abAB	23,90±0,57bBC	33,43±4,26abA
NRS	22,50±2,00bB	37,16±0,22bcA	33,90±2,88aA	21,85±0,02cdB	35,27±8,21abA	38,62±3,64aA
CA						
(mM TE/ 100g)						
ACP	30,81±0,33aA	23,62±4,42bBC	24,04±0,00bABC	29,91±2,78aAB	16,26±3,36bC	26,71±4,67bAB
ACS	30,81±0,33aA	31,96±1,37bA	23,90±2,82bA	10,76±2,09bB	24,67±5,08abA	26,94±4,33bA
NCP	30,81±0,33aA	25,47±2,67bAB	17,43±2,46cBC	11,28±1,01bC	29,26±5,01abBCD	23,27±4,94bAB
NCS	30,81±0,33aA	24,56±5,53bAB	15,65±2,82cCD	13,10±2,42bD	21,12±2,14aA	23,72±3,75bABC
ARP	30,66±0,23aA	32,18±1,06aA	27,85±3,86aA	29,73±3,06aA	31,04±2,95abA	30,33±2,07aA
ARS	30,66±0,23aA	31,43±4,19aA	30,79±0,10abA	26,56±1,52aA	30,45±5,01abA	29,64±4,10aA
NRP	30,66±0,23aA	29,47±3,41aA	31,22±3,04abA	28,10±0,29aA	26,83±3,94abA	31,39±2,63aA
NRS	30,66±0,23aA	29,98±4,09aA	23,00±0,00abA	27,50±4,33aA	21,82±3,30abA	30,98±4,53aA

*Los valores que no comparten letra son significativamente diferentes, las letras minúsculas indican diferencias entre las columnas, las letras mayúsculas diferencias entre las filas.

En la Tabla VI se observa efecto significativo ($p < 0,05$) del tiempo de almacenamiento sobre las variables de respuesta. De acuerdo con la prueba de Tukey, la vitamina C tiene una pérdida en el día 2 de almacenamiento, pero se mantiene constante durante el resto del almacenamiento. En forma similar, el contenido de polifenoles y la capacidad antioxidante presentan una disminución inicial, pero mantienen este valor a partir del día 6 de almacenamiento.

El tipo de corte y el preenfriamiento tuvieron efecto significativo sobre la vitamina C. Las muestras cortadas en cuartos de rodaja se mantuvieron en un valor similar al inicial (valor normalizado cercano a 1), mientras que el corte en cubos provocó una disminución (26 %) (valor normalizado < 1). La disminución en el contenido de vitamina C puede deberse a la degradación de este compuesto por efecto de los procesos metabólicos naturales de la fruta, los cuales se aceleran cuando existe mayor daño superficial en el tejido (corte en cubos) [10]. Padrón Mederos *et al.* [34] obtuvieron resultados similares. Por otra parte, se presentó menor pérdida cuando se realizó preenfriamiento. Este efecto también se presentó en productos como manzanas y melones [13].

En el caso del contenido total de polifenoles, solamente el tipo de corte tuvo efecto significativo. Se encontró que para cuartos de rodaja, el contenido total de polifenoles no varió significativamente (13 %) durante el almacenamiento (valor normalizado cercano a 1) en comparación con una alta pérdida (65 %) observada en muestras cortadas en cubos (valor normalizado < 1). Esto se puede deber a que hubo menor daño mecánico en el producto, disminuyendo la liberación de enzimas que aceleran procesos propios de oxidación en la fruta y generan deterioro de la fruta [33].

Tabla VI. Análisis de varianza y prueba Tukey para el contenido de vitamina C, el contenido total de polifenoles y la capacidad antioxidante (datos normalizados)

Factor	Contenido de vitamina C			Contenido de polifenoles			Capacidad antioxidante		
	Valor de p	Prueba de Tukey		Valor de p	Prueba de Tukey		Valor de p	Prueba de Tukey	
		Media	Grupo		Media	Grupo		Media	Grupo
Día									
0	0,000	1,0000	A	0,000	1,0000	A	0,000	1,0000	B
2		0,9060	B		0,9861	A		1,1735	A
6		0,9313	A B		0,7028	B		0,6118	C D
8		0,8551	B C		0,6812	B		0,5838	D
12		0,8002	B C		0,8032	A B		0,6994	C D
14		0,8487	B C		0,8350	A B		0,7352	C
Empaque									
Almohadilla	0,837	0,8920	A	0,831	0,8299	A	0,014	0,8322	A
Sin almohadilla		0,8884	A		0,8394	A		0,7689	B
Corte									
Cubo	0,000	0,7304	B	0,000	0,5350	B	0,000	0,6234	B
Cuarto rodaja		1,0500	A		1,1345	A		0,9778	A
Preenfriamiento									
Sin	0,001	0,8614	B	0,298	0,8577	A	0,003	0,7627	B
Con		0,9191	A		0,8117	A		0,8386	A

Nota: los valores de $p < 0,05$ representan efecto significativo del factor.

El aumento significativo del contenido de polifenoles en el día 2 en algunos tratamientos (Tabla V) puede deberse a procesos metabólicos propios de la fruta que buscan cicatrizar el tejido que ha sido dañado y frenar el daño microbiológico. La activación de rutas metabólicas asociadas a la producción de compuestos fenólicos, debida al corte, ha sido estudiada en diferentes tejidos mostrando que al ocurrir daño mecánico (corte) se presentan picos de producción de compuestos fenólicos que se bioacumulan en las células y realizan una labor cicatrizante del tejido [28]. Montero Calderón *et al.* [27] reportaron comportamientos similares.

Por otro lado, el tipo de empaque, el tipo de corte y el preenfriamiento tuvieron efecto sobre la capacidad antioxidante. Los tratamientos con almohadilla, cortados en cuartos de rodaja y con preenfriamiento presentaron los valores más altos. Estos resultados se pueden asociar directamente con el mayor contenido de compuestos fenólicos y de vitamina C. Tanto la vitamina C como los compuestos fenólicos presentes en la fruta actúan como agentes protectores frente al daño causado por el oxígeno en el tejido superficial del fruto después de un daño mecánico [41].

4. Conclusiones

La piña mínimamente procesada y empacada en PET con y sin almohadilla absorbente conservó su calidad durante 14 días de almacenamiento, conservando sus características iniciales. El corte en cuartos de rodaja fue el más adecuado con menores pérdidas de peso (9 %), vitamina C (< 12 %), polifenoles (< 19 %) y capacidad antioxidante (< 3 %) y menor cambio de color (L^* y b^*). Aunque el preenfriamiento no mostró un efecto significativo sobre la mayoría de los parámetros estudiados, sí contribuyó a la conservación de la vitamina C y a la capacidad antioxidante.

El uso de almohadillas absorbentes ha sido poco estudiado en frutas mínimamente procesadas, su aplicación en otros tipos de frutas y en combinación con otros empaques es una alternativa para este tipo de productos. Se requieren estudios adicionales de pruebas microbiológicas para validar y justificar su uso.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Sistema General de Regalías (proyecto “Incremento de la competitividad sostenible en la agricultura de ladera en todo el Departamento, Valle del Cauca, Occidente”) ejecutado por la Universidad Nacional de Colombia (Sede Palmira), la Universidad del Valle y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), a través del convenio No. 039-2018.

Referencias

- [1] C. Leneveu-Jenvrin, B. Quentin, S. Assemet, M. Hoarau, J.-C. Meile, and F. Remize, “Changes of quality of minimally-processed pineapple (*Ananas comosus*, var. ‘Queen Victoria’) during cold storage: Fungi in the leading role”, *Microorganisms*, vol. 8, no. 2, 2020. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020185> ↑2
- [2] M. Montero-Calderón, M. A. Rojas-Graü, and O. Martín-Belloso, “Effect of packaging conditions on quality and shelf-life of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*)”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 50, no. 2-3, pp. 182-189, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.014> ↑2, 7

- [3] V. Chonhenchob, D. Tanafranca, and S. P. Singh, "Packaging technologies for pineapple and pineapple products", *Handb. Pineapple Technol. Postharvest Sci. Process. Nutr.*, pp. 108-125, 2016. <https://doi.org/10.1002/9781118967355.ch6> ↑2
- [4] N. Azarakhsh, A. Osman, H. Mohd Ghazali, C. P. Tan, and N. M. Adzahan, "Effects of gellan-based edible coating on the quality of fresh-cut pineapple during cold storage", *Food Bioprocess Technol.*, vol. 7, pp. 2144-2151, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1261-6> ↑2, 6
- [5] P. C. Carvalho Lima, B. Sarzi de Souza, and S. Fyfe, "Influence of storage temperature and different packaging on the physicochemical quality of fresh-cut 'Perola' pineapple", *Idesia*, vol. 37, no. 2, pp. 13-19, 2019. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000200013> ↑2, 11
- [6] G. Gorrasi, V. Bugatti, L. Vertuccio, V. Vittoria, B. Pace, M. Cefola, L. Quintieri, P. Bernardo, G. Clariziae, "Active packaging for table grapes: Evaluation of antimicrobial performances of packaging for shelf life of the grapes under thermal stress", *Food Packag. Shelf Life*, vol. 25, pp. 2-7, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100545> ↑2
- [7] G. A. Nayik, and K. Muzaffar, "Developments in packaging of fresh fruits-shelf life perspective: A review", *Am. J. Food Sci. Nutr. Res.*, vol. 1, no. 5, pp. 34-39, 2014. <http://www.openscienceonline.com/journal/archive2?journalId=744&paperId=1197> ↑2
- [8] C. Wilson, *Influences of Modified Atmosphere Packaging and Drip Absorbents on the Quality, Safety, and Acceptability of Fresh-Cut Cantaloupe* (Master's Thesis), Michigan State University, 2017. ↑2
- [9] P. Rocculi, E. Cocci, S. Romani, G. Sacchetti, and M. Dalla Rosa, "Effect of 1-MCP treatment and N₂O MAP on physiological and quality changes of fresh-cut pineapple", *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 51, pp. 371-377, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.07.010> ↑2, 8
- [10] T. N. Perecin, L. C. Silva, M. N. Harder, A. C. Oliveira, R. Arevalo, and V. Arthur, "Evaluation of the effects of gamma radiation on physical and chemical characteristics of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Meer) cv. Smooth Cayenne minimally processed", *Prog. Nucl. energy*, vol. 53, no. 8, pp. 1145-1147, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.06.015> ↑2, 14
- [11] L. Manzocco, S. Plazzotta, M. Maifreni, S. Calligaris, M. Anese, and M. C. Nicoli, "Impact of UV-C light on storage quality of fresh-cut pineapple in two different packages", *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 65, pp. 1138-1143, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.007> ↑2, 9
- [12] D. Wang, Y. Lai, B. Jia, R. Chen, and X. Hui, "The optimal design and energy consumption analysis of forced air pre-cooling packaging system", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 165, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114592> ↑3
- [13] Y. Duan, G.-B. Wang, O. A. Fawole, P. Verboven, X.-R. Zhang, D. Wu, U. L. Opara, B. Nicolai, K. Chena, "Postharvest precooling of fruit and vegetables: A review", *Trends in Food Science and Technology*, vol. 100, pp. 278-291, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.027> ↑3, 14
- [14] A. M. Elansari, and Y. S. Mostafa, "Vertical forced air pre-cooling of orange fruits on bin: Effect of fruit size, air direction, and air velocity", *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 92-98, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.06.006> ↑3
- [15] Y. Garrido, J. A. Tudela, and M. I. Gil, "Comparison of industrial precooling systems for minimally processed baby spinach", *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 102, pp. 1-8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2014.12.003> ↑3
- [16] A. M. Elansari, "Design aspects in the precooling process of fresh produce", *Fresh Prod.*, vol. 3, no. special issue 1, pp. 49-55, 2009. ↑3
- [17] AOAC, *AOAC Official Method 942.15 Acidity (Titratable) of Fruit Products*, 2000. ↑5
- [18] E. A. Ainsworth, and K. M. Gillespie, "Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent", *Nat. Protoc.*, vol. 2, no. 4, pp. 875-877, 2007. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102> ↑5
- [19] B. Ozturk, C. Parkinson, and M. Gonzalez-Miquel, "Extraction of polyphenolic antioxidants from orange peel waste using deep eutectic solvents", *Sep. Purif. Technol.*, vol. 206, pp. 1-13, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.052> ↑5
- [20] J. Zambrano, A. Valera, M. Maffei, W. Materano, I. Quintero y K. Graterol, "Efecto de un recubrimiento comestible formulado con mucílago del cactus (*Opuntia elatior* Mill.) sobre calidad de frutos de piña mínimamente procesados", *Bioagro*, vol. 29, no. 2, pp. 129-136, 2017. ↑6
- [21] K. K. Gaikwad, S. Singh, and A. Ajji, "Moisture absorbers for food packaging applications", *Environ. Chem. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 609-628, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0810-z> ↑7

- [22] M. Z. Treviño-Garza, S. García, N. Heredia, M. G. Alanís-Guzmán, and K. Arévalo-Niño, “Layer-by-layer edible coatings based on mucilages, pullulan and chitosan and its effect on quality and preservation of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*)”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 128, pp. 63-75, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.007> ↑7, 11
- [23] B. Yousuf, and A. K. Srivastava, “Impact of honey treatments and soy protein isolate- based coating on fresh-cut pineapple during storage at 4 °C”, *Food Packag. Shelf Life*, vol. 21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100361> ↑7, 13
- [24] S. Dussán-Sarria, M. C. Rivera y C. A. García-Mogollon, “Almacenamiento refrigerado de piña mínimamente procesada. Cambios en atributos físico-químicos y sensoriales”, *Inf. tecnológica*, vol. 31, no. 2, pp. 11-18, 2020. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000200011> ↑8
- [25] E. M. Buitrago-Dueñas, S. Dussán-Sarria, M. C. Rivera-Ochoa, and L. E. Ordoñez-Santos, “Efecto del tipo de corte y tipo de envase en la conservación de piña [*Ananas comosus* (L.) Merr.] ‘Oro Miel’ mínimamente procesada”, *Rev. Colomb. Ciencias Hortícolas*, vol. 12, no. 2, pp. 308-318, 2018. ↑9
- [26] M. Montero-Calderón, A. Rojas-Graü, and O. Martín-Belloso, “Effect of packaging conditions on quality and shelf-life of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*)”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 50, no. 2-3, pp. 182-189, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.03.014> ↑9
- [27] M. Montero-Calderón, A. A. Rojas-Graü, I. Aguiló-Aguayo, R. Soliva-Fortuny, and O. Martín-Belloso, “Influence of modified atmosphere packaging on volatile compounds and physicochemical and antioxidant attributes of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*)”, *J. Agric. Food Chem*, vol. 58, no. 8, pp. 5042-5049, 2010. <https://doi.org/10.1021/jf904585h> ↑9, 15
- [28] A. Becerra-Moreno, M. Redondo-Gil, J. Benavides, V. Nair, L. Cisneros-Zevallos, and D. A. Jacobo-Velázquez, “Combined effect of water loss and wounding stress on gene activation of metabolic pathways associated with phenolic biosynthesis in carrot”, *Front. Plant Sci.*, vol. 6, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00837> ↑11, 15
- [29] S. K. Jha, H. R. Singh, and P. Prakash, “Dietary fiber and human health: An introduction”, in *Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease: Fiber’s Interaction between Gut Microflora, Sugar Metabolism, Weight Control and Cardiovascular Health*, Elsevier, 2017, pp. 1-22. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805130-6.00001-X> ↑11
- [30] S. Benítez, M. Chiumenti, F. Sepulcre, I. Achaerandio, and M. Pujolá, “Modeling the effect of storage temperature on the respiration rate and texture of fresh cut pineapple”, *J. Food Eng.*, vol. 113, no. 4, pp. 527-533, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.022> ↑11
- [31] S. P. Singh, V. Chonhenchob, Y. Chantarasomboon, and J. Singh, “Testing and evaluation of quality changes of treated fresh-cut tropical fruits packaged in thermoformed plastic containers”, *J. Test. Eval.*, vol. 35, no. 5, pp. 522-528, 2007. <https://doi.org/10.1520/JTE100166> ↑11
- [32] E. Finnegan, P. V. Mahajan, M. O’Connell, G. A. Francis, and D. O’Beirne, “Modelling respiration in fresh-cut pineapple and prediction of gas permeability needs for optimal modified atmosphere packaging”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 79, pp. 47-53, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.12.015> ↑11
- [33] A. Prakash, R. Baskaran, and V. Vadivel, “Citral nanoemulsion incorporated edible coating to extend the shelf life of fresh cut pineapples”, *LWT*, vol. 118, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108851> ↑11, 14
- [34] M. Padrón-Mederos, B. Rodríguez-Galdón, C. Díaz-Romero, M. G. Lobo-Rodrigo, and E. M. Rodríguez-Rodríguez, “Quality evaluation of minimally fresh-cut processed pineapples”, *LWT*, vol. 129, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109607> ↑11, 14
- [35] E. M. Buitrago-Dueñas, *Conservación de piña oro miel (Ananas comosus) mínimamente procesada: efecto de tipo de corte, tipo de envase y recubrimiento comestible* (Trabajo de grado - Maestría), Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 2017. ↑11, 12
- [36] A. López-Córdoba, and A. Aldana-Usme, “Edible coatings based on sodium alginate and ascorbic acid for application on fresh-cut pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.)”, *Agron. Colomb.*, vol. 37, no. 3, pp. 233-238, 2019. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n3.76173> ↑11
- [37] S. Pizato, R. C. Chevalier, M. F. Dos Santos, T. S. Da Costa, R. Arévalo Pinedo, and W. R. Cortez Vega, “Evaluation of the shelf-life extension of fresh-cut pineapple (Smooth cayenne) by application of different edible coatings”, *Br. Food J.*, vol. 121, no. 7, pp. 1592-1604, 2019. <https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2018-0780> ↑11, 13
- [38] P. Ding, and S. Syazwani, “Physicochemical quality, antioxidant compounds and activity of MD-2 pineapple

- fruit at five ripening stages”, *International Food Research Journal*, vol. 23 no. 2, pp. 549-555, 2016. [http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/29351/1/\(14\).pdf](http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/29351/1/(14).pdf) ↑12
- [39] J. N. Mercado-Ruiz, O. Tortoledo-Ortiz y J. M. García-Robles, “Calidad comercial de piña MD2 (*Ananas comosus* L.) tratada en postcosecha con ácido 2-hidroxibenzoico”, *Rev. Iberoam. Technol. Postcosecha*, vol. 20, no. 2, 2019. ↑12
- [40] S. P. Kochhar, and C. J. Henry, “Oxidative stability and shelf-life evaluation of selected culinary oils”, *Int. J. Food Sci. Nutr.*, vol. 60, no. sup. 7, pp. 289-296, 2009. <https://doi.org/10.1080/09637480903103774> ↑
- [41] E. A. Ferreira, H. E. Siqueira, E. V. Vilas Boas, V. Stahl Hermes, A. De Oliveira Rios, “Bioactive compounds and antioxidant activity of pineapple fruit of different cultivars”, *Rev. Bras. Frutic.*, vol. 38, no. 3, 2016. <https://doi.org/10.1590/0100-29452016146> ↑15

Claudia L. Vargas

Ingeniera de alimentos de la Universidad del Valle, Magíster en Ciencias - Biotecnología de la Universidad Icesi, candidata a Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle.
Correo electrónico: Claudia.vargas@correounivalle.edu.co

Vanessa González

Ingeniera de Alimentos y Magíster en Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle. Profesora auxiliar de la Universidad del Valle sede Palmira y sede Tuluá.
Correo electrónico: vanessa.gonzalez.torres@correounivalle.edu.co

Claudia Ochoa-Martínez

Ingeniera Química, Magíster en Ingeniería Química y Doctora en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Alimentos. Profesora en la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle. Dirige el grupo de investigación GIPAB y es investigadora Senior según clasificación de Minciencias.
Correo electrónico: claudia.ochoa@correounivalle.edu.co

Carlos Vélez Pasos

Ingeniero Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería Agrícola y Doctor en Ingeniería de Alimentos de la Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle. Miembro del grupo GIPAB e investigador Senior según clasificación de Minciencias.
Correo electrónico: carlos.velez@correounivalle.edu.co

Aprovechamiento energético sostenible de un recurso geotermal: caso sala de dosificación de la Planta Luis Prieto Gómez

Sustainable Energy Use of a Geothermal Resource: The Case of the Luis Prieto Gómez Plant Dosing Room

Beatriz Eugenia Ospina Betancur^{id}*¹, **Walter Murillo Arango**^{id}²

¹Ingeniera Ambiental y Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales (Manizales, Colombia), ²Centro de investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo (CIMAD). Universidad de Manizales. E-mail: wmurillo@umanizales.edu.co

*Correspondence e-mail: ytteb1992@hotmail.com

Recibido: 27/08/2020. Modificado: 10/08/2021. Aceptado: 29/09/2021.

Abstract

Context: Water treatment as an industrial process requires energy for its operation, so, in order to supply the electrical energy that requires the heating of the room in which the dosing process of chemical products is performed, the exploration of alternative energies was proposed through the determination of the environmental and financial viability of a heating system, which uses the heat of the thermal water from the Nevado del Ruiz volcano that reaches the Luis Prieto Gómez Plant.

Method: A mixed type research was conducted by means of a field study to characterize the context of its use, a specialized advice to determine the heating system, and a bibliographic review to perform the financial analysis by cash flow, the environmental analysis by carbon footprint, and the sustainability of the proposal.

Results: The context of the heat use was determined, and the thermal load required inside the room was characterized. Based on this characterization, it was established that a circuit system of tubular heat exchangers generated operational viability with an economic saving projection of 78 %, in comparison with a conventional system and a reduction of environmental impacts represented by a decrease of 3,25 annual tons of CO₂ emitted into the atmosphere.

Conclusions: The incorporation of energy sustainability for the generation of operating conditions for water treatment was achieved, starting from the conception of the use of thermal water as a renewable resource, together with the production of heat through a closed lifecycle, thus demonstrating a dialogue between the economic, environmental, and social spheres as required by sustainable development.

Keywords: carbon footprint, environmental sustainability, thermal load, thermal water, heating

Language: Spanish

Open access



Cite as: Ospina, B. E., Murillo, W. "Aprovechamiento energético sostenible de un recurso geotermal: caso sala de dosificación de la Planta Luis Prieto Gómez". *Ing*, vol. 27, no. 1, 2022. e16913.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.16913>

Resumen

Contexto: La potabilización de agua como proceso industrial demanda energía para su operación, así que con el fin de suplir la energía eléctrica que requiere la calefacción del ambiente de la sala en la que se realiza la dosificación de productos químicos, se exploró la matriz energética no convencional mediante la determinación de la viabilidad ambiental y financiera de un sistema de calefacción sostenible que aprovechara el calor del agua termal que llega a la Planta Luis Prieto Gómez proveniente del Volcán Nevado del Ruiz.

Método: Se realizó una investigación de tipo mixto mediante un diseño de campo para caracterizar el contexto del aprovechamiento, una asesoría especializada para determinar el sistema de calefacción y una revisión bibliográfica para abordar el análisis financiero por flujo de caja, el análisis ambiental por huella de carbono y la sostenibilidad de la propuesta.

Resultados: Se determinó el contexto del aprovechamiento del calor y se caracterizó la carga térmica requerida al interior de la sala, con lo cual se estableció que un sistema de intercambiadores de calor tubulares generaba la viabilidad operativa, con una proyección de ahorro económico de un 78 % frente a un sistema convencional y una reducción de impactos ambientales representados en 3,25 toneladas de CO₂ menos emitidas a la atmósfera anualmente.

Conclusiones: Se respondió a la incorporación de la sostenibilidad energética para la generación de las condiciones operativas dentro de la producción de agua potable en la planta, partiendo desde la concepción del uso del agua termal como recurso renovable, sumado a la producción de calor por medio de un ciclo de vida cerrado, demostrando un diálogo entre las esferas económica, ambiental y social como lo requiere el desarrollo sostenible.

Palabras clave: huella de carbono, sostenibilidad ambiental, carga térmica, agua termal, calefacción

Idioma: Español

1. Introducción

Dentro de los problemas ambientales actuales más importantes se encuentra la sobreexplotación de recursos con el fin de obtener energía eléctrica, la cual es el principal motor de la economía y de la sociedad y por tanto demanda cantidades extraordinarias para satisfacer las necesidades de la población. Es así que a partir de esta problemática surge la iniciativa de la exploración de la matriz de energía no convencional para satisfacer una demanda industrial que produce uno de los elementos vitales para una población como lo es el agua potable.

La planta de tratamiento de agua Luis Prieto Gómez ubicada en el departamento de Caldas (Colombia) abastece al 70 % de la población del municipio de Manizales, generando un aproximado de 2.000.000 de metros cúbicos de agua potable al mes, siendo así la principal planta de la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. [1]. El proceso productivo del agua potable como todo proceso industrial demanda energía para su transformación, en este caso, especialmente los subprocesos de coagulación, floculación y estabilización del pH. Dentro de la coagulación y la estabilización del pH se encuentra la dosificación de productos químicos, la cual debe realizarse en condiciones ambientales apropiadas para el buen funcionamiento de los equipos dosificadores y de los productos que se adicionan al agua, pero por la ubicación de la Planta Luis Prieto en zona de temperaturas bajas en promedio de 15 °C y humedades altas, del 90 % en promedio, se generan condiciones que no son óptimas para la dosificación correcta de los químicos, generando problemas operativos de incrustación del material en los sistemas dosificadores.

La energía geotérmica se define como “el calor que se produce en el interior de la tierra y es transferido a la superficie” [2, p. 7]. Es considerada una de las alternativas más viables para la sustitución de las energías convencionales gracias a que “el potencial geotérmico almacenado en los diez kilómetros exteriores de la corteza terrestre supera en 2.000 veces a las reservas mundiales de carbón” [3, p. 39]. Esta energía se encuentra acumulada en el núcleo de la tierra y emerge a la superficie por las fracturas geológicas, principalmente en volcanes y pozos de agua termal. “Los países con mayores recursos, en orden de importancia, son China, Estados Unidos, Canadá, Indonesia, Perú y México” [3, p. 39] y se han explotado mayormente en países con pocos recursos hidráulicos para generación de energía y con estaciones climáticas para el acondicionamiento de temperaturas de espacios.

La energía geotermal ha sido aprovechada desde épocas antiguas en diferentes formas, por ejemplo para fines eléctricos: en 1919 en Japón se perforaron los primeros pozos geotermales en Beppu, seguidos en el año 1921 por pozos perforados en The Geysir, California, y en el Tatio, Chile; igualmente Italia fue uno de los países pioneros en el aprovechamiento para energía eléctrica, en el año 1942 la capacidad geo-termoeléctrica instalada alcanzaba los 127.650 KW. Posterior a esto, en 1958 entra en operación una pequeña planta geo-termoeléctrica en Nueva Zelanda, en 1959 otra en México y en 1960 en Estados Unidos [4, p. 5].

En lo que se refiere a usos no eléctricos, en el año 2000 se reportó una capacidad instalada de 15.135 MWt y una energía utilizada de 199.699 TJ/año, siendo 58 países los reportados con usos directos [4, p. 7]. Como lo exponen Lund y Freeston, “El uso no eléctrico más común en el mundo (en términos de capacidad instalada) corresponden a bombas de calor (34,80 %), seguido de baños (26,20 %), calefacción (21,62 %), invernaderos (8,22 %), acuicultura (3,93 %) y procesos industriales (3,13 %)” [4, p. 7]. El potencial energético de las aguas termales depende del perfil de temperatura, por ejemplo los sistemas de calefacción permiten intervalos de temperatura muy amplios, pudiendo ser aprovechados recursos con bajas y altas entalpías. Los sistemas de baja entalpía se ubican en el intervalo de “temperaturas entre los 10 y 30 °C con profundidades de 2 metros” [5, p. 49], hasta los 300 metros si mantiene estabilidad térmica a lo largo del perfil.

Colombia se encuentra dentro de los países con un lento desarrollo en el campo geotérmico y no cuenta con proyectos de generación de energía por medio de este recurso; a pesar que en los años 70 se realizaron estudios sobre potencial geotérmico nacional, solo se explotan estos recursos con fines recreativos en balnearios. Los motivos principales por los cuales se explica el poco avance de este campo en el país son los costos elevados en los estudios de exploración y modelación, el limitado acceso a las zonas con potencial geotérmico, ya que se ubican en zonas volcánicas, la poca normativa que respalda las iniciativas de aprovechamiento y la falta de mecanismos de regulación de este tipo de energía en el mercado [2, pp. 31-32].

A pesar de esto, en el país se han despertado intereses investigativos y de ejecución como el del proyecto piloto de cuarto frío desarrollado en 2017 por la empresa SAGG S.A.S., en el cual se realizó de manera exitosa la refrigeración de un cuarto de 90 m³ a partir de un recurso geotermal de baja entalpía para cubrir la demanda de 14 kW [6]. Por su parte, la Asociación Geotérmica de Colombia representada en la Reunión Nacional de Geotermia, celebrada en la última ocasión en el año 2018 en Bogotá, sirve como punto de encuentro para este trabajo [7]. Lo anterior permite

visualizar que a pesar de las dificultades evidenciadas, la construcción de futuro para la geotermia en el territorio nacional es posible, con entes conformados que respaldan las iniciativas investigativas de este tipo en todos los campos de aprovechamiento, pasando del escenario recreativo al de obtención de energía en todas sus formas a partir del abundante recurso.

Reuniendo lo expuesto, como alternativa se planteó la adecuación de la sala de dosificación a condiciones climáticas óptimas, a partir del aprovechamiento del recurso termal que llega actualmente a la planta, con fines de uso químico para la coagulación del agua, pero sus propiedades físicas están siendo desaprovechadas y liberadas a la atmósfera. Es así que se propone la evaluación operativa, financiera y ambiental del uso del calor del agua termal para la climatización de la sala de dosificación, mediante un sistema de calefacción que responda a las necesidades de los procesos productivos de una manera sostenible, a partir de un recurso renovable brindado por el Volcán Nevado del Ruiz, frente a un sistema convencional de calefacción, todo en el marco del desarrollo sostenible.

2. Materiales y métodos

2.1. Estudio de campo

El estudio de campo se desarrolló en la Planta de Tratamiento Luis Prieto Gómez ubicada en el municipio de Villamaría (Caldas). En la Figura 1 se presenta una vista general de la PTAP y su ubicación espacial específica y en la Figura 2 se muestra un mapa geológico de la zona de influencia, tanto de la planta como del afloramiento termal que es usado en el proceso de potabilización del agua.

La fase inicial de investigación se planteó de tipo experimental cuantitativa con recolección directa mediante medición de las variables de temperatura de agua termal, temperatura ambiente, temperatura de la sala de dosificación, y humedad relativa de ambiente y de la sala, a través de los equipos de medición, tanto para el punto de llegada del agua termal (punto 1 en la Figura 3) como para la sala de dosificación (punto 3 en la Figura 3), los cuales fueron construidos de manera propia; estos equipos tuvieron un proceso de verificación de error en la lectura para establecer la confiabilidad de los datos. Los equipos construidos e instalados fueron un medidor de temperatura sumergible para el agua termal y un equipo termohigrómetro para medición de temperatura y humedad dentro de la sala de dosificación; la medición de la temperatura y la humedad ambiente se obtuvo a partir de la estación hidrometeorológica de la quebrada Cajones propiedad de Aguas de Manizales S.A. E.S.P. Los datos recolectados se consignaron en una matriz de caracterización para tratamiento estadístico básico por valores máximos, mínimos y promedios por medio del programa Microsoft Excel.

2.2. Oferta y demanda calórica

Para garantizar la temperatura óptima de dosificación de los productos químicos se realizó la caracterización estructural la sala de dosificación, mediante revisión de planos, ubicación y linderos, así como determinación de materiales constructivos, los cuales inciden en el balance de materia y energía del aire de la sala y por tanto en el comportamiento de la temperatura interna; esta ca-



Figura 1. Ubicación geográfica de la Planta Luis Prieto Gómez

Fuente: elaboración propia adaptada de [8].

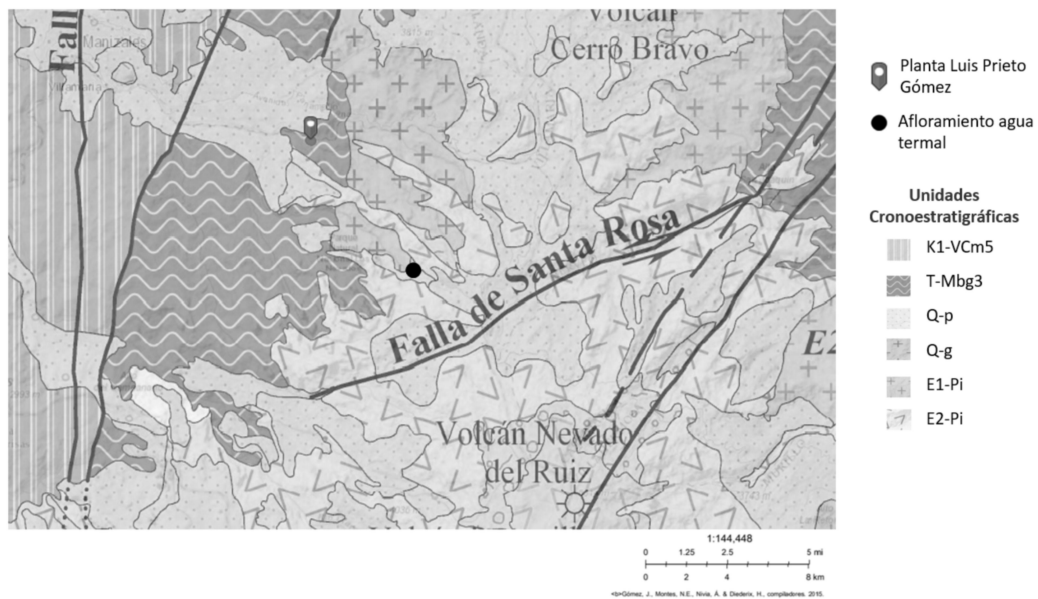


Figura 2. Mapa geológico de la zona de influencia de la Planta Luis Prieto Gómez y del afloramiento termal

Fuente: elaboración propia adaptada de [9].



Figura 3. Ubicación de puntos críticos en el estudio de campo: 1. Punto de llegada de agua termal, 2. Punto de aprovechamiento químico del agua termal, 3. Sala de dosificación de productos químicos y la línea punteada la conducción existente del agua termal

racterización se utilizó para calcular la carga térmica total requerida para obtener las condiciones óptimas de dosificación de los productos sólidos, siendo una temperatura de 21 °C y una humedad relativa de 50 %, según recomendaciones de los fabricantes de los químicos, así como para evitar condensación en paredes.

El cálculo de la carga térmica partió con la caracterización del recinto mediante una modelación en 3D en el software IFC Builder del edificio de operación completo; el modelo se exportó al software Cypetherms Loads [10], en el cual se definieron los materiales constructivos del edificio para obtener la conductividad de los diferentes componentes y por medio del método de cálculo MSTR (Series Temporales Radiantes) [11], de la ASHRAE (Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire acondicionado), se calculó la carga térmica de la sala de dosificación, definida por la Ecuación (1).

$$Q = q = U \cdot A \cdot (t_i - t_o) \quad (1)$$

Donde:

Q : Carga sensible de calefacción (W)

q : Pérdida de calor (w)

U : Coeficiente de transmisión térmica global del hueco ($\frac{W}{m^2K}$)

A : Área del hueco (ventana o puerta) incluyendo el marco (m^2)

t_i : Temperatura interior del recinto (°C)

t_o : Temperatura seca exterior (°C)

Con el perfil de temperatura del recurso geotermal como oferta calorífica y las necesidades de temperatura ambiente a partir de la caracterización estructural de la sala de dosificación como

demanda de calor, se procedió a realizar la búsqueda comercial del sistema de aprovechamiento del calor del agua termal que cumpliera los requerimientos. Los parámetros que se convirtieron en el insumo para la elección del sistema fueron los resultados obtenidos en la carga térmica del software Cypetherms Loads.

2.3. Estudio financiero y ambiental

Con los sistemas de generación y distribución determinados se realizó la valoración económica del escenario en pesos colombianos, esta se llevó a cabo analizando el flujo de caja mediante la Ecuación (2).

$$\text{Flujo de caja} = -\text{Inversión} + (\text{ingresos} - \text{egresos}) \quad (2)$$

El modelo de flujo de caja asoció los ingresos, los costos y la inversión inicial del proyecto de aprovechamiento energético en un periodo de un año, para el interés investigativo se tuvieron en cuenta como inversión inicial el valor de suministro e instalación de los sistemas de calefacción, como costos los valores de mantenimientos preventivos y de consumo energético de la red eléctrica para cada sistema, y los ingresos se consideraron como cero, debido a que no fue un proyecto que planteara entradas monetarias.

Para determinar el valor por kilovatio de energía se calculó un promedio del cobro por la empresa de energía desde enero de 2019 hasta abril de 2020, obteniendo un valor de \$ 401,9. En cuanto al concepto de mantenimiento, se consideró el valor actual que el contratista de la empresa demanda para realizar las visitas preventivas de revisión de los sistemas de aire acondicionados en las diferentes sedes, siendo de \$ 76.700 + IVA por visita, dichas visitas están establecidas con una periodicidad trimestral.

Por último se realizó el análisis ambiental con el fin de determinar los impactos del sistema planteado por medio del cálculo de la huella de carbono expresada en las toneladas de CO₂ emitidas, comparado con un sistema de calefacción convencional, mediante la Ecuación (3), a partir de los consumos eléctricos que posee cada uno de los sistemas. El cálculo de la huella de carbono incorporó un valor del factor de emisión de CO₂ del SIN (Sistema Interconectado Nacional) establecido por la Unidad de Planeación Minero Energética de 0,13 TCO₂/MWh [12, p. 20] para proyectos por consumo de energía eléctrica, es así que se consideraron los consumos de electricidad respectivos de cada sistema de calefacción como dato de actividad y el factor de emisión proyectado al año.

$$TCO_2 = DA \cdot FE \quad (3)$$

Donde:

TCO_2 : Toneladas de dióxido de carbono emitidas

DA : Datos de la actividad. Representa el consumo expresado en su contenido energético (MW)

FE : Factor de emisión $\frac{TCO_2}{MWh}$

3. Resultados

3.1. Estudio de campo

La recolección de datos se realizó durante los meses de noviembre y diciembre de 2019 y enero y febrero de 2020, abarcando en estos cuatro meses rangos de clima variados, con condiciones desfavorables de humedad alta y temperatura baja típicas en los meses de noviembre y diciembre y condiciones más favorables de temperaturas mayores en los meses de enero y febrero. Estos registros arrojaron un total de 22.080 datos, repartidos proporcionalmente para cada variable investigativa, con una frecuencia de 30 minutos cada una. A partir del registro de temperatura del agua termal que llega a la Planta Luis Prieto Gómez se caracterizó la fuente dentro de un contexto apto para el aprovechamiento en aplicaciones de climatización de ambientes, puesto que se obtuvo un valor más bajo en el mes de enero con 45,6 °C. Además con el valor máximo registrado durante todo el periodo en el mismo mes de enero de 51°C como se muestra en la Figura 4, se avaló al recurso con gran potencial de aprovechamiento en calefacción.

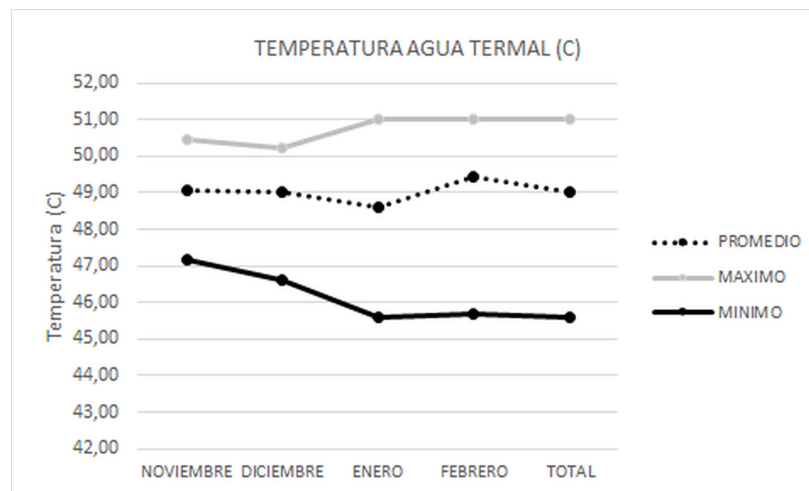


Figura 4. Temperatura mensual del recurso termal

En cuanto a la caracterización ambiental externa de la Planta Luis Prieto Gómez, se identificó la condición menos favorable en una temperatura de 7 °C en los meses de enero y febrero, y la más favorable igualmente en el mes de febrero con un registro de 26 °C, como se presenta en la Figura 5. La condición más favorable o menos favorable hizo alusión a la condición de temperatura y humedad más o menos cercana a la deseada para el comportamiento óptimo de los productos químicos y de los sistemas de dosificación en la sala. En promedio la temperatura ambiente registrada fue 15 °C, condición que afecta el comportamiento de los productos químicos.

La humedad relativa ambiental que se obtuvo en las mediciones denotó unas condiciones poco favorables durante el 90 % del tiempo registrado, con valores por encima del 80 % HR, lo que ratifica que el proceso productivo se encuentra sometido a variables climáticas condicionadas a la ubicación geográfica propia de la planta en un bosque de niebla. Como se ve en la Figura 6, en todos los meses se registraron valores del 100 % de humedad y el valor mínimo fue registrado en el mes de enero con 59 %. Los valores individuales de esta variable presentaron a noches y madrugadas

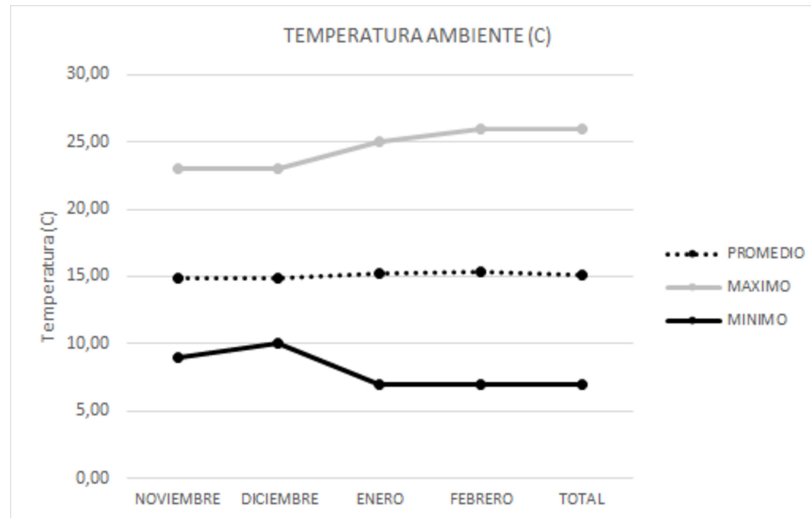


Figura 5. Temperatura mensual del ambiente

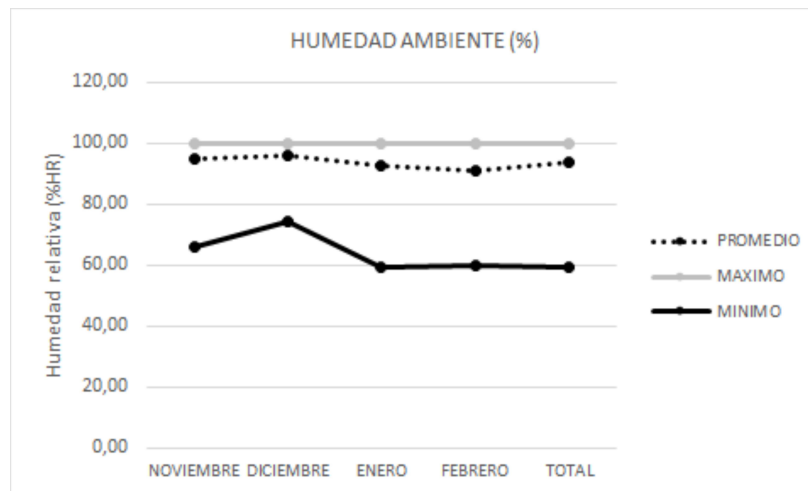


Figura 6. Humedad relativa mensual del ambiente

como los espacios horarios en los que se obtuvieron las peores condiciones de humedad ambiental en la planta, con valores cercanos al 100 % HR.

Pasando a la caracterización interna de la sala de dosificación de productos químicos, en la Figura 7 se evidencia que la temperatura mayor registrada se presentó en el mes de enero con 18,5 °C y la inferior en el mismo mes con un valor de 10,2 °C, asociada a una humedad relativa máxima de 93 % en los meses de enero y febrero, y una mínima de 78 % en el mes de enero como se muestra en la Figura 8, lo que confirmó la necesidad de acondicionamiento de la sala de dosificación en su temperatura y humedad interna para responder a las condiciones recomendadas en el manejo de productos químicos.

La caracterización ambiental interna y externa permitió establecer que las condiciones internas a pesar de encontrarse influenciadas por las condiciones climáticas externas poseen una dinámica propia, puesto que los muros de la envolvente de la sala crean una protección y un acondicionamien-

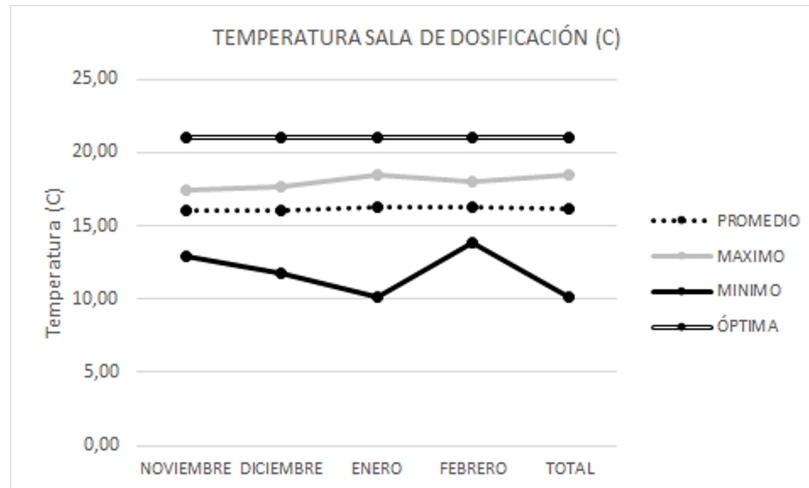


Figura 7. Temperatura mensual al interior de la sala

to al interior, registrando valores inferiores, con mayor estabilidad y favorabilidad en comparación con las condiciones exteriores como se muestra en las Figuras 9 y 10, en las cuales se evidencia que tanto la temperatura como la humedad externa presentaron cambios mayores en sus valores extremos, diferente a lo ocurrido dentro de la sala, donde los cambios fueron en menor medida extremos, manteniendo condiciones propias internas, lo cual favorece la demanda térmica, es decir, requiere menos demanda de calor para tener las condiciones de temperatura y humedad dentro del espacio.

A partir de los análisis estadísticos mensuales se realizó la caracterización final del contexto de calefacción, con lo cual se obtuvieron las condiciones más y menos favorables, tanto ambientalmente como al interior de la sala de dosificación, durante el periodo de medición, como se muestra en la Tabla I. Los datos recolectados evidenciaron que el 70 % del tiempo en el que se tomaron registros, la temperatura se encontró por debajo de los 20 °C y la humedad por encima del 60 %, lo que ratificó nuevamente la necesidad de acondicionamiento de la sala de dosificación cuando se presenten las variaciones de las condiciones óptimas para lograr un comportamiento eficiente en la dosificación de productos químicos.

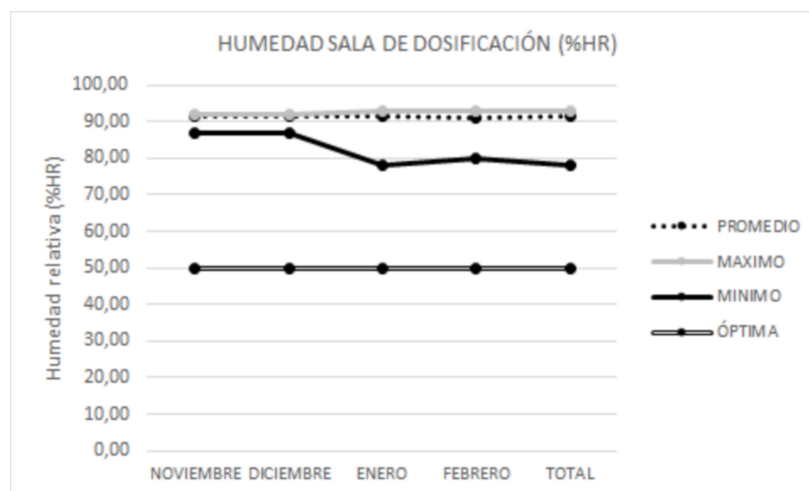


Figura 8. Humedad relativa mensual al interior de la sala

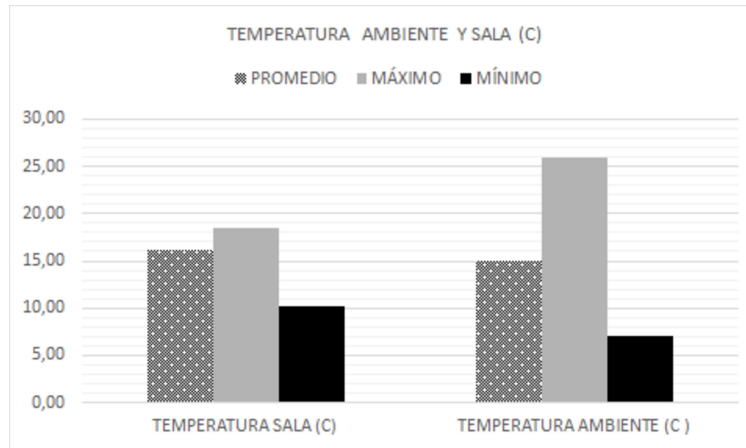


Figura 9. Variaciones en temperatura interna y externa

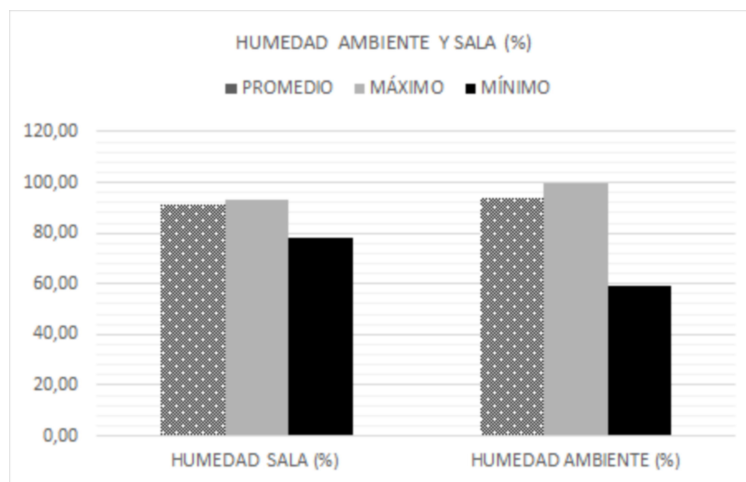


Figura 10. Variaciones en humedad interna y externa

Tabla I. Caracterización final del contexto de calefacción

PARÁMETROS FINALES DEL CONTEXTO DE CALEFACCIÓN					
	TEMPERATURA AGUA TERMAL (C)	TEMPERATURA AMBIENTE (C)	HUMEDAD AMBIENTAL (%)	TEMPERATURA SALA (C)	HUMEDAD SALA (%)
PROMEDIO	49,04	15,08	93,51	16,19	91,44
MÁXIMO	51,00	26,00	100,00	18,50	93,00
MÍNIMO	45,60	7,00	59,00	10,20	78,00

Para el interés investigativo se consideraron las condiciones menos favorables como las temperaturas más bajas y las humedades relativas más altas dentro de la sala de dosificación como las más importantes, puesto que definen las características del sistema de aprovechamiento de calor, el cual debe cambiar esas condiciones desfavorables y llevarlas al rango óptimo. En consecuencia, se definió una temperatura de 10,2 °C y una humedad de 87 % como las condiciones críticas internas del sistema de generación de calor para la sala de dosificación de la Planta Luis Prieto Gómez y como condiciones críticas externas una temperatura de 7 °C y una humedad del 100 %, como se muestran en las Figuras 11 y 12, las cuales caracterizan finalmente el contexto actual para la demanda de la calefacción.

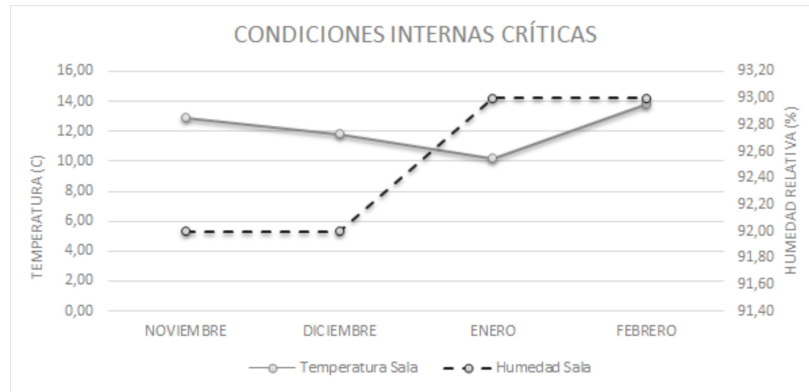


Figura 11. Condiciones críticas en la sala de dosificación

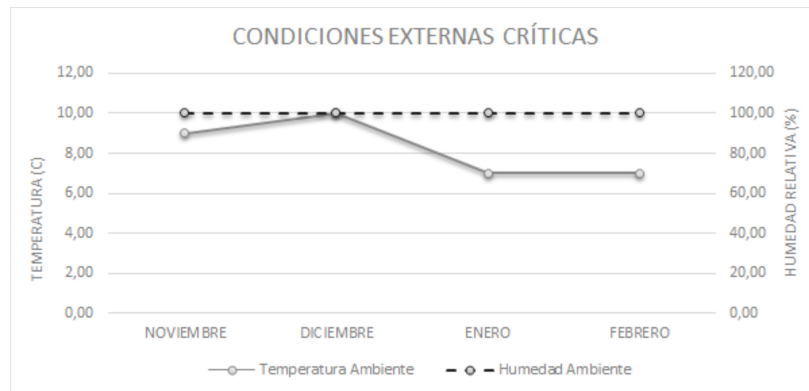


Figura 12. Condiciones críticas externas

3.2. Oferta y demanda calórica

3.2.1. Demanda calórica

Para el cálculo de la demanda calórica de la sala de dosificación se realizó el levantamiento del modelo en 3D del edificio de operación de la Planta Luis Prieto en el software IFC Builder. Los cortes principales se muestran en la Figura 13. A partir de este modelo, el software Cypetherms Loads calculó la carga térmica de la sala de dosificación por un valor de 6.819 W, como se muestra en la Tabla II.

Tabla II. Carga de calefacción sala de dosificación Planta Luis Prieto Gómez

CARGA TOTAL DE CALEFACCIÓN						
CARGA TOTAL POR UNIDAD DE SUPERFICIE (W/m2)	FACTOR DE CALOR SENSIBLE	CARGA LATENTE (W)	MAYORACIÓN DE LA CARGA LATENTE (5,0 %) (W)	CARGA SENSIBLE (W)	MAYORACIÓN DE LA CARGA SENSIBLE (5,0 %) (W)	CARGA TOTAL DE CALEFACCIÓN
109,11	0,97	219	11	6275	314	6819 W

Fuente: Informe carga máxima de calefacción (Cypetherms Loads).

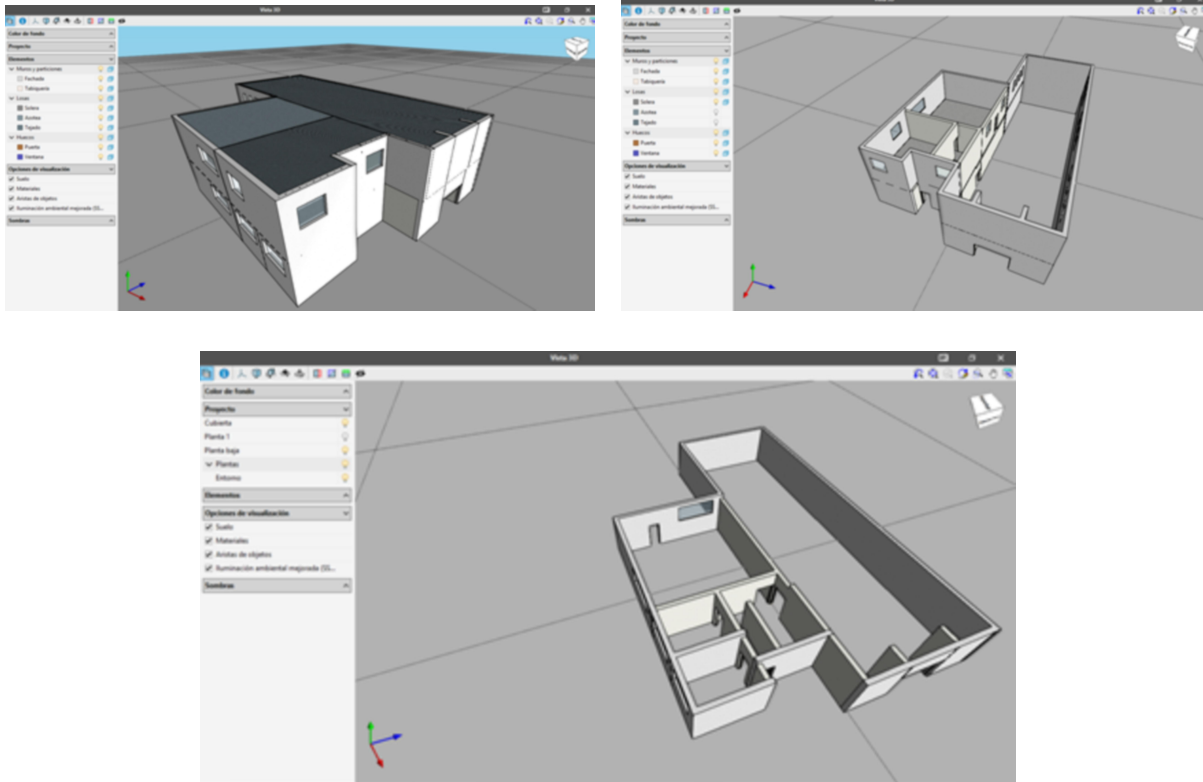


Figura 13. Vista 3D del edificio de operación de la Planta Luis Prieto Gómez. Vista general (superior izquierda), planta superior (superior derecha), planta inferior (inferior)

Fuente: elaboración propia mediante IFC Builder.

3.2.2. Sistema de calefacción

A partir de la caracterización de oferta y demanda calórica del contexto de la Planta Luis Prieto Gómez se procedió a la búsqueda del sistema de calefacción que respondiera a las condiciones de uso del recurso termal. Para lo anterior se concretó una visita con un asesor especializado, quien partiendo de los datos de demanda y oferta de calor determinó como sistema más eficiente un circuito de intercambiadores de calor, el cual permite la distribución del calor por medio de radiación mediante el recorrido del agua termal a través de los tubos, los cuales estarían distribuidos en las paredes de la sala de dosificación. Con esta disposición, el recurso termal después de la liberación del calor es devuelto al proceso de coagulación de agua en la planta de tratamiento, generando un uso en cascada de la fuente tanto en sus propiedades físicas como químicas.

3.3. Estudio financiero y ambiental

3.3.1. Estudio financiero

La valoración del costo de inversión inicial para el sistema de calefacción termal se determinó por un total de \$ 4.000.000 + IVA, según cotización brindada por la empresa Tecnicas & Artingas, y el costo para el sistema de calefacción convencional por un total de \$ 11.010.071 + IVA, según cotización de la empresa Grupo Ema Ingeniería. Como consumo energético en el caso del sistema

termal, el único componente que requiere alimentación de la red eléctrica es la bomba de recirculación con un consumo de 1 KW y en el caso del sistema convencional que se alimenta de la red eléctrica, un consumo de 6,7 KW, y para ambos se consideró un promedio de funcionamiento de 12 horas al día.

Con los valores de inversión inicial, ingresos y costos para cada sistema se obtuvo el flujo de caja que se presenta en la Tabla III, lográndose un ahorro económico anual significativo del sistema de calefacción termal frente a un sistema convencional de \$ 18.403.311, debido al consumo energético global del sistema y al costo de inversión de equipos.

Tabla III. Flujo de caja de sistemas de calefacción

FLUJO DE CAJA		
AÑO 1		
ITEM	SISTEMA TERMAL	SISTEMA CONVENCIONAL
INVERSIÓN INICIAL	-\$ 4.760.00,00	-\$ 13.101.984,49
INGRESOS	\$ -	\$ -
Valor por consumo energético (\$)	\$ 1.765.145	\$ 11.826.470
Mantenimiento	\$ 365.092	\$ 365.092
COSTOS	\$ 2.130.237	\$ 12.191.562
FLUJO NETO	-\$ 6.890.237	-\$ 25.293.547

3.3.2. Estudio ambiental

La huella de carbono del proyecto se calculó con una generación al año de 0,57 toneladas de CO₂ para el sistema termal y para el sistema convencional de 3,83 toneladas, como se muestra en el Tabla IV. Lo anterior permitió evidenciar que el sistema de calefacción termal proyecta un ahorro de 3,25 toneladas de CO₂ emitidas al año.

Tabla IV. Huella de carbono de sistemas de calefacción

HUELLA DE CARBONO		
ITEM	SISTEMA TERMAL	SISTEMA CONVENCIONAL
Consumo energético (MW)	0,001	0,0067
Factor de emisión (TCO ₂ /MWh)	0,13	
Toneladas CO ₂ /año	0,57	3,83

3.4. Análisis de resultados a la luz de la sostenibilidad ambiental

Como eje de la investigación se planteó la sostenibilidad del aprovechamiento energético y es entonces que para abordar un proyecto desde esta perspectiva, más allá de evaluar los impactos

ambientales, se debe partir desde el análisis de la propia concepción del desarrollo sostenible como el que “satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” [13], en tanto un proyecto sostenible relaciona y equilibra las esferas ambiental, social y económica mediante un diálogo que permite la ejecución productiva sin sacrificio social o ambiental.

Adicionalmente la sostenibilidad de la propuesta se debe abordar desde la naturaleza propia del recurso, puesto que tal como lo plantea Valgardur Stefansson, “los conceptos renovable y sostenible no son comparables. Renovable describe una propiedad del recurso energético, mientras que sostenible describe cómo se utiliza el recurso” [14, p. 883], pero sí son complementarios, es decir para tener una operación sostenible, se debe contar con un recurso renovable, cumpliendo con la premisa que una explotación sostenible es la que se realiza a una escala inferior a la de recarga del recurso, para lo cual esta propuesta se acoge a la concesión otorgada por la Corporación Autónoma Corpocaldas a la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P. para la utilización del recurso, garantizando la sostenibilidad del uso y la renovación del recurso en su escala de recarga.

Ligado a esto, la sostenibilidad también depende, entre otras, de “la tecnología para explotar, transportar y utilizar el calor natural” [15, p. 139], presentándose así como ventaja resaltable, debido a que se realiza el aprovechamiento de un recurso que aflora naturalmente sin requerir un proceso de perforación y extracción. En lo referente al transporte, el recurso termal es captado y transportado por medio de tubería plástica hasta la planta de tratamiento, transporte que es avalado y supervisado por Corpocaldas, puesto que por las características de esta agua termal, una infiltración en el tramo del recorrido representaría una alteración de ecosistemas, afectando las condiciones biológicas dentro de la reserva forestal protectora; igualmente, el sitio de llegada y almacenamiento del agua en la planta es monitoreado frente a filtraciones para evitar alteraciones en un ecosistema que no está adaptado a las características de este tipo de agua.

Dentro de la sostenibilidad surge la sostenibilidad energética enfocada en las alternativas que permiten satisfacer las demandas de energía en una concordancia con los objetivos de conservación y buen uso de los recursos naturales. Y es precisamente en esta sostenibilidad donde se ubica este aprovechamiento, con miras a la solución de un problema técnico a partir de una alternativa ambientalmente amigable, utilizando medios no convencionales de energía como las aguas termales, que son un recurso natural considerado renovable, además se aplicó el uso en cascada, que es un término de economía circular que se refiere a la optimización del uso del recurso para varios fines específicos, con el propósito de “diversificar la reutilización a través de las fases de una cadena de valor” [16, p. 4], en este caso para el tratamiento de agua y para la generación de calor.

El proceso de generación de calor del sistema se produce además mediante un ciclo cerrado de calefacción; es decir, no se generan residuos o salidas no aprovechables del sistema, el agua termal que entra para liberar el calor dentro de la sala de dosificación sale en igual cantidad y continúa hacia su aprovechamiento químico en el proceso productivo del agua potable, sin generar desperdicios en ninguna etapa, respondiendo así a un ciclo de vida del sistema con menores impactos negativos asociados a la producción del calor. Y a pesar que este sistema demandó alimentación eléctrica para la bomba de recirculación, representó un 85 % menos de consumo de energía convencional respecto a la dependencia total del sistema convencional del fluido eléctrico provisto por la

empresa de servicio público, cuya fuente de generación hidráulica asocia efectos adversos como la degradación de ecosistemas acuáticos, impactos en la biodiversidad, generación de gases de efecto invernadero y efectos sísmicos [17, p. ii].

Sumado a lo anterior, los sistemas de aire acondicionado convencionales utilizan como medio de transformación y transporte de calor productos químicos llamados refrigerantes, los cuales poseen características adversas en su disposición final al cumplir su ciclo de vida, impactando al medio ambiente por la liberación de gases de efecto invernadero; elementos que no se presentaron en el sistema termal, debido a que no precisó de refrigerantes o sustancias con características negativas para el medio ambiente en su uso o disposición.

4. Conclusiones

El aprovechamiento energético para la calefacción de la sala de dosificación de la Planta Luis Prieto Gómez a partir de un recurso geotermal es una alternativa viable operativa, económica y ambientalmente, debido a la sinergia de los factores de oferta y demanda calorífica que posibilitan las condiciones ambientales óptimas para el funcionamiento adecuado de la dosificación de productos químicos en el proceso de potabilización del agua, con impactos ambientales menores, respondiendo a la sostenibilidad energética.

Se logró incorporar la sostenibilidad energética en la generación de condiciones operativas de tratamiento de agua utilizando agua termal como recurso renovable. Además, esta investigación mostró la producción de calor a través de un ciclo de vida cerrado, demostrando así, una correlación entre las esferas económica, ambiental y social, como se requiere en el desarrollo sostenible. En adición, este aprovechamiento aporta como referente para intereses investigativos o de aplicación real posteriores, atendiendo al diálogo ambiental y productivo, satisfaciendo una demanda energética dentro un proceso industrial.

Referencias

- [1] Aguas de Manizales S.A. E.S.P., *Aguas de Manizales*, 2019. [En línea]. <https://www.aguasdemanizales.com.co/Portals/Aguas2016/NuestraEmpresa/Documentos/Presentaci%C3%B3n%20Aguas%202019.pdf> ↑2
- [2] N. C. Marzolf, *Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia*, Isagen; BID, 2014. [En línea]. <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6558/Energia%20Geotermica%20Colombia%207-1-14finalweb.pdf> ↑3
- [3] J. Santamarta, "Las energías renovables son el futuro", *World Watch*, no. 22., 2004. [En línea]. <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/511.pdf> ↑3
- [4] M. H. Dickson y M. Fanelli, *¿Qué es la energía geotérmica?*, Pisa, Italia: Instituto di Geoscienze e Georisorse (IGG), s.f. [En línea]. http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1_d505_4825_9db3_8438d78a406c.PDF ↑3
- [5] J. B. Torres Cruces, *Climatización de sala multiuso mediante energía geotérmica de baja entalpía* (Tesis de grado), Universidad Andrés Bello (Chile), 2017. [En línea] http://repositorio.unab.cl/xmlui/bitstream/handle/ria/3515/all8547-Torres_J_Climatizacion_de_sala_multiuso_mediante_2017_Tesis.pdf ↑3

- [6] A. Ortiz Fernández, “Caso exitoso en Colombia del aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía para climatización”, *Reunión Nacional de Geotermia*, Manizales 2017, 2017. ↑3
- [7] RENAG, *Reunión Nacional de Geotermia*, 2018. [En línea]. <https://www.ageocol.org/> ↑3
- [8] Google Earth. [Online]. <https://earth.google.com/web/@5.02033365,-75.42360294,2316.06538304a,1200.21035588d,35y,0h,0t,0r> ↑5
- [9] J. Gómez, N. E. Montes, Á. Nivia y H. Diederix (compiladores), *Atlas Geológico de Colombia 2015*. Escala 1:500 000. Servicio Geológico Colombiano, 26 planchas. Bogotá, 2015. [En línea]. http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Atlas_Geologico_colombiano_2015/ ↑5
- [10] CYPE Ingenieros, “Cypetherm Loads. Carga térmica de los edificios”, s.f. [En línea]. <http://cypetherm-loads.cype.es/> ↑6
- [11] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), *Guía técnica. Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*, Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía IDEA, 2008. [En línea]. https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_13_Guia_tecnica_Procedimientos_y_aspectos_de_la_simulacion_termicas_en_edificios_72a7f4d6.pdf ↑6
- [12] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “Cálculo del Factor de Emisión de CO₂ del SIN 2018 - Dic 2019”, 2019. [En línea] <https://www1.upme.gov.co/siame/Paginas/calculo-factor-de-emision-de-Co2-del-SIN.aspx> ↑7
- [13] R. Bermejo, *Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis*, Bilbao (Esp.): UPV/EHU, 2014. [En línea] <https://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0686956.pdf> ↑15
- [14] V. Stefansson, “The renewability of geothermal energy”, *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, 2000. [Online]. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0776.PDF> ↑15
- [15] Z. I. González Acevedo, “La sustentabilidad de la energía geotérmica y sus impactos ambientales”, *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, vol. 9, no. 3, 2017. [En línea]. https://iydt.files.wordpress.com/2018/02/3-1_la-sustentabilidad-de-la-energ%C3%ADa-geot%C3%A9rmica-y-sus-impactos-ambientales.pdf ↑15
- [16] Ellen MacArthur Foundation, “Hacia una Economía Circular. Resumen Ejecutivo”, 2014. [En línea]. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/EMF_Spanish_exec_pages-Revise.pdf ↑15
- [17] Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente, AIDA, *Grandes represas en América. ¿Peor el remedio que la enfermedad?*, 2009. [En línea]. https://aida-americas.org/sites/default/files/featured_pubs/informe_aida_grandes_represas.pdf ↑16

Beatriz Eugenia Ospina Betancur

Ingeniera Ambiental, Universidad Católica de Manizales, Colombia. Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales, Colombia. Coordinadora Profesional del proceso de Potabilización de la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
Correo electrónico: ytteb1992@hotmail.com; beatriz.ospina@ucm.edu.co

Walter Murillo Arango

Licenciando en Biología y Química. Magíster en Ciencias Químicas. Doctor en Ciencias Químicas. Docente de planta de la Universidad del Tolima, adscrito al Departamento de Química de la Facultad de Ciencias. Docente de la Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales, adscrito al Centro de Investigación en Medio Ambiente y Desarrollo (CIMAD).

Efecto de la potencia y número de aspas de un aireador rotativo sobre la transferencia de oxígeno disuelto en agua

Effect of the Power and Number of Paddles of a Rotatory Aerator on Dissolved Oxygen Transfer in Water

Cesar René Blanco-Zuñiga^{id}*¹, **Dalia Soraya Useche-de-Vega**^{id}², **Nicolás Rojas-Arias**^{id}**^{1,2}

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia., ²Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, São Carlos, Brasil.

E-mail: *cesar.blanco@uptc.edu.co, **nicolas.rojas@estudante.ufscar.br

Recibido: 20/01/2021. Modificado: 30/09/2021. Aceptado: 05/10/2021.

Abstract

Context: Dissolved oxygen (DO) transfer is an important matter for water quality. Several devices have been designed to supply the required DO in some bodies of water during their treatment and restoration. However, these entail a high energy consumption, thus requiring the optimization of use parameters.

Method: This work studies the effect of the power and number of paddles used in a horizontal axis aerator. Measurements were made on anoxic water samples using three mechanical aerating devices made up of 6, 12, and 24 paddles while varying the rotation speed from the supplied voltage.

Results: The highest values obtained for the transfer coefficient $K_L a$ are reported by devices with a greater number of blades. Nevertheless, the Standard Aeration Efficiency (SAE) and the Standard Oxygen Transfer Rate (SOTR) efficiency reveal that the 6-paddle wheels are more energy-efficient.

Conclusions: It is shown that DO transfer does not depend solely on the impacts associated with the number of paddles, and that the maximum transfer efficiency is obtained with a lower number of paddles. These results contribute to improving the understanding of the operation of these mechanical systems in terms of DO transfer.

Keywords: mechanical aerator, dissolved oxygen (DO), paddle wheel number, Standard Aeration Efficiency (SAE), Standard Oxygen Transfer (SOTR)

Language: Spanish

Open access



Cite as: C. Blanco-Zuñiga, D. Useche de Vega, N. Rojas-Arias. "Efecto de la potencia y número de aspas de un aireador rotativo sobre la transferencia de oxígeno disuelto en agua". *Ing.*, vol. 27, no. 1, 2022. e17467.

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

<https://doi.org/10.14483/23448393.17467>

Resumen

Contexto: La transferencia del oxígeno disuelto (OD) es un tema de importancia para la calidad del agua. Diversos dispositivos se han diseñado para suministrar el OD requerido en algunos cuerpos de agua durante su tratamiento y restauración; sin embargo, estos conllevan un alto consumo de energía, requiriendo optimizar los parámetros de uso.

Método: Este trabajo estudió el efecto de la potencia y número de aspas utilizadas en un aireador de eje horizontal. Las mediciones se realizaron en muestras de agua anóxica, utilizando tres dispositivos aireadores conformados por 6, 12 y 24 aspas, variando la velocidad de rotación a partir del voltaje suministrado.

Resultados: Los mayores valores obtenidos del coeficiente de transferencia K_L se presentan en dispositivos con mayor cantidad de aspas. Sin embargo, la eficiencia estándar de aireación (SAE) y la eficiencia de transferencia de oxígeno estándar (SOTR) revelaron que el dispositivo con 6 aspas presenta una mayor eficiencia energética.

Conclusiones: Se demostró que la transferencia de OD no depende únicamente de los impactos asociados al número de aspas, y que la máxima eficiencia en la transferencia se obtiene con un menor número de aspas. Estos resultados pueden contribuir en mejorar el entendimiento del funcionamiento de estos sistemas mecánicos en términos de transferencia de OD.

Palabras clave: aireador mecánico, oxígeno disuelto (OD), número de aspas, coeficiente de transferencia de oxígeno, eficiencia de aireación estándar

Idioma: Español

1. Introducción

El oxígeno disuelto (OD) es el parámetro fisicoquímico más importante referente a la calidad del agua debido a que este gas es fundamental para la supervivencia y desarrollo de los organismos acuáticos aerobios. La ausencia de este en el agua se puede presentar por diferentes circunstancias entre las cuales se tiene: aumento de la temperatura, exceso de materia orgánica, exceso de plantas acuáticas, o descomposición descontrolada de organismos acuáticos bajo escenarios de alta toxicidad, entre otros [1]. En el tratamiento de aguas residuales, el OD influye considerablemente en los procesos biológicos aeróbicos ya que este gas es utilizado por los microorganismos como aceptor de electrones durante la reducción de la materia orgánica y para la posterior generación de nuevos microorganismos, manteniendo el tratamiento funcional a lo largo del tiempo [2]. Existen diferentes mecanismos y procedimientos que permiten transferir OD al agua, como son los aireadores de superficie, los aireadores de cepillos o aspas de rotación horizontal y la inyección directa de burbujas [3]. Todos estos sistemas presentan diferentes tasas de transferencia y consumos energéticos en función de su operación y geometría [2]; sin embargo, no existen estudios recientes que propongan nuevas alternativas frente a la transferencia de OD de manera más eficiente desde un punto de vista energético. Este vacío de nuevo conocimiento científico en el área del tratamiento del agua, sumado a la problemática mundial de la desoxigenación de cuerpos de agua por efecto del cambio climático [4]–[6], hacen que este tema tome nuevamente importancia, por los graves efectos observados sobre diferentes ecosistemas acuáticos [7]. Por otra parte, el crecimiento poblacional también va a ejercer una mayor presión sobre los actuales sistemas de tratamiento de aguas residuales, los cuales dependen de la transferencia de OD como alternativa de restauración parcial de efluentes contaminados con aguas residuales.

La pérdida de OD bajo diferentes escenarios en sistemas acuáticos se ha convertido en un tema de importancia durante el tratamiento y la restauración de cuerpos de agua; específicamente en lo referente a los sistemas, procesos y mecanismos utilizados para la transferencia del oxígeno disuelto (OD), donde se carece de este.

Con el objetivo de solucionar esta problemática, se han venido desarrollado diferentes equipos y procedimientos en busca de transferir de forma eficiente el OD con fines de tratamiento de aguas residuales, oxigenación de cuerpos de agua naturales o artificiales, y aquellos destinados a procesos de acuicultura [8]–[11]. La función que cumplen los sistemas aireadores rotacionales es aumentar el área interfacial entre el agua y el aire, mejorando así la transferencia de oxígeno atmosférico y la circulación del agua previniendo la estratificación [12]. El impacto de las aspas sobre el agua rompe el equilibrio de la interfase aire-agua permitiendo el atrapamiento de aire en forma de burbujas [13], generando el transporte de las mismas dentro del cuerpo de agua, favoreciendo la difusión de oxígeno y generando turbulencia a medida que estas ascienden nuevamente a la superficie [14].

En la práctica de la acuicultura, los aireadores de rueda de aspas y los aireadores en espiral son los dispositivos más utilizados en la transferencia de OD [15]; no obstante, la etapa de aireación es el tercer costo más grande en el sistema de acuicultura intensiva después del levante de larvas y de la alimentación, representando el 15 % del costo total de producción [16]. El aireador mecánico horizontal utilizado en plantas de tratamiento de agua residual está conformado por un motor eléctrico anclado a una caja de transferencia reductora y un eje central en el cual se encuentran adheridas aspas (paletas, cerdas, ángulos o láminas), las cuales giran a una velocidad constante. La rotación y el impacto sobre la superficie del líquido generan las condiciones necesarias para transferir el oxígeno atmosférico dentro del cuerpo de agua [17]. Sin embargo, el consumo energético requerido en este proceso es elevado y representa entre 50 y 90 % de la energía total utilizada durante la restauración del cuerpo de agua [18]. Por otra parte, la transferencia de OD también puede ser afectada por factores físicos, ambientales, y microbianos, los cuales dificultan y reducen la eficiencia del proceso [19], [20].

Dentro de todos los equipos disponibles para la aireación, los aireadores mecánicos de eje horizontal han presentado una gran eficiencia durante el proceso de transferencia de OD, logrando valores entre 1,5 y 2,1 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en condiciones estándar y 0,5 y 1,1 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en condiciones de campo [3]. Algunos datos compilados por [16] presentan resultados de SOTR y SAE en el rango de 2,6 -5,0 $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ y 3.485 -3.351 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ para sistemas aireadores de 1 kW y 2 kW respectivamente, utilizados en acuicultura. Otros estudios revelan que la entrada de oxígeno al agua (SOTR) a partir de la implementación de aireadores de rueda de aspas presenta valores en el rango de 1,8 -3,1 $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$ y la SAE en el rango de 0,91 -1,41 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ [21]. Los trabajos realizados por [22]–[25] mencionan que los aireadores de rueda de aspas son los sistemas más eficientes en términos de la SAE, estableciendo un rango entre 1,1 -3,0 $\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

En un aireador mecánico de eje horizontal las características físicas del sistema, así como el tipo, la forma y la geometría de las aspas utilizadas, además de los parámetros de operación, representan un factor crucial durante el proceso de transferencia de OD [20], p. ej. la aplicación de aspas de un mayor tamaño requerirá de un mayor consumo de potencia, debido a la fuerza de arrastre generada

al momento de impactar y sumergirse dentro del cuerpo de agua, generando un mayor costo de operación del proceso. Otros parámetros como la velocidad de rotación y la profundidad de las aspas también afectan la transferencia de OD.

Por este motivo, el objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia en la variación del número de aspas y la velocidad de rotación de un aireador mecánico de eje horizontal en la eficiencia energética y la transferencia de oxígeno atmosférico a un cuerpo de agua carente de oxígeno disuelto. Los ensayos fueron realizados a escala laboratorio, permitiendo controlar factores externos que pueden afectar la veracidad de los ensayos, enfocándose principalmente en el efecto de la potencia consumida, el número de aspas y la velocidad de rotación.

2. Materiales y detalles experimentales

Mediante diseño e impresión 3D se construyeron tres discos en material PETG (tereftalato de polietileno glicol) conformados por 6, 12 y 24 aspas respectivamente. Todos los discos fueron constituidos por aspas planas de 7 cm de largo, 4 cm de ancho y 3 mm de espesor. La profundidad de inmersión del aspa fue de 7 cm y el diámetro total del disco se estableció en 20 cm. Los discos fueron acoplados a un eje de aluminio de 9,9 mm de diámetro, conectado a un motorreductor con capacidad de rotación máxima de 110 RPM. Se instalaron dos rodamientos metálicos en los extremos del eje propulsor para reducir la influencia de la fricción. El sistema mecánico fue adaptado en un recipiente con capacidad de 30 L donde se introdujo una muestra de agua anóxica de 21 L con la finalidad de evitar pérdidas por salpicaduras laterales, producto de la rotación y el impacto de las aspas sobre la superficie del agua. La Figura 1 muestra un esquema del sistema utilizado en este estudio, conformado por un disco de 24 aspas. La misma configuración se utilizó para los discos de 6 y 12 aspas.

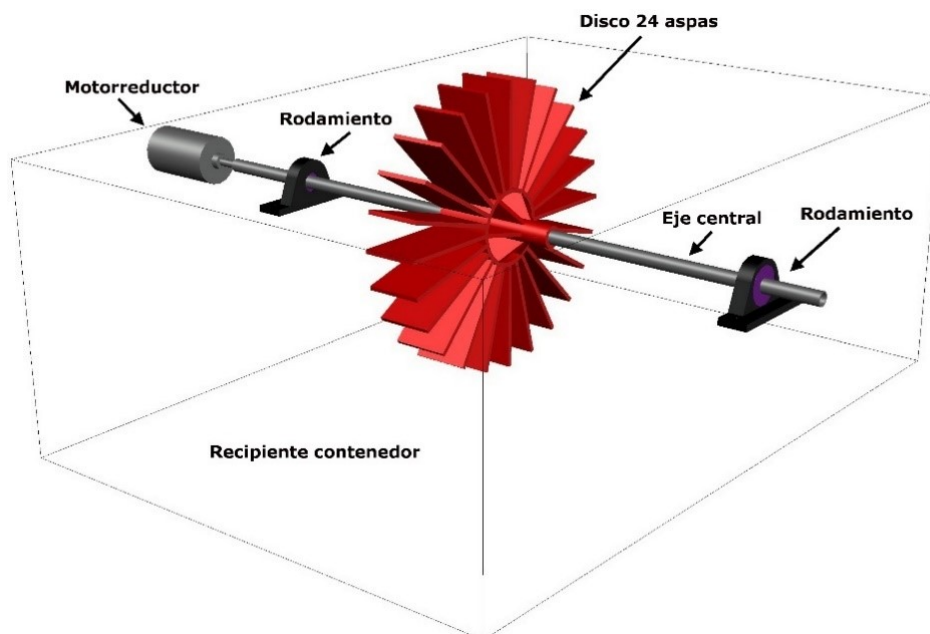


Figura 1. Esquema del aireador mecánico de eje horizontal utilizado en este estudio

Todos los ensayos se realizaron en condiciones controladas, utilizando muestras de agua potable de 21 L a las cuales se les generaron condiciones anóxicas agregando 1,60 g de sulfito de sodio (Na_2SO_3) y 0,005 g de cloruro de cobalto (CoCl_2) como agente catalizador [11], [26]. La reacción del sulfito de sodio con el OD del agua produce sulfato de sodio (Na_2SO_4), removiendo por completo el OD presente en el agua (Ecuación (1)). El área del recipiente utilizado se estableció en $0,1924 \text{ m}^2$ y una profundidad del agua de $0,109 \text{ m}$.



Para todos los ensayos se estableció una concentración de saturación inicial de OD de $7,45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para una temperatura del agua de 15° C , siendo esta la temperatura de trabajo utilizada para todas las mediciones, y presión atmosférica de 740 hPa a una altura de 2.800 msnm . Este valor fue determinado por medio de oxímetro electrónico Hach Flexi HQ30d [27], [28]. La velocidad de rotación del motorreductor fue controlada por medio de una fuente de voltaje regulada DC, implementando valores de 3, 6, 9 y 12 voltios. La rotación y potencia consumida de todo el sistema fue medida durante el transcurso de la experimentación, verificando la potencia real consumida, mediante el uso de una fuente regulada en DC. El tamaño del recipiente, así como la geometría de los discos, generaron baja salpicadura, evitando las pérdidas del fluido por efecto de derrames, poco eficaces en los procesos de transferencia de OD [29], [30].

El proceso de transferencia de OD producto del impacto y de la rotación de las aspas sobre la superficie del agua fue monitoreado en intervalos de 3 a 5 minutos, dependiendo de la velocidad de rotación de los discos, hasta lograr un estado de saturación correspondiente al 98 % de la concentración, siendo este valor equivalente a $7,30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [26]. Las mediciones de OD fueron realizadas utilizando dos oxímetros, dispuestos a una profundidad de 5 cm e insertados en las esquinas opuestas del recipiente contenedor con la finalidad de reducir la incertidumbre durante la recolección de datos. Se establecieron cuatro réplicas, para asegurar validez y replicabilidad de la experimentación.

El método utilizado para el análisis de los datos de transferencia de OD se basó en el modelo de regresión no lineal, el cual es un método de mínimos cuadrados que reduce el error entre los datos modelados y los datos medidos [2], [26]. Este modelo hace énfasis en que solo los valores de oxígeno disuelto obtenidos durante la etapa de reoxigenación se deben utilizar para el análisis de los datos. Por otra parte, si los datos contienen muchas variaciones pueden ser descartados. Es necesario tener en cuenta que la concentración más baja de oxígeno disuelto no debería exceder nunca el 20 % de la concentración de saturación de oxígeno disuelto, y la más alta concentración no debe ser inferior al 98 % de la saturación de concentración de oxígeno disuelto [26]. La teoría básica utilizada en el estándar está referenciada como “teoría de la doble película” [31] en la que se establece que la tasa de transferencia puede expresarse en términos de un coeficiente de transferencia general y de resistencias a cada lado de la interfaz aire-agua. La transferencia se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_\infty^* - C) \quad (2)$$

Donde:

$K_L a$ = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico (1/t).

C_∞^* = Concentración final promedio de OD alcanzada en un tiempo infinito (mg/L).

C = Concentración promedio efectiva de OD en la fase líquida.

La forma integrada se convierte en:

$$\ln \frac{C_{\infty}^* - C_0}{C_{\infty}^* - C} = K_L a (t - t_0) \quad (3)$$

$$C = C_{\infty}^* - (C_{\infty}^* - C_0) \cdot \exp[K_L a (t - t_0)] \quad (4)$$

Donde:

C_0 = Concentración inicial de OD, cuando $t = t_0$.

Las ecuaciones (3) y (4) se utilizan para pruebas en agua limpia en estado no estacionario, para determinar la capacidad de transferencia de diferentes equipos de aireación. Teniendo en cuenta que la temperatura del agua puede variar al momento de realizar la experimentación de transferencia de oxígeno, el coeficiente de transferencia de masa volumétrico $K_L a$ siempre debe ser convertido a temperatura estándar ($t = 20^\circ \text{C}$) por medio de la siguiente ecuación:

$$K_L a_{20} = K_L a \cdot 1,024^{(20-t)} \quad (5)$$

La tasa de transferencia estándar de oxígeno (Standard Oxygen Transfer Rate - $SOTR_{20}$ $\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$) señala la cantidad de oxígeno transferido por hora en condiciones estándar, y se puede calcular con base en la siguiente ecuación:

$$SOTR = K_L a_{20} \cdot C_{s,20} \cdot V \quad (6)$$

Donde:

$K_L a_{20}$ = Coeficiente de transferencia de masa volumétrico ($1/t$), a una temperatura de 20°C .

$C_{s,20}$ = Concentración de saturación para un estado estable a una temperatura de 20°C .

V = Volumen del líquido.

La eficiencia estándar de aireación (Standard Aeration Efficiency - SAE) es expresada como la transferencia de oxígeno por unidad de potencia ($\text{kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), tal y como se señala en la siguiente ecuación:

$$SAE = \frac{SOTR}{\text{Potencia de entrada}} \quad (7)$$

Donde:

$SOTR$ = Tasa de transferencia estándar de oxígeno ($\text{kgO}_2 \cdot \text{h}^{-1}$).

Potencia de entrada = Potencia consumida en kilovatios (kW).

La potencia en vatios (w) del motorreductor fue calculada como el producto de la tensión eléctrica (voltaje) multiplicada por la intensidad de la corriente eléctrica (amperaje); con base en la siguiente ecuación:

$$P = V \cdot A \quad (8)$$

Donde:

P = Potencia expresada en vatios (w).

V = Voltaje.

A = Amperaje.

Para el desarrollo de esta investigación se realizó la correspondiente corrección por variación de la temperatura del agua.

3. Resultados y discusión

La Figura 2 muestra la variación del porcentaje de concentración de OD transferido para cada uno de los sistemas trabajados.

La Figura 2a muestra una reducción del tiempo requerido para llegar al punto de saturación máxima al incrementar la potencia suministrada al sistema, alcanzando este punto a los 20 minutos de iniciado el proceso de aireación. Por el contrario, el peor comportamiento fue observado al uti-

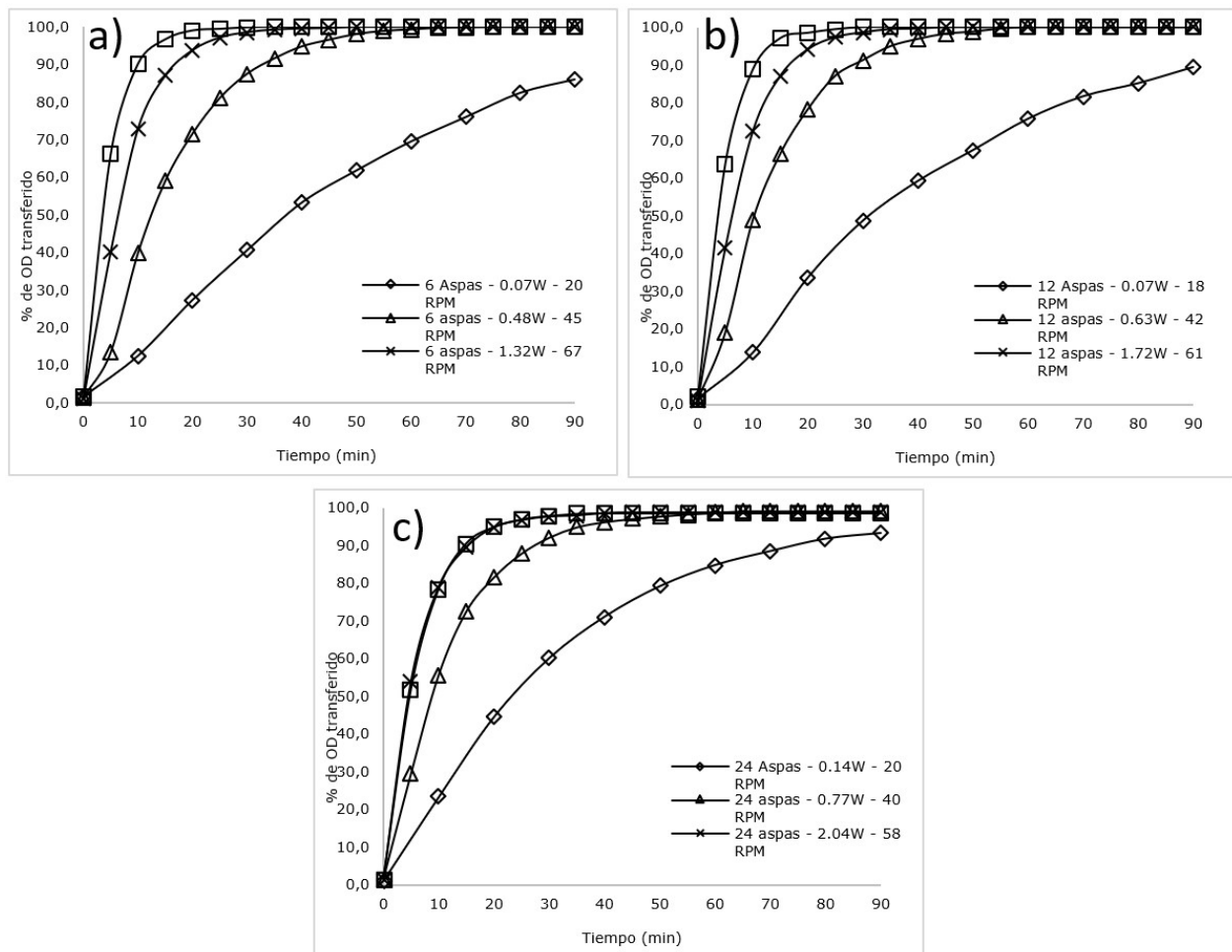


Figura 2. Comportamiento en la transferencia de OD para los discos aireadores a) 6 aspas, b) 12 aspas y c) 24 aspas

lizar la potencia más baja, en la que fueron necesarios 240 minutos para alcanzar la saturación de la muestra (no señalados en la gráfica). De manera general, para la potencia suministrada de 0,48 W, 1,32 W y 2,54 W se observó una saturación superior al 85 % en los primeros 30 minutos de operación. Este comportamiento también pudo observarse para el sistema conformado por un disco de 12 aspas, como se presenta en la Figura 2b. Se observó un aumento en el consumo de energía por el sistema, debido al incremento del número de aspas, las cuales presentan mayor resistencia al desplazarse dentro del agua, lo que se traduce en un incremento en la potencia [32].

La Figura 2c presenta el porcentaje de concentración de OD transferido al agua durante el proceso de agitación para el disco conformado por 24 aspas. Se observó que las potencias de 2,04 W y 3,90 W presentan un comportamiento similar, por lo que se infiere que existe una velocidad máxima de transferencia de oxígeno al agua, la cual es independiente de la velocidad de rotación de las aspas y del número de impactos sobre la superficie. Para este caso específico, se presume que las aspas consumen una mayor cantidad de energía debido a la resistencia asociada a su desplazamiento durante el momento de la inmersión. Esta energía consumida no se ve reflejada en una mayor velocidad de transferencia de OD.

En todos los casos de estudio, los porcentajes más altos de transferencia de OD fueron generados durante las primeras etapas de aireación. Esto se debió a que existe una mayor diferencia entre la presión parcial del oxígeno atmosférico con respecto al OD presente en el agua anóxica [27], [29]. A medida que ocurre el proceso de transferencia de OD, la diferencia de presión es regulada, generando así un comportamiento tipo Arrhenius, donde la transferencia de OD se va reduciendo gradualmente hasta obtener un valor de saturación máximo, cercano al valor de concentración de OD original [28], [32].

Los valores de SOTR y SAE fueron determinados teniendo en cuenta la corrección de los valores de K_{La} por medio del método de regresión no lineal, permitiendo establecer la transferencia de OD en función del consumo energético [26]. La Figura 3a presenta la SOTR, expresada como la cantidad de kg de OD transferido por unidad de tiempo (h), para cada una de las condiciones analizadas.

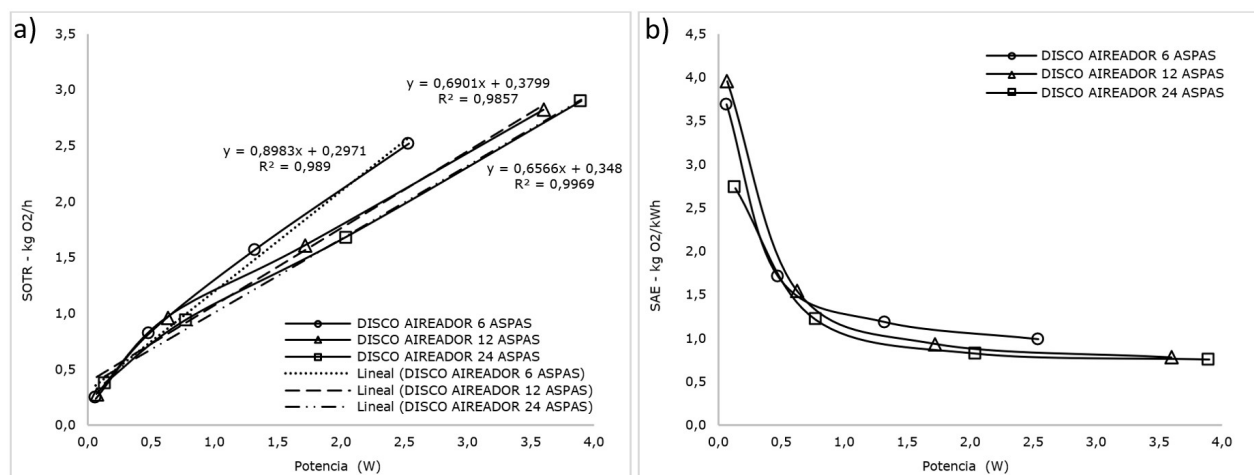


Figura 3. a) SOTR para los discos de 6, 12 y 24 aspas en función de la potencia (W), b) SAE para los discos de 6, 12 y 24 aspas en función de la potencia (W)

Se observa que el dispositivo conformado por 6 aspas presenta el mejor comportamiento SOTR frente a la transferencia de OD para cada una de las condiciones estudiadas. La aplicación de un sistema con una menor cantidad de aspas permite una reducción en la resistencia y fuerza de arrastre del aspa al desplazarse dentro del agua, favoreciendo un menor consumo de energía [30], [33]. Por otra parte, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo se infiere que el número de impactos que pueden generar las aspas sobre la superficie del agua no es una variable que se relacione directamente con una transferencia eficiente de OD desde el punto de vista energético.

A partir de los análisis realizados puede observarse que, para un valor de potencia equivalente a 2,5 kW, la SOTR generada por el disco de 6 aspas será un 20,4 % y 27,6 % más alto que aquel generado por los discos de 12 y 24 aspas, respectivamente. Esta situación confirma que un aumento en el número de aspas es un parámetro de diseño que influye determinantemente sobre la tasa y la velocidad de transferencia de OD, penalizando el sistema por un mayor requerimiento de energía asociada a la inmersión y al desplazamiento del agua a medida que las aspas rotan.

La Figura 3b muestra los valores de SAE en función de la potencia suministrada obtenidos en este trabajo para los dispositivos de 6, 12 y 24 aspas. A medida que incrementa la potencia suministrada al sistema, los valores de SAE disminuyen, es decir, aunque un incremento en la velocidad de rotación del sistema de aireación favorece una mayor tasa de transferencia de OD en el cuerpo de agua, el consumo energético se ve altamente perjudicado. El análisis de este parámetro es muy importante, ya que define qué tan eficaz es el sistema al momento de transferir OD, así como su relación con la potencia consumida. Los valores más altos se obtuvieron para los discos de 12 aspas ($3,96 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) y 6 aspas ($3,69 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). Por otra parte, el disco de 24 aspas presentó el menor valor, establecido en $2 \text{ kgO}_2 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Los altos valores de SAE no necesariamente se traducen en una alta tasa de transferencia de OD; por el contrario, la velocidad con la cual el OD se transfiere se ve drásticamente reducida, requiriendo una mayor cantidad de tiempo para alcanzar el estado de saturación.

La Figura 4a muestra la relación entre los coeficientes $K_{La}(\text{h}^{-1})$ en función de las RPM generadas por el sistema aireador. Se puede observar que los valores más bajos de K_{La} se obtienen para el disco de 6 aspas; sin embargo, la velocidad de rotación es más alta (86 RPM) en comparación con los datos obtenidos para los discos de 12 y 24 aspas (80 y 77 RPM). Por otra parte, los valores más altos de K_{La} se obtuvieron con el disco de 24 aspas, debido a que este valor depende del número de aspas utilizadas como lo reporta [34]; no obstante, la SAE presentó valores inferiores en relación con los obtenidos para los discos de 6 y 12 aspas, demostrando que un valor alto del coeficiente K_{La} no necesariamente se verá reflejado como un valor alto de la SOTR.

Los valores altos del coeficiente K_{La} obtenidos para el disco de 24 aspas pueden estar íntimamente relacionados con la intensidad y la cadencia de los impactos individuales provocados por las aspas durante el proceso de rotación [34]. La Figura 4b presenta la relación existente entre las RPM y la potencia consumida para cada uno de los sistemas estudiados. El sistema con disco de 6 aspas presenta una mayor cantidad de RPM, ya que se requiere una menor cantidad de potencia para hacer rotar el dispositivo, traducido en el consumo energético del sistema, así como una reducción en la resistencia generada por la inmersión y el arrastre generado por las aspas dentro del cuerpo de agua [30], [33]. El resumen de todos los datos del proceso de aireación obtenidos en este

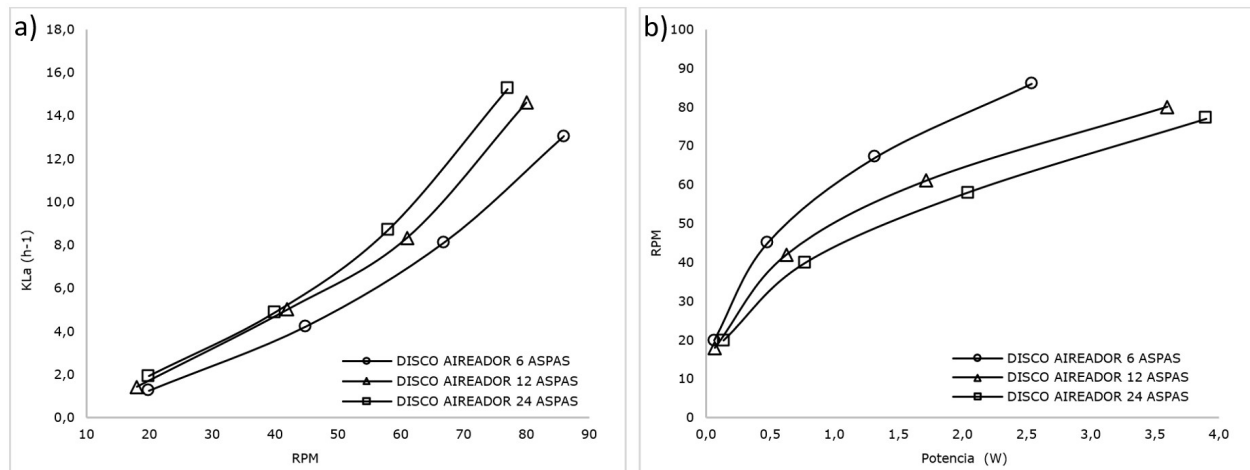


Figura 4. a) relación entre los coeficientes K_{La} (h^{-1}) y potencia (W), b) relación entre las RPM y potencia (W) estudio es presentado en la Tabla I. Los datos obtenidos de potencia fueron medidos en W, pero matemáticamente son expresados en kW.

A partir de las observaciones hechas sobre las diferentes experimentaciones, se puede postular que la transferencia de OD mediante el uso de discos conformados por aspas se desarrolla en tres etapas, las cuales se definen como impacto, desplazamiento y salida. Al momento de impactar, el aspa rompe el equilibrio de la superficie del agua, favoreciendo el atrapamiento de aire en forma de burbujas. Esta situación puede influir de manera significativa durante el proceso de transferencia de OD, representado en los valores de los coeficientes K_{La} [13]. Durante el desplazamiento, el aspa en proceso de rotación dentro del agua genera transporte de las burbujas de aire atrapadas con anterioridad. En este momento el contacto del aire con el agua es más estrecho, favoreciendo la difusión de oxígeno dentro del cuerpo de agua. Las burbujas atrapadas también pueden generar fenómeno de turbulencia a medida que ascienden [28]. En la salida, el aspa rompe la superficie del agua de manera ascendente, generando levantamiento del agua, exponiendo parte del volumen al aire ambiente. En esta situación también puede presentarse difusión de oxígeno.

Discernir qué tanto influyen estos procesos de manera individual en la transferencia de OD puede ser muy complejo, ya que interfieren diferentes situaciones que dificultarían el correspondiente análisis. Entender cómo se lleva a cabo la transferencia de OD puede favorecer y mejorar el diseño de aireadores mecánicos haciéndolos más eficaces frente a la potencia de energía consumida [18], [35].

4. Conclusiones

En este estudio se evaluó la influencia de la potencia requerida y el número de aspas utilizando un sistema de aireación mecánico de eje horizontal. Los análisis se realizaron a partir de muestras de agua potable anóxicas, las cuales fueron sometidas en agitación por medio del sistema aireador rotacional de eje horizontal. Los resultados obtenidos muestran que el número de aspas tiene una influencia directa en la transferencia de OD. La aplicación de altas velocidades de rotación favorece una mayor tasa de transferencia del OD en el cuerpo de agua, lo cual se ve reflejado en los valores

Tabla I. Valores de funcionamiento obtenidos para cada uno de los dispositivos trabajados en este estudio

Disco aireador 6 aspas				
Voltaje (V)	3	6	9	12
Amperaje (A)	0,02	0,08	0,15	0,21
Potencia (W)	0,07	0,48	1,32	2,54
RPM	20	45	67	86
K_{La} (20°C) h^{-1}	1,24	4,22	8,12	13,04
dC/dt ($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$)	11,42	38,85	74,75	120,01
SOTR ($kgO_2 \cdot h^{-1}$) - 6 aspas	0,24	0,82	1,57	2,52
SAE ($kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) - 6 aspas	3,69	1,7	1,19	0,99
Disco aireador 12 aspas				
Voltaje (V)	3	6	9	12
Amperaje (A)	0,02	0,11	0,19	0,3
Potencia (W)	0,07	0,63	1,72	3,6
RPM	18	42	61	80
K_{La} (20°C) h^{-1}	1,43	5,01	8,33	14,6
dC/dt ($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$)	13,18	46,07	76,66	134,35
SOTR ($kgO_2 \cdot h^{-1}$) - 12 aspas	0,28	0,97	1,61	2,82
SAE ($kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) - 12 aspas	3,96	1,54	0,94	0,78
Disco aireador 24 aspas				
Voltaje (V)	3	6	9	12
Amperaje (A)	0,05	0,13	0,23	0,33
Potencia (W)	0,137	0,777	2,041	3,902
RPM	20	40	58	77
K_{La} (20°C) h^{-1}	1,93	4,87	8,7	15,24
dC/dt ($g \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$)	17,79	44,77	80,02	140,17
SOTR ($kgO_2 \cdot h^{-1}$) - 24 aspas	0,37	0,94	1,68	2,9
SAE ($kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$) - 24 aspas	2,73	1,21	0,82	0,75

del coeficiente K_{La} (h^{-1}). Sin embargo, el aumento en la velocidad de rotación del dispositivo requirió de un mayor consumo de energía, afectando la SOTR. El aumento de la potencia consumida por el sistema, requerida para mantener una rotación constante, generó una disminución en estos valores, penalizando el sistema aireador.

Los valores más altos del coeficiente K_{La} fueron de 15,24, 14,60 y 13,04, obtenidos para los discos de 24, 12 y 6 aspas, respectivamente. Por otra parte, los valores más altos de la SOTR fueron 2,90, 2,82 y 2,52 $kgO_2 \cdot h^{-1}$ para los discos de 24, 12 y 6 aspas. Por último, los valores más altos de SAE fueron de 0,99, 0,78 y 0,75 $kgO_2 \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$ para los discos de 6, 12 y 24 aspas.

Esto último demuestra que el proceso más eficiente fue alcanzado por el dispositivo de 6 aspas obteniendo los mejores valores en cuanto a SOTR y SAE se refiere. A partir de las proyecciones lineales de la SOTR, se pudo establecer que, para una potencia de 2,5 kW, el disco de 6 aspas es 20,4 y 27,6 % más efectivo comparado con los discos de 12 y 24 aspas, respectivamente. Esta investigación puede mejorar el entendimiento del funcionamiento de estos sistemas de aireación, favoreciendo el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a tratamientos del agua que requieren procesos de reoxigenación.

Referencias

- [1] X. Yang, X. Wu, H. Hao, and Z. He, "Mechanisms and assessment of water eutrophication", *J. Zhejiang Univ. Sci. B*, vol. 9, no. 3, pp. 197-209, 2008. <http://doi.org/10.1631/jzus.B0710626> ↑2
- [2] J. A. Rojas Romero, *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*, 3ª. ed., Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. ↑2, 5
- [3] G. Tchobanoglous, F. L. Burton, and H. D. Stensel, *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4 th Ed., Columbus, OH, USA: McGraw Hill, 2003. ↑2, 3
- [4] K. H. Nicholls, "Effects of temperature and other factors on summer phosphorus in the Inner Bay of Quinte, Lake Ontario: Implications for Climate Warming", *J. Great Lakes Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 250-262, 1999. [http://doi.org/10.1016/S0380-1330\(99\)70734-3](http://doi.org/10.1016/S0380-1330(99)70734-3) ↑2
- [5] N. Ozaki, T. Fukushima, H. Harasawa, T. Kojiri, K. Kawashima, and M. Ono, "Statistical analyses on the effects of air temperature fluctuations on river water qualities", *Hydrol. Process.*, vol. 17, no. 14, pp. 2837-2853, 2003. <http://doi.org/10.1002/hyp.1437> ↑2
- [6] B. M. McGill, Y. Altchenko, S. K. Hamilton, P. K. Kenabatho, S. R. Sylvester, and K. G. Villholth, "Complex interactions between climate change, sanitation, and groundwater quality: A case study from Ramotswa, Botswana", *Hydrogeol. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 997-1015, 2019. <http://doi.org/10.1007/s10040-018-1901-4> ↑2
- [7] Australian Academy of Science, *Investigation of the Causes of Mass Fish Kills in the Menindee Region NSW over the summer of 2018-2019*, 2019. ↑2
- [8] L. D. Dien, L. H. Hiep, S. J. Faggotter, C. Chen, J. Sammut, and M. A. Burford, "Factors driving low oxygen conditions in integrated rice-shrimp ponds", *Aquaculture*, vol. 512, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734315> ↑3
- [9] G. Kumar et al., "Economics of alternative catfish production technologies", *J. World Aquac. Soc.*, vol. 49, no. 6, pp. 1039-1057, 2018. <http://doi.org/10.1111/jwas.12555> ↑3
- [10] Y. Du, F. Chen, L. Zhou, T. Qiu, and J. Sun, "Effects of different layouts of fine-pore aeration tubes on sewage collection and aeration in rectangular water tanks", *Aquac. Eng.*, vol. 89, 2020. <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102060> ↑3
- [11] L. Uby, "Next steps in clean water oxygen transfer testing - A critical review of current standards", *Water Res.*, pp. 415-434, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.063> ↑3, 5
- [12] C. E. Boyd and D. J. Martinson, "Evaluation of propeller-aspirator-pump aerators", *Aquaculture*, vol. 36, no. 3, pp. 283-292, 1984. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(84\)90243-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90243-6) ↑3
- [13] L. Tian, Z. Xu, L. Chen, Y. Liu, and T. Zhang, "Study on oxygen gas holdup and kinetics using various types of paddles during marmatite leaching process", *Hydrometallurgy*, vol. 180, pp. 158-171, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.011> ↑3, 10
- [14] C. D. DeMoyer, E. L. Schierholz, J. S. Gulliver, and S. C. Wilhelms, "Impact of bubble and free surface oxygen transfer on diffused aeration systems", *Water Res.*, vol. 37, no. 8, pp. 1890-1904, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00566-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00566-3) ↑3
- [15] M. Tanveer, S. M. Roy, M. Vikneswaran, P. Renganathan, and S. Balasubramanian, "Surface aeration systems for application in aquaculture: A review", *Int. J. Fish. Aquat. Stud.*, vol. 6, no. 5, pp. 342-347, 2018, [Online]. <http://www.fisheriesjournal.com/archives/2018/vol6issue5/PartE/6-5-23-591.pdf> ↑3
- [16] A. Kumar, S. Moullick, and B. C. Mal, "Selection of aerators for intensive aquacultural pond", *Aquac. Eng.*, vol. 56, pp. 71-78, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2013.05.003> ↑3

- [17] C. M. Barreto et al., “Sidestream superoxygenation for wastewater treatment: Oxygen transfer in clean water and mixed liquor“, *J. Environ. Manage.*, vol. 219, pp. 125-137, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.035> ↑3
- [18] J. Daw, K. Hallett, J. DeWolfe, and I. Venner, “Energy Efficiency Strategies for Municipal Wastewater Treatment Facilities“, Technical Report NREL/TP-7A30-53341 January 2012. Golden, Colorado, USA, 2012. ↑3, 10
- [19] Y. Qiu et al., “Optimal surface aeration control in full-scale oxidation ditches through energy consumption analysis“, *Water*, vol. 10, no. 7, 2018. <http://doi.org/10.3390/w10070945> ↑3
- [20] S. Bahri, R. P. A. Setiawan, W. Hermawan, M. Zairin Junior, “Design and simulation of paddle wheel aerator with movable blades“, *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 994-999, 2015. [Online]. <https://www.ijert.org/design-and-simulation-of-paddle-wheel-aerator-with-movable-blades> ↑3
- [21] F. Rajts, and C. C. Shelley, “Guidelines for managing aeration and water quality in fishponds in Bangladesh“, *WorldFish*, 2020. ↑3
- [22] R. Alonso-Rodríguez, and F. Páez-Osuna, “Nutrients, phytoplankton and harmful algal blooms in shrimp ponds: A review with special reference to the situation in the Gulf of California“, *Aquaculture*, vol. 219, no. 1-4, pp. 317-336, 2003. [http://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00509-4](http://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00509-4) ↑3
- [23] A. Rappaport, S. Sarig, and M. Mareck, “Results of Test of Various Aeration Systems on the Oxygen Regime in Genosar Experimental Ponds and Growth of Fish Therein“, *Bamidgeh*, vol. 28, no. 3, pp. 35-49, 1976. ↑3
- [24] T. B. Lawson, *Fundamentals of Aquacultural Engineering*, New York, NY, USA: Chapman & Hall, 1995. ↑3
- [25] J. Colt, and C. Orwicz, “Aeration in intensive culture“, In: D. E. Brune, and J. R. Tomasso (Eds.), *Aquaculture and Water Quality, Advances in World Aquaculture*, vol. 3. pp. 198-271, Baton Rouge, LO, USA: World Aquaculture Society, 1991. ↑3
- [26] American Society of Civil Engineers, *Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water (Asce/Ewri Standard 2-06)*, New York, NY, USA: ASCE, 2007. ↑5, 8
- [27] R. Sander, “Compilation of Henry’s law constants (version 4.0) for water as solvent“, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, pp. 4399-4981, 2015. ↑5, 8
- [28] C. R. Blanco-Zúñiga, N. Rojas-Arias, L. Y. Peña-Pardo, M. E. Mendoza Oliveros y S. A. Martínez Ovalle, “Estudio de la influencia de arcillas en la transferencia de oxígeno disuelto en agua“, *Ingeniería*, vol. 26, no. 1, pp. 5-14, 2021. <https://doi.org/10.14483/23448393.15846> ↑5, 8, 10
- [29] H. A. Abdelrahman, and C. E. Boyd, “Effects of mechanical aeration on evaporation rate and water temperature in aquaculture ponds“, *Aquac. Res.*, vol. 49, no. 6, pp. 2184-2192, 2018. <https://doi.org/10.1111/are.13674> ↑5, 8
- [30] S. Bahri, Jufriadi, and H. Anwar, “The Ineffectiveness of Water Splash on Paddlewheel Aerator“, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 268, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012162> ↑5, 9
- [31] W. Lewis, and W. G. Whitman, “Principles of gas absorption“, *Ind. Eng. Chem.*, vol. 16, no. 12, pp. 1215-1220, 1924. <https://doi.org/10.1021/ie50180a002> ↑5
- [32] A. Bahadori, and H. B. Vuthaluru, “Simple Arrhenius-type function accurately predicts dissolved oxygen saturation concentrations in aquatic systems“, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, no. 5, pp. 335-340, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.05.002> ↑8
- [33] S. Bahri, R. P. A. Setiawan, W. Hermawan, and M. Zairin Junior, “Simulation on blade geometry and operational condition toward torque requirement and drag force in paddle wheel aerator“, *IJSER*, vol. 6, no. 2, pp. 812-816, 2015. ↑9
- [34] S. M. Roy, S. Moulick, and B. C. Mal, “Design characteristics of spiral aerator“, *J. World Aquac. Soc.*, vol. 48, no. 6, pp. 898-908, 2017. <https://doi.org/10.1111/jwas.12410> ↑9
- [35] T. Itano et al., “Water circulation induced by mechanical aerators in a rectangular vessel for shrimp aquaculture“, *Aquac. Eng.*, vol. 85, pp. 106-113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2019.03.006> ↑10

Cesar René Blanco Zúñiga

Ingeniero Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Magíster en Ingeniería con énfasis en Medio Ambiente (École de Technologie Supérieure, Montreal, Canadá), Profesor asistente, Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Correo electrónico: cesar.blanco@uptc.edu.co

Dalia Soraya Useche de Vega

Ingeniera Agrónoma, Especialista en Ingeniería Ambiental, Especialista en Seguridad y Salud en el Trabajo, Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), Ph.D. en Agroecología de la Universidad de Antioquia. Coordinadora del Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental, Biodiversidad y Agroecología GISABA. Investigadora junior. Profesora investigadora del Departamento de Ingeniería Ambiental de la UPTC. Directora de la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UPTC. Coordinadora de Postgrado del Área Ambiental de la Facultad de Ingeniería.

Correo electrónico: dalia.useche@uptc.edu.co

Nicolás Rojas-Arias

Ingeniero Metalúrgico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Investigador con énfasis en las áreas de procesamiento de minerales en metalurgia extractiva y procesos de manufactura en el área de metalurgia física, manejo de materiales y residuos radiactivos, y diseño de materiales para la ingeniería. Estudiante de Doctorado en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil.

Correo electrónico: nicolas.rojas@estudante.ufscar.br

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

enfatar 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.

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>