

ISSN 2523-0344

Volumen 4, Número 11 – Enero – Marzo – 2020

Revista de Ingeniería Industrial

ECORFAN®

ECORFAN-Perú

Editor en Jefe

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Revista de Ingeniería Industrial, Volumen 4, Número 11, Marzo - 2020, es una Revista trimestral editada por ECORFAN-República del Perú. AV. La Raza, No 1047 - Santa Ana, Cusco-Perú, CP: 11500. WEB:

http://www.ecorfan.org/republicofperu/rj_ingenieria_industrial.php, revista@ecorfan.org. Editor en Jefe: SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC. ISSN: 2523-0344. Responsable de la última actualización de este problema Unidad Informática ECORFAN. Imelda Escamilla Bouchán, PhD. Vladimir Luna Soto, PhD. Actualizado al 31 de Marzo, 2020.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y Protección de la Propiedad Intelectual.

Revista de Ingeniería Industrial

Definición del Research Journal

Objetivos Científicos

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en el Área de Ingeniería y Tecnología, en las Subdisciplinas de diseño de sistemas de producción, gestión de calidad en los productos, investigación de operaciones, simulación informática, cadenas de suministros, certificación de calidad, hidrometeorología.

ECORFAN-México S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

Alcances, Cobertura y Audiencia

Revista de Ingeniería Industrial es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Perú, es una publicación científica arbitrada e indizada con periodicidad trimestral. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de Diseño de sistemas de producción, gestión de calidad en los productos, investigación de operaciones, simulación informática, cadenas de suministros, certificación de calidad, hidrometeorología con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Ingeniería y Tecnología. El horizonte editorial de ECORFAN-Mexico® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

Consejo Editorial

AYALA - GARCÍA, Ivo Neftalí. PhD
University of Southampton

CASTILLO - LÓPEZ, Oscar. PhD
Academia de Ciencias de Polonia

CENDEJAS - VALDEZ, José Luis. PhD
Universidad Politécnica de Madrid

DIAZ - RAMIREZ, Arnoldo. PhD
Universidad Politécnica de Valencia

HERNÁNDEZ - PRIETO, María de Lourdes. PhD
Universidad Gestalt

LAGUNA, Manuel. PhD
University of Colorado

LARA - ROSANO, Felipe. PhD
Universidad de Aachen

RIVAS - PEREA, Pablo. PhD
University of Texas

TIRADO - RAMOS, Alfredo. PhD
University of Amsterdam

VEGA - PINEDA, Javier. PhD
University of Texas

Comité Arbitral

DÍAZ - CASTELLANOS, Elizabeth Eugenia. PhD
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

MALDONADO - MACÍAS, Aidé Aracely. PhD
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

NAKASIMA - LÓPEZ, Mydory Oyuky. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

OCHOA - CRUZ, Genaro. PhD
Instituto Politécnico Nacional

REALYVÁSQUEZ - VARGAS, Arturo. PhD
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

TABOADA - GONZÁLEZ, Paul Adolfo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

VALDEZ - ACOSTA, Fevrier Adolfo. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

VASQUEZ - SANTACRUZ, J.A. PhD
Centro de Investigación y Estudios Avanzados

ARREDONDO - SOTO, Karina Cecilia. PhD
Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez

RODRÍGUEZ - DÍAZ, Antonio. PhD
Universidad Autónoma de Baja California

RUELAS-SANTOYO, Edgar Augusto. PhD
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato

Cesión de Derechos

El envío de un Artículo a Revista de Ingeniería Industrial emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Perú considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.

Declaración de Autoría

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación del Artículo y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor del Artículo.

Detección de Plagio

Todos los Artículos serán testeados por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandará a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

Proceso de Arbitraje

Todos los Artículos se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homólogo de CONACYT para los capítulos de América-Europa-Asia-África y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos- Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

Área del Conocimiento

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de diseño de sistemas de producción, gestión de calidad en los productos, investigación de operaciones, simulación informática, cadenas de suministros, certificación de calidad, hidrometeorología y a otros temas vinculados a las Ingeniería y Tecnología.

Presentación del Contenido

Como primer artículo presentamos, *Análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales*, por HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced y RODRIGUEZ-ORTIZ, Gabriel, con adscripción en la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, como segundo artículo presentamos, *Análisis térmico e hidráulico de diferentes geometrías de tubos para mejorar el desempeño de un radiador de automóvil*, por ZUÑIGA-CERROBLANCO, José Luis, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, COLLAZO-BARRIENTOS, Juan Carlos y HERNANDEZ-GUERRERO, Abel, con adscripción en la Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Universidad Politécnica de Aguascalientes y Universidad de Guanajuato, como tercer artículo presentamos, *Efecto del grupo funcional en la adsorción de Ag(I) en soluciones sintéticas con materiales mesoporosos de sílica*, por SALAZAR-HERNÁNDEZ, Mercedes, SALAZAR-HERNÁNDEZ, Carmen, RANGEL-PORRAS, Gustavo y CORONA-ARROYO, Mario, con adscripción en la Universidad de Guanajuato e Instituto Politécnico Nacional, como cuarto artículo presentamos, *Estudio de factibilidad para la aplicación de algoritmos de estimación de distribución al problema de secuenciación de vehículos*, por VELÁZQUEZ-JUÁREZ, Juan Carlos, PUGA-SOBERANES, Héctor José, PADIERNA-GARCÍA, Luis Carlos y SÁNCHEZ-MÁRQUEZ, Elvi Malintzin, con adscripción en el Instituto Tecnológico de León y la Universidad de Guanajuato, respectivamente.

Contenido

Artículo	Página
Análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced y RODRIGUEZ-ORTIZ, Gabriel <i>Universidad Politécnica de Juventino Rosas</i>	1-12
Análisis térmico e hidráulico de diferentes geometrías de tubos para mejorar el desempeño de un radiador de automóvil ZUÑIGA-CERROBLANCO, José Luis, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, COLLAZO-BARRIENTOS, Juan Carlos y HERNANDEZ-GUERRERO, Abel <i>Universidad Politécnica de Juventino Rosas</i> <i>Universidad Politécnica de Aguascalientes</i> <i>Universidad de Guanajuato</i>	13-23
Efecto del grupo funcional en la adsorción de Ag(I) en soluciones sintéticas con materiales mesoporosos de sílica SALAZAR-HERNÁNDEZ, Mercedes, SALAZAR-HERNÁNDEZ, Carmen, RANGEL-PORRAS, Gustavo y CORONA-ARROYO, Mario <i>Universidad de Guanajuato</i> <i>Instituto Politécnico Nacional</i>	24-30
Estudio de factibilidad para la aplicación de algoritmos de estimación de distribución al problema de secuenciación de vehículos VELÁZQUEZ-JUÁREZ, Juan Carlos, PUGA-SOBERANES, Héctor José, PADIERNA-GARCÍA, Luis Carlos y SÁNCHEZ-MÁRQUEZ, Elvi Malintzin <i>Instituto Tecnológico de León</i> <i>Universidad de Guanajuato</i>	31-42

Análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales

Aerodynamic analysis in CFD of spoilers in conventional cars

HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio†*, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced y RODRIGUEZ-ORTIZ, Gabriel

Universidad Politécnica de Juventino Rosas, México.

ID 1^{er} Autor: *Juan Gregorio, Hortelano-Capetillo* / ORC ID: 0000-0002-3702-4853

ID 1^{er} Coautor: *J. Merced, Martínez-Vázquez* / ORC ID: 0000-0002-6230-3846

ID 2^{do} Coautor: *Gabriel, Rodriguez-Ortiz* / ORC ID: 0000-0002-3615-1973

DOI: 10.35429/JIE.2020.11.4.1.12

Recibido Enero 15, 2020; Aceptado Marzo 30, 2020

Resumen

En el presente estudio se realizaron pruebas aerodinámicas mediante el uso del software Solidworks Flow Simulation (CFD) en 2 diseños diferentes de automóviles convencionales, implementando un alerón en la parte trasera del auto para disminuir los coeficientes de arrastre y de sustentación que se producen mediante el movimiento del aire independientemente del diseño en la parte trasera del auto y mejorar la aerodinámica. Analizando los resultados se obtiene que se mejora la aerodinámica del automóvil cuando se le pone un alerón para reducir las fuerzas de arrastre y sustentación.

Coefficiente de arrastre, Coeficiente de sustentación, Aerodinámica

Abstract

In the present study aerodynamic tests were performed by using Solidworks Flow Simulation software (CFD) in 2 different designs of conventional cars, implementing a spoiler in the back of the car to reduce the drag and lift coefficients that occur through the movement of the air regardless of the design in the back of the car and improve aerodynamics. Analyzing the results it is obtained that the aerodynamics of the car is improved when a spoiler is placed to reduce the drag and lift forces.

Drag coefficient, Lift coefficient, aerodynamics

Citación: HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced y RODRIGUEZ-ORTIZ, Gabriel. Análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales. Revista de Ingeniería Industrial. 2020. 4-11:1-12.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jhortelano_ptc@upjr.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La aerodinámica es el estudio del aire en movimiento sobre un sólido determinando las presiones y las fuerzas. Se originan 3 tipos de fuerzas sobre el automóvil: fuerza de arrastre que dificulta el movimiento del vehículo, Fuerza de sustentación que es la fuerza vertical hacia arriba o abajo apretando el vehículo contra el suelo y Fuerza lateral [1]. Los problemas aerodinámicos son complejos, ya que son problemas de una alta complejidad, haciéndolos imposibles de resolver mediante los métodos analíticos; por lo que la solución a estos problemas requiere de otros métodos, que nos da resultados aproximados. Principalmente existen dos métodos de resolución de problemas aerodinámicos:

- Túnel de viento.
- Técnicas CFD (Computacional Fluid Dynamics).

Décadas después, extensivos análisis en túnel de viento realizados por ingenieros de Chrysler demostraron que los automóviles estaban diseñados “literalmente a la inversa”. Los pésimos diseños luchaban contra el viento lo que tenía como resultado combustible malgastado y bajas velocidades. Todos estos hechos se demostraron en el modelo de Chrysler denominado DeSoto de 1933 que fue diseñado para ser conducido en el sentido inverso. Dichas pruebas dieron como resultado que este modelo aportó más kilómetros por litro y velocidades máximas mayores [2].

Una fuerza aerodinámica de sustentación en la parte delantera del coche fue percibida por Daimler-Benz durante un recorrido que impartió récord en la autopista alemana en el periodo comprendido entre los años 1936 y 1939. A velocidades mayores a 200 mph Carraciola y Lang observaron que la parte delantera del coche parecía elevarse produciendo una pérdida en la sensibilidad de la dirección. En una carrera en la que se alcanzó una velocidad aproximada de 250 mph, Caracciola reportó una completa pérdida de control de la dirección, así como los observadores tuvieron la impresión de que las llantas delanteras se levantaron del suelo [3].

El implemento de un alerón en la parte trasera del automóvil empezó Michael May, ingeniero suizo y piloto de carreras aficionado, fue el primero en experimentar con un ala invertida montada sobre la cabina de su Porsche 550 Spyder en el año 1956. En los años 60 con Jim Hall (1965) en su auto Chaparral 2E implemento el alerón. Posteriormente en 1969 en la NASCAR con el Dodge Charger Daytona y su gemelo el Plymouth Superbird debido a que el reglamento de entonces era muy estricto en cuanto a los motores, por lo que los directivos del grupo Chrysler, al que pertenecían Dodge y Plymouth, vieron en la aerodinámica una posible oportunidad de superar a los rivales. Tras innumerables pruebas en el túnel del viento de la empresa aeronáutica Lockheed, instalaron un inmenso alerón trasero, que a pesar de lo que algunos creen, es muy eficaz debido a su elevada posición [4].

La Figura 1 muestra la evolución de los alerones a través de los años para reducir y optimizar la resistencia que ofrece el automóvil al aire y disminuir las fuerzas de arrastre y sustentación. R.B. Sharma *et al.*, [5] mencionan que el proceso del diseño de un automóvil, la aerodinámica debe ser considerada muy seriamente, un auto puede ser aceptable si su forma reduce el coeficiente de arrastre.



Figura 1 Alerones en diferentes diseños de automóviles
Fuente: [2,3,4]

Carr G. W. [6] descubrió que las fuerzas aerodinámicas son un factor importante en el diseño de los automóviles en competición, puede ser rápido o lento dependiendo de su forma usando la misma potencia en el motor. Goetz [7] midió las distribuciones de las presiones alrededor de un automóvil dentro de un túnel de viento. Las superficies sustentadoras (alerones) diseñadas por Liebeck [8] fueron usados por automóviles de competencia para generar el auto más rápido y aerodinámico.

R.H. Barnard *et al.*, [9] realizaron pruebas aerodinámicas en un túnel de viento de un auto en competición marca Tiga GC83 a escala de 1/8, obteniendo como resultados los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación.

Los métodos aerodinámicos fueron avanzando tanto la parte experimental como la parte de simulación numérica. Chien-Hsiung Tsai *et al.*, [10] realizaron pruebas aerodinámicas en un automóvil con 5 diferentes diseños de alerones obteniendo como resultado la disminución del coeficiente de arrastre con el mejor diseño del alerón. Xingjun HU *et al.*, [11] realizaron simulaciones en CFD de un auto Sedan para analizar el difusor a diferentes ángulos de corte (0° , 3° , 6° , 9.8° y 12°) que se encuentra ubicado en la parte trasera del auto, para determinar los coeficientes de arrastre y sustentación, observó que con un ángulo de corte de 6° , los coeficientes son menores en comparación con los resultados con los demás ángulos de corte.

El mismo análisis en el difusor usando CFD lo realizaron S. M. Rakibul Hassan *et al.*, [12] pero con ángulos de corte 0° , 2.5° , 5° , 10° y 12.5° y analizaron que con un ángulo de corte de 12.5° se obtiene el menor coeficiente de arrastre en comparación con los demás ángulos de corte. Rubel Chandra Das *et al.*, [13] realizaron simulaciones en CFD de un automóvil con su alerón en la parte trasera variando los ángulos de ataque del aire de 2° , 4° , 6° , 8° , 10° y 12° para optimizar los coeficientes de arrastre y sustentación.

Obteniendo como resultado que con un ángulo de inclinación en el alerón de 4° y 12° se obtienen los menores coeficientes. Krzysztof Kurec *et al.*, [14] realizaron pruebas en CFD y experimentales de un auto normal con un alerón en la parte trasera, variando los ángulos de ataque desde 0° hasta 55° , probando diferentes modelos de turbulencia, observaron que el coeficiente de arrastre aumenta conforme el ángulo del alerón va aumentando los grados de inclinación. Algunos investigadores Gilhaus *et al.*, [15], J. R. Callister *et al.*, [16], F. R. Bailey *et al.*, [17], H. Taeyoung *et al.*, [18] usaron técnicas en CFD para obtener resultados numéricos de los automóviles.

Los autores (Cooper [19] y Sovran [20]) comentan que reduciendo un 10% de la fuerza de arrastre se logra reducir el consumo de combustible alrededor de 3-4%. Katz [21] y Regert *et al.*, [22] probaron que la fuerza de arrastre y la distribución de presión alrededor del vehículo depende del diseño y no de la fricción de la superficie. La reducción del área de la parte trasera de los vehículos ha sido estudiada por décadas para reducir el arrastre que se genera por la separación del aire (Wong *et al.*, [23], Lee *et al.*, [24] y Mariotti *et al.*, [25]), Algunos autores Beaudoin *et al.*, [26], Fourrié *et al.*, [27], Hanfeng *et al.*, [28], Grandemange *et al.*, [29] y Urquhart *et al.*, [30] investigaron que el mejor dispositivo para mejorar la aerodinámica esta dado por un alerón, deflector o aletas.

Modelo matemático y numérico

El uso del software CFD no es una disciplina nueva, gracias a las grandes mejoras en el desarrollo de las computadoras han hecho de la simulación numérica una herramienta de suma utilidad en la ingeniería. En este trabajo se realizaron varios ensayos en CFD para reproducir el comportamiento aerodinámico para los diferentes modelos con el implemento de un alerón. La Figura 2 muestra los pasos para resolver un problema utilizando CFD.



Figura 2 Pasos para la simulación en CFD
Fuente: elaboración propia

Para un análisis aerodinámico externo de un cuerpo se deben tomar en cuenta algunos coeficientes entre los cuales se encuentran el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación. Los modelos de automóviles fueron diseñados en Solidworks, posteriormente se realizaron las simulaciones aerodinámicas usando el complemento Flow Simulation.

Se diseñaron 2 automóviles convencionales para compararlos aerodinámicamente entre sí, posteriormente se diseñó un alerón para colocarlo en la parte trasera de los modelos variando la altura de 10 cm hasta 45 cm.

Diseño 1

Se diseñó el primer modelo con dimensiones 1.8 m de alto, 2.6 m de ancho y 4.14 m de largo. Como se muestra en la Figura 3.

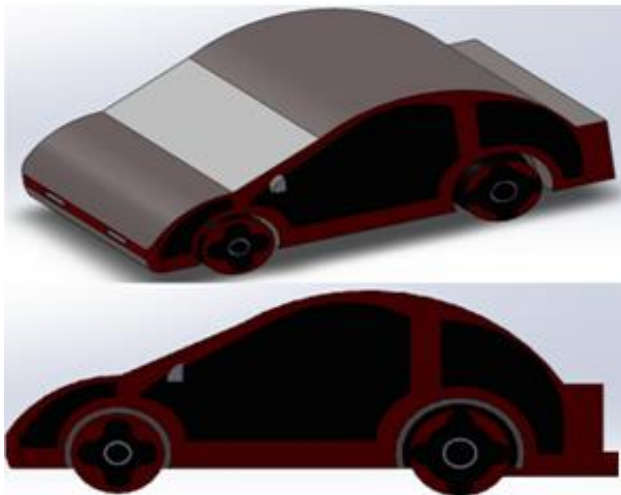


Figura 3 Diseño 1. Diseño de un automóvil convencional
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Diseño 2

Se diseñó el segundo modelo con dimensiones 1.8 m de alto, 2.6 m de ancho, las mismas dimensiones que el diseño 1, pero con una longitud de 4 m de largo. Como se muestra en la Figura 4.

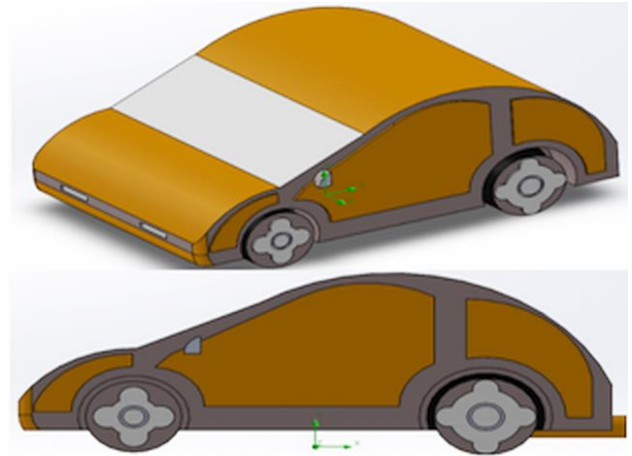


Figura 4 Diseño 2. Diseño de un auto normal
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Diseño 1/Alerón 1

Se le implementó un alerón en la parte trasera del automóvil mostrado en la Figura 5, el alerón está a una altura de 10 cm, el alerón tiene un ancho de 30 cm con un espesor de 4 cm.

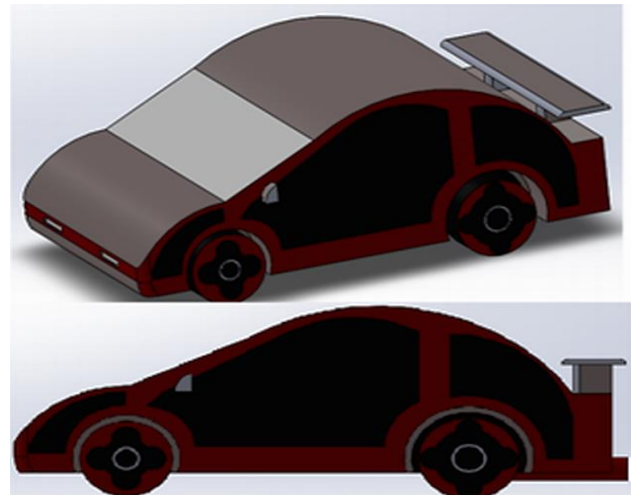


Figura 5 Diseño 1/Alerón 1. Alerón implementado en la parte trasera del auto de 10 cm de altura
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Diseño 1/Alerón 2

Se le implementó el mismo alerón, pero con una altura de 45 cm, como se observa en la Figura 6.

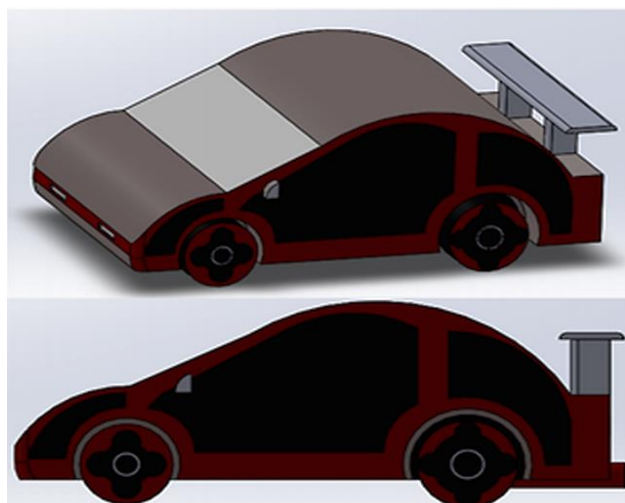


Figura 6 Diseño 1/Alerón 2. Alerón implementado en la parte trasera del auto de 45 cm de altura
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Diseño 2/Alerón 1

A este modelo se le implemento un alerón en la parte trasera del automóvil mostrado en la Figura 7, el alerón tiene una altura de 10 cm.

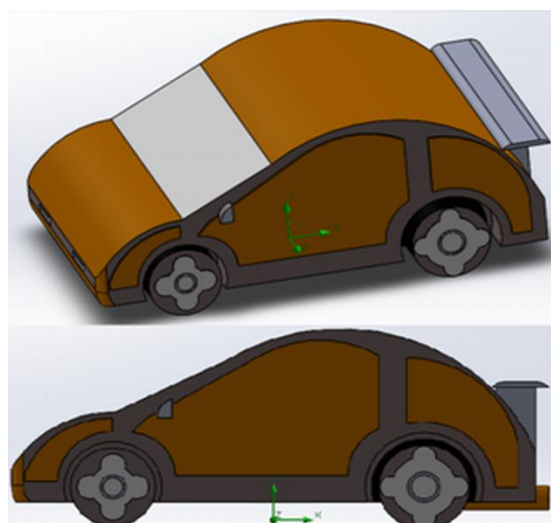


Figura 7 Diseño 2/Alerón 1
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Diseño 2/Alerón 2

Se le implemento un alerón en la parte trasera del automóvil mostrado en la Figura 8, el alerón tiene una altura de 45 cm.

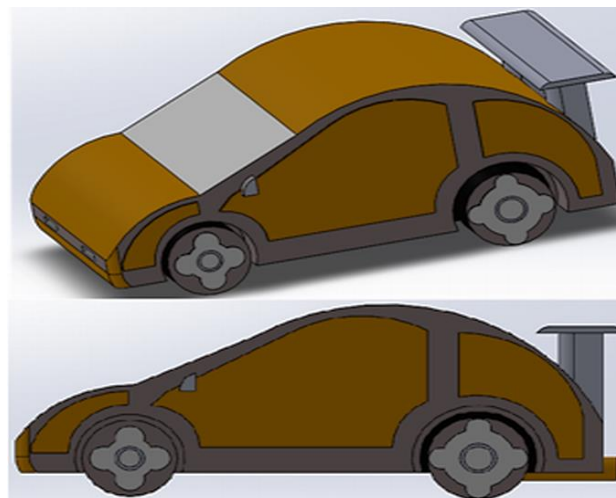


Figura 8 Diseño 2/Alerón 2
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Para este caso de estudio se usa un mallado volumétrico que se forma utilizando celdas hexaédricas como se muestra en la Figura 9, generalmente es usado para la aerodinámica externa por su capacidad para definir correctamente la zona donde se forma la estela debido a la separación de la capa límite volviendo al fluido turbulento.

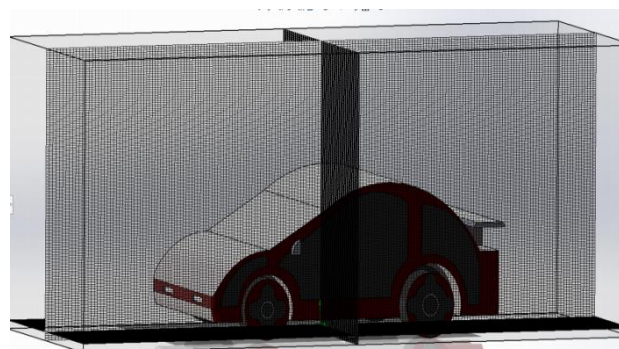


Figura 9 Volumen de control con 5313028 celdas en el mallado
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

El estudio aerodinámico que presenta el flujo desarrollado alrededor del vehículo requiere de una presentación matemática, que a su vez se transforma en un algoritmo para su solución. Esta presentación matemática se resume en un conjunto de ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y el modelo de turbulencia k-ε.

La ecuación de continuidad está representada por [31]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Las ecuaciones de Navier Stokes se expresan de la siguiente forma [1]:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Para flujos turbulentos se aplica el modelo Standard $k-\varepsilon$ [31]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

En estas ecuaciones, G_k representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad promedio. G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotación. Y_m representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible para toda velocidad de disipación. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes. Σ_ε y σ_ε son los números de Prantl turbulentos para k y ε respectivamente. S_k y S_ε son términos fuente definidos por el usuario. La viscosidad turbulenta μ_t se calcula de la siguiente manera:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

Los parámetros de las algunas constantes son:

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$$

Para el calcular el coeficiente de arrastre, se usa la ecuación (7), donde F_x es la fuerza de arrastre (N), ρ es la densidad del aire (kg/m^3), v es la velocidad del aire (m/s) y A es el área frontal del automóvil [1], para este estudio el área es de 4.68 m^2 .

$$Cd = \frac{F_x}{(1/2)\rho v^2 A} \quad (7)$$

La fuerza de sustentación como se percibió desde sus inicios es normal al suelo. A diferencia de la fuerza de arrastre la cual tiene como dirección opuesta a la dirección del vehículo. La ecuación (8) muestra el cálculo de la fuerza de sustentación, donde F_y es la fuerza de sustentación:

$$Cl = \frac{F_y}{(1/2)\rho v^2 A} \quad (8)$$

Para el análisis de este trabajo se usa el aire a bajas velocidades de 35 m/s a diferentes números de malla (859815, 1667308, 4029353, 4491917 y 5313028), la densidad del aire es de 1.2 kg/m^3 y la viscosidad de $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$. Con los resultados de las simulaciones se pretende conocer las fuerzas de arrastre y sustentación, posteriormente calcular los coeficientes para conocer el mejor modelo aerodinámico con el alerón implementado en la parte trasera que reduzca estas fuerzas en comparación al de los modelos normales.

Resultados

La Figura 10 muestra los resultados de los coeficientes de arrastre de los diseños normales y con el alerón implementado en la parte trasera para diferentes números de malla. Con el malla más fino (5313028 celdas) se obtuvieron un resultado de 0.43 para los diseños normales 1 y 2. Cuando se les implementa el alerón en la parte trasera, se logró disminuir los coeficientes de arrastre. Con el Diseño 1/Alerón 1 se obtuvo un coeficiente de 0.36, el Diseño 1/Alerón 2 el resultado fue de 0.38, Diseño 2/Alerón 1 y Diseño 2/Alerón 2 para ambos casos fue de 0.37.

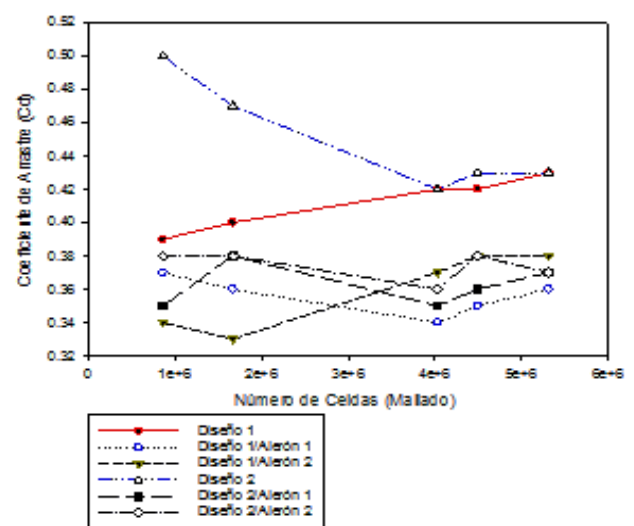


Figura 10 Resultados de los coeficientes de arrastre con diferentes números de celdas en el malla

Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Los resultados de los coeficientes de sustentación son mostrados en la Figura 11. Con el malla más fino (5313028 celdas) los resultados del diseño 1 y 2 fueron de 0.65, se observa que con el alerón en la parte trasera se logra disminuir el coeficiente de sustentación para los diseños normales.

Los modelos Diseño 1/Alerón 1 y Diseño 1/Alerón 2 los resultados fueron de 0.46 y 0.42, los modelos Diseño 2/Alerón 1 y Diseño 2/Alerón 2 fueron de 0.5 y 0.42 respectivamente. Las Figuras 12 y 13 muestran los resultados de las fuerzas de arrastre y sustentación con diferente número de mallado, se observa que son el mismo comportamiento como se mostraron anteriormente.

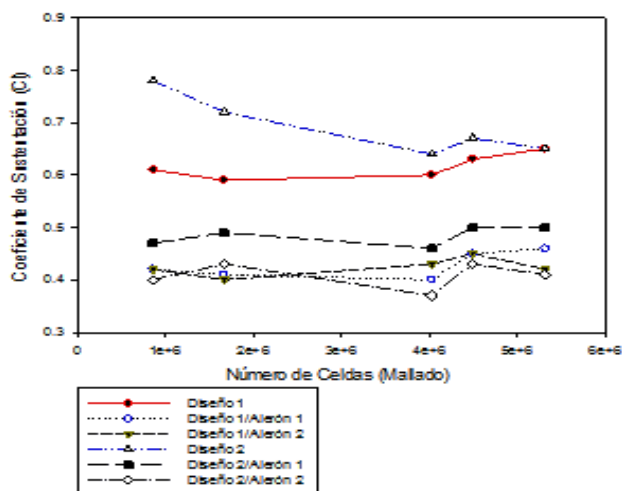


Figura 11 Resultados de los coeficientes de sustentación con diferentes números de celdas en el mallado
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

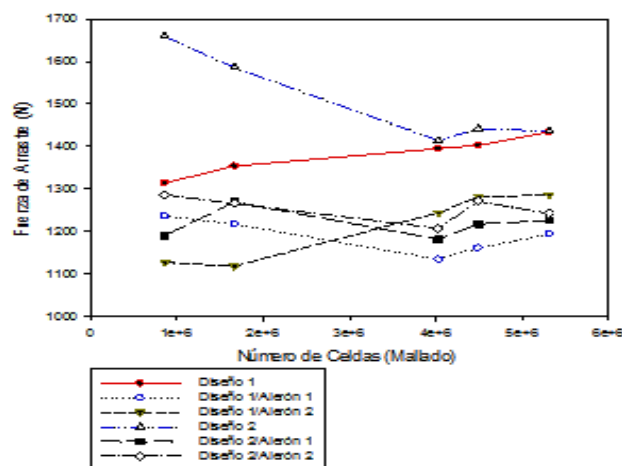


Figura 12 Resultados de las fuerzas de arrastre con diferentes números de celdas en el mallado
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Es importante conocer la efectividad del alerón para cada diseño, por eso se realizó un cálculo del porcentaje de reducción de los coeficientes, mientras más alto sea la reducción más efectiva es el alerón.

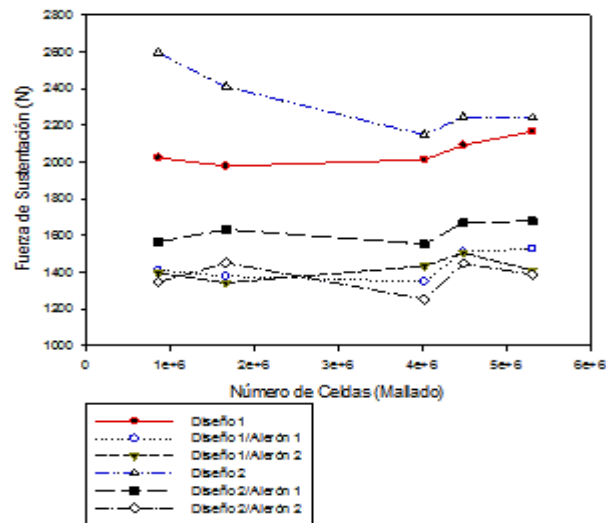


Figura 13 Resultados de las fuerzas de sustentación con diferentes números de celdas en el mallado
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

La Tabla 1 muestra los porcentajes de reducción de los coeficientes de arrastre del Diseño 1/Alerón 1 y Diseño 2/Alerón 2 en comparación del Diseño 1. El modelo Diseño 1/Alerón 1 tiene una mayor efectividad con un 16.76%.

Diseño 1	Diseño 1/Alerón 1	Diseño 1/Alerón 2
0.43	0.36	0.38
%Reducción	16.76	10.34

Tabla 1 Resultados de los porcentajes de reducción de los coeficientes de arrastre del Diseño 1
Fuente: Elaboración propia

La Tabla 2 muestra los resultados de los coeficientes de sustentación de los modelos Diseño 1/Alerón 1 y Diseño 1/Alerón 2 con el porcentaje de reducción. El mayor porcentaje fue de 35% con el Diseño 1/Alerón 2 y un 29.54% con el modelo Diseño 1/Alerón 1.

Diseño 1	Diseño 1/Alerón 1	Diseño 1/Alerón 2
0.65	0.46	0.42
%Reducción	29.54	35

Tabla 2 Resultados de los porcentajes de reducción de los coeficientes de sustentación del Diseño 1
Fuente: elaboración propia

Los resultados de la reducción de los porcentajes del Diseño 2/Alerón 1 y Diseño 2/Alerón 2 en comparación del Diseño 2 son mostrados en las Tablas 3 y 4. Para el coeficiente de arrastre, la diferencia entre los porcentajes es menor de 14.65% y 13.53%. En cambio, el mayor porcentaje de reducción del coeficiente de sustentación fue del modelo Diseño 2/Alerón 2 con un 36%, y el Diseño 2/Alerón 1 fue de 22.54%.

Diseño 2	Diseño 2/Alerón 1	Diseño 2/Alerón 2
0.43	0.37	0.375
%Reducción	14.65	13.53

Tabla 3 Resultados de los porcentajes de reducción de los coeficientes de arrastre del Diseño 2

Fuente: elaboración propia

Diseño 2	Diseño 2/Alerón 1	Diseño 2/Alerón 2
0.65	0.5	0.42
%Reducción	22.54	36

Tabla 4 Resultados de los porcentajes de reducción de los coeficientes de sustentación del Diseño 1

Fuente: elaboración propia

Las Figuras 14, 15 y 16 muestran los contornos de velocidad de los modelos Diseño 1, Diseño 1/Alerón 1 y Diseño 1/Alerón 2 de las simulaciones obtenidas con el número de celdas en el mallado de 5313028 a la velocidad de 35 m/s. Se observa que en la parte trasera del modelo Modelo 1/Alerón 1 y Modelo 1/Alerón 2 forman una estela de vortices con velocidades bajas que hacen que la presión disminuya y el desprendimiento de la capa límite turbulenta se lleve a cabo a una distancia mas lejana, por lo tanto este efecto hace que las fuerzas de arrastre y sustentación disminuyan en comparación del Diseño 1. Cuando mayor sea la presión, mas dificultades tendra en auto para seguir avanzando y retroceda hacia atrás en busca de zonas de menor presión. Por eso es importante el estudio de la capa límite en el diseño para ver donde se llevara a cabo el desprendimiento, con la ayuda del alerón se retrasa ese fenómeno.



Figura 14 Contornos de velocidad del Diseño 1

Fuente: elaboración propia [Solidworks]



Figura 15 Contornos de velocidad del Diseño 1/Alerón 1

Fuente: elaboración propia [Solidworks]



Figura 16 Contornos de velocidad del Diseño 1/Alerón 2

Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Los resultados de los contornos de velocidades del Diseño 2, Diseño 2/Alerón 1 y Diseño 2/Alerón 2 y la formación de las estelas en la parte trasera que disminuyen las fuerzas de arrastre y sustentación son mostrados en las Figuras 17, 18 y 19 a la velocidad de 35 m/s con un número de celdas de 5313028. Comparando el porcentaje de la reducción de los coeficientes de arrastre con el alerón implementado en la parte trasera del Diseño 2, para ambos modelos los porcentajes son muy cercanos, en cambio el coeficiente de sustentación, el modelo Diseño 2/Alerón 2 se logró reducir este coeficiente hasta un 36%.



Figura 17 Contornos de velocidad del Diseño 2

Fuente: elaboración propia [Solidworks]



Figura 18 Contornos de velocidad del Diseño 2/Alerón 1

Fuente: elaboración propia [Solidworks]



Figura 19 Contornos de velocidad del Diseño 2/Alerón 2

Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Las Figuras 20, 21, 22, 23 y 24 muestran las formaciones de vórtices de baja velocidad en el rango de 0-5 m/s en la parte trasera para cada modelo que hacen que la presión disminuya y el desprendimiento de la capa límite turbulenta se lleve a cabo a una distancia mas lejana.

El Diseño 1/Aleron 1 mostró mejores resultados en la reducción de los coeficientes de arrastre y el Diseño 1/Aleron 2 mostró mejores resultados en la sustentación.

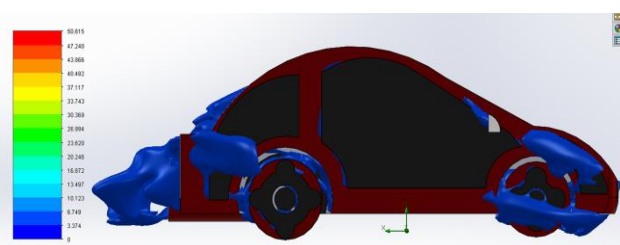


Figura 20 Contornos de baja velocidad del Diseño 1/Aleron 1
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

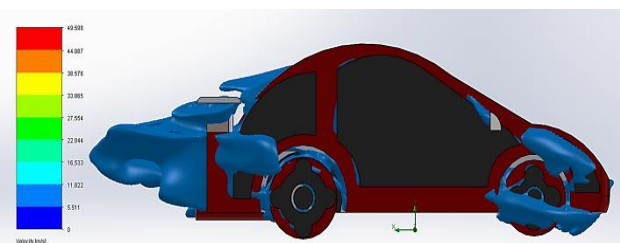


Figura 21 Contornos de baja velocidad del Diseño 1/Aleron 1
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

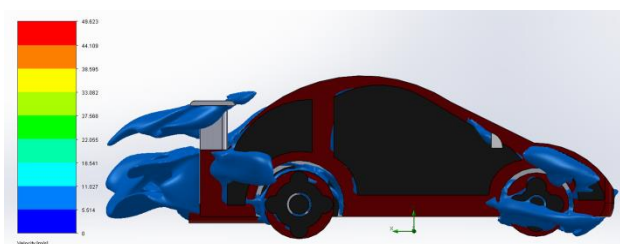


Figura 22 Contornos de baja velocidad del Diseño 1/Aleron 2
Fuente: Elaboración propia [Solidworks]

El Diseño 2/Aleron 2 mostró mejores resultados para reducir las fuerzas en la sustentación y en el arrastre en comparación del Diseño 2/Aleron 1. La altura del alerón favoreció al diseño de la parte trasera como se aprecia en los vórtices mostrados en esta Figura 25.

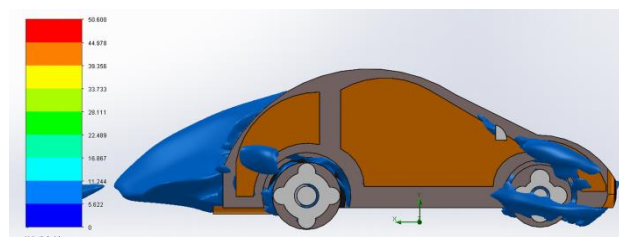


Figura 23 Contornos de baja velocidad del Diseño 2
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

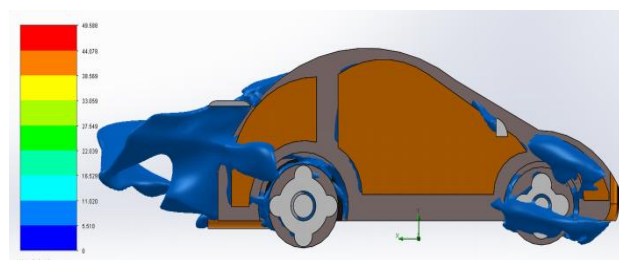


Figura 24 Contornos de baja velocidad del Diseño 2/Aleron 1
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

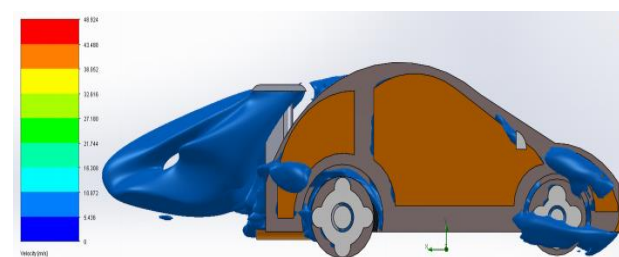


Figura 25 Contornos de baja velocidad del Diseño 2/Aleron 2
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Las Figuras 26 y 27 muestran la comparación de contornos de velocidad a 20 m/s de los modelos Diseño 1/Aleron 2 y Diseño 2/Aleron 2.

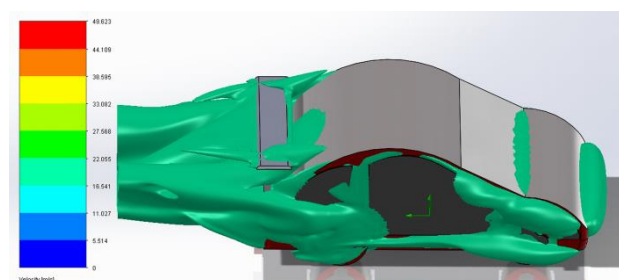


Figura 26 Contornos de velocidad a 20 m/s del Diseño 1/Aleron 2
Fuente: elaboración propia [Solidworks]

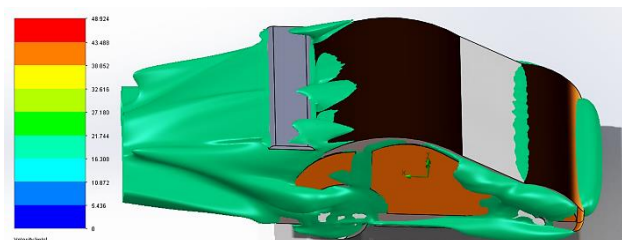


Figura 27 Contornos velocidad a 20 m/s del Diseño 2/Alerón 2

Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Las Figuras 28 y 29 muestran los resultados de las simulaciones obtenidas con el número de celdas de 5313028 para los Diseños 1 y 2, donde se muestran los contornos de presión en la superficie del automóvil que ejerce el aire a la velocidad de 35 m/s. Se observa que en la parte del frente del auto existe la mayor presión de 102353 Pa en promedio para todas las simulaciones y en la parte superior muestra presiones bajas a 101325 Pa.

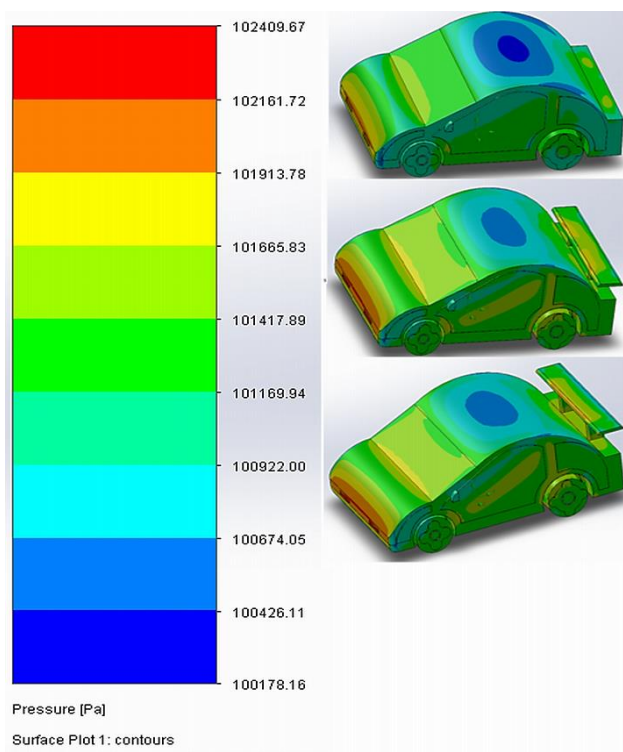


Figura 28 Contornos de presión de los modelos del Diseño 1

Fuente: elaboración propia [Solidworks]

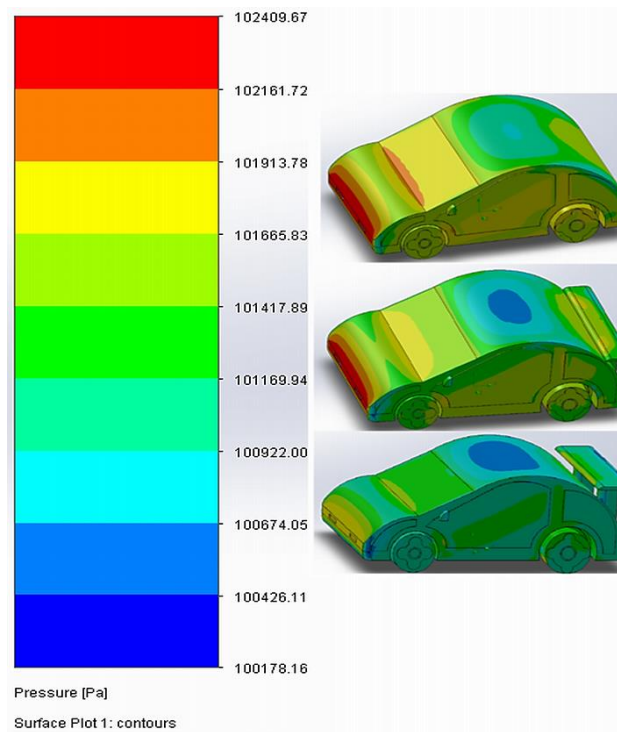


Figura 29 Contornos de presión de los modelos del Diseño 2

Fuente: elaboración propia [Solidworks]

Conclusiones

Realizando una comparación entre los 2 diseños de alerones aplicados en los 2 modelos con diferente diseño en la parte trasera, efectivamente se logra disminuir los coeficientes de arrastre y sustentación en comparación con el diseño normal. Para un automóvil convencional que tenga un diseño similar al del modelo 1, se recomienda que el alerón se coloque a una altura a 45 cm aproximadamente para que sea más efectivo en reducir las fuerzas. En cambio, los automóviles que tengan un diseño similar al del modelo 2, se recomienda que el alerón tenga una altura de 45 cm aproximadamente para mayor efectividad. Podemos concluir que el implemento de un alerón en un auto normal garantiza la reducción de los coeficientes de arrastre y sustentación, mayor estabilidad del automóvil al momento girar una curva o en un trayecto normal en el camino. Por lo tanto, estos coeficientes son afectados por el diseño y dimensiones del automóvil. Por parte del equipo de cómputo, mientras el mallado sea más fino, más tiempo se tardará en resolver la simulación y los resultados serán más exactos a la realidad dependiendo de las características de la computadora.

Referencias

- [1] Introduction to Fluid Mechanics, Sixth Edition, (2003). Robert W. Fox, Alan T. MacDonald, Philip J. Pritchard.
- [2] J. Kelly (2004). "American Cars", 1960-1972. Every Model, Year by Year. McFarland. p. 97. ISBN: 9780786412730.
- [3] F. Milliken, L. Milliken, Race Car Vehicle Dynamics, Twelfth printing, SAE, USA.
- [4] Hall J. "What's Jim Hall Really Like?" Automobile Quarterly, VIII, 3, Spring 1970. pp. 282-293.
- [5] R. B. Sharma, Ram Bansal. "CFD Simulation for Flow over Passenger Car Using Tail Plates for Aerodynamic Drag Reduction, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR JMCE). ISBN: 2320-334X. 75 (2013) 28-35.
- [6] Carr G. W. "The Aerodynamics of Basic Shapes for Road Vehicles. Part 3: Streamlined Bodies" The Motor Industry Research Association, Warwickshire, England, Report No. 107/4, 1969.
- [7] Goetz H. "The Influence of Wind Tunnel Test on Body Design, Ventilation and Surface Deposits of Sedans and Sports Cars" SAE paper No. 710212, 1971.
- [8] Liebeck R. H. "Design of Subsonic Airfoils Systems" AIAA Journal of Aircraft, 15, 9, September 1978, pp. 547-561.
- [9] R. H. Barnard, H. Vaughan. "The Aerodynamic Tuning of a group C Sports Racing Car" Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 22 (1986) 279-289.
- [10] ChienHsiung Tsai, Lung Ming Fu, Chang Hsien Tai, Yen Loung Huang, Jik Chang Leong. "Computational aero-acoustic analysis of a passenger car with a rear spoiler" Applied Mathematical Modelling. 33 (2009) 3661-3673.
- [11] Xingjun Hu, Rui Zhang, Jian Ye, Xu Yan, Zhiming Zhao. "Influence of Different Diffuser Angle on Sedan's Aerodynamic Characteristics". Physics Procedia 22 (2011) 239-245.
- [12] S. M. Rakibul Hassan, Toukir Islam, Mohammad Ali, Md. Quamrul Islam. "Numerical Study on Aerodynamic Drag Reduction of Racing Cars". Procedia Engineering 90 (2014) 308-313.
- [13] Rubel Chandra Das, Mahmud Riyad, "CFD Analysis of Passenger Vehicle at Various Angle of Rear End Spoiler". Procedia Engineering 194 (2017) 160-165.
- [14] Krzysztof Kurec, Michal Remer, Tobiasz Mayer, Sylwester Tudruj, Janusz Piechna. "Flow control for a car-mounted rear wing". International journal of Mechanical Sciences. Volume 152 (2019) 384-399.
- [15] Gilhaus, R. Hoffmann. "Directional Stability, Aerodynamic of Road Vehicles, in: W.H. Hucho (Ed), SAE International, Warrendale, PA, 1998.
- [16] J.R. Callister, A.R. George, Wind Noise, Aerodynamics of Road Vehicles, in: W.H. Hucho (Ed.), SAE International, Warrendale, PA, 1998.
- [17] F.R. Bailey, H.D. Simon, Future Directions in Computing and CFD, AIAA Paper 92-2734, 1992.
- [18] H. Taeyoung, V. Sumantran, C. Harris, T. Kuzmanov, M. Huebler, T. Zak, Flow-field simulations of three simplified vehicle shapes and comparisons with experimental measurements, SAE Transactions 106 (1996) 820835.
- [19] Cooper K. R. Commercial vehicle aerodynamic drag reduction: historical perspective as a guide. In: The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses and Trains. Springer, Berlin. Heidelberg, pp. 9-28. 2004.
- [20] Sovran G. Tractive-energy-based Formulae for the Impact of Aerodynamics on Fuel Economy Over the EPA Driving Schedules, (No. 830304) SAE Technical Paper.

- [21] Katz J. Aerodynamics of race cars. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 38. 27-63. 2006.
- [22] Regert T, Lajos T. *Description of flow field in the wheelhouses of cars.* *International Journal Fluid Flow.* 28 (4). 616-629. 2007.
- [23] Wong D. M, Mair W. A, *Boat-tailed afterbodies of square section as drag-reduction devices.* *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* (1983) 12 (2), 229-235.
- [24] Lee E. J, Lee S. J, *Drag reduction of a heavy vehicle using a modified boat tail with lower inclined air deflector.* *J. Visual.* 20 (4), 743-752. 2017.
- [25] Mariotti A, Buresti G, Gaggini G. Salvetti M. V, *Separation control and drag reduction for boat-tailed axisymmetric bodies through contoured transverse grooves.* *J. Fluid Mech.* 832, 514-549. 2017.
- [26] Beaudoin J. F, Aider J. L, *Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps.* *Exp. Fluid.* 44 (4), 491. 2008.
- [27] Fourrié G, Keirsbulck L, Labraga L, Gilliéron P, *Bluff-body drag reduction using a deflector.* *Exp. Fluid.* 50 (2), 385-395. 2011.
- [28] Hanfeng W, Yu Z, Chao Z, Xuhui H, *Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors.* *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 148, 34-44. 2016.
- [29] Grandemange M, Gohlke M, Cadot O, *Effect on drag of the flow orientation at the base separation of a simplified blunt road vehicle.* *Exp. Fluid.* 54 (5). 1529. 2013.
- [30] Urquhart M, Sebben S, Sterken L, *Numerical analysis of a vehicle wake with tapered rear extensions under yaw conditions.* *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 179, 308-318. 2018.
- [31] V. Yakhot and L. M. Smith. *The renormalization group, the ε -expansion and derivation of turbulence models.* *Journal of Scientific Computing*, Vol. 7, no. 1, pp. 35-61, 1992.

Análisis térmico e hidráulico de diferentes geometrías de tubos para mejorar el desempeño de un radiador de automóvil

Thermal and hydraulic analysis of different tube geometries to improve the performance of an automotive radiator

ZUÑIGA-CERROBLANCO, José Luis†*, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio', COLLAZO-BARRIENTOS, Juan Carlos'' y HERNANDEZ-GUERRERO, Abel'''

*Universidad Politécnica de Juventino Rosas. Departamento de Ingeniería en Sistemas Automotrices. Calle Hidalgo 102, Comunidad de Valencia, Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato, México.

'Universidad Politécnica de Aguascalientes. Departamento de Ingeniería Mecánica Automotriz.

'''Universidad de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Mecánica. México.

ID 1^{er} Autor: José Luis, Zuñiga-Cerroblanco / ORC ID: 0000-0003-0493-8197, CVU CONACYT ID: 208410

ID 1^{er} Coautor: Juan Gregorio, Hortelano-Capetillo / ORC ID: 0000-0002-3702-4853, CVU CONACYT ID: 347496

ID 2^{do} Coautor: Juan Carlos, Collazo-Barrientos / ORC ID: 0000-0002-7436-4523, CVU CONACYT ID: 208634

ID 3^{er} Coautor: Abel, Hernandez-Guerrero / SCOPUS Author ID: 55989696500, SNI CONACYT ID: 12116

DOI: 10.35429/JIE.2020.11.4.13.23

Recibido Enero 15, 2020; Aceptado Marzo 31, 2020

Resumen

La industria automotriz día con día requiere motores más potentes y compactos, esto tiene como consecuencia que los sistemas de enfriamiento deban mejorar y utilizar nuevas tecnologías para cumplir con en el objetivo de mantener a una temperatura optima el motor, estos sistemas deben ajustarse a dimensiones y peso establecidos para no aumentar el gasto de combustible. Es por ello que en el presente trabajo se analiza numéricamente el desempeño térmico e hidráulico de un radiador de automóvil. La investigación se centra en analizar diferentes geometrías para los tubos que componen el radiador, dentro de los cuales se utiliza una mezcla de agua 80% y etilenglicol 20% como fluido de enfriamiento. En los resultados se reportan los números de Nusselt global para las diferentes geometrías, así como también la caída de presión total a lo largo del tubo del radiador. Se realiza una comparación del desempeño térmico e hidráulico para las diferentes geometrías analizadas, también se calcula la generación de entropía para cada geometría. Los resultados permiten elegir la mejor geometría para aumentar la transferencia de calor, así como también, elegir la que presenta un mejor balance entre la generación de entropía debido a la transferencia de calor y a la caída de presión.

Radiador, Transferencia de calor, Caída de presión

Abstract

Nowadays the automotive industry requires more powerful and compact engines, which demand that the cooling systems must be improved using new technologies to attend the aim to maintain the engine working at optimum temperature, the cooling system must be adjusted to the dimensions and weight set to avoid the increase of fuel expense. In the present work a numerical study to analyze the thermal and hydraulic performance of a car radiator is carried out. The research focuses on analyzing different geometries for the tubes that make up the radiator, inside of tubes a mixture of 80% water and 20% ethylene glycol is used as the cooling fluid. On the results the global Nusselt numbers for the different geometries, as well as the total pressure drop along the radiator tube are reported. A comparison of the thermal and hydraulic performance for the different geometries analyzed is made. From the results the best geometry to increase heat transfer is chosen, as well as the geometry with the best balance between entropy generation due to heat transfer and pressure drop is chosen.

Radiator, Heat transfer, Pressure drop

Citación: ZUÑIGA-CERROBLANCO, José Luis, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, COLLAZO-BARRIENTOS, Juan Carlos y HERNANDEZ-GUERRERO, Abel. Análisis térmico e hidráulico de diferentes geometrías de tubos para mejorar el desempeño de un radiador de automóvil. Revista de Ingeniería Industrial. 2020. 4-11:13-23.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jzunigac_ptc@upjr.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

A lo largo de los años, la industria automotriz se ha enfrentado a diferentes retos, uno de los cuales es que los motores tengan mayor potencia, debido a esto se desarrollaron motores potentes, pero este desarrollo trajo como consecuencia que el gasto de combustibles de dichos motores aumentara considerablemente y debido al alza en el precio de los combustibles, el mantenimiento de automóviles con este tipo de motores es relativamente costoso comparado con motores menos potentes; otro de los problemas es el calentamiento del motor, motores con una mayor potencia requieren de un mejor sistema de enfriamiento. Es por ello, que se deben desarrollar diferentes técnicas y tecnologías para que un motor con una mayor potencia sea ahorrador de combustible y se mantenga a una temperatura de operación adecuada.

Una de las opciones para el ahorro de combustible es que el automóvil sea más ligero, esto se logra reduciendo el tamaño de los componentes principales del automóvil, de esta forma el automóvil pesará menos y como consecuencia directa se tendrá un ahorro de combustible.

Existen diferentes sistemas en el automóvil, los cuales pueden ayudar a ahorrar combustible si estos trabajan de forma eficiente, uno de los sistemas importantes es el del enfriamiento del motor, el cual consiste principalmente en un radiador, bomba para la circulación del fluido de enfriamiento, ventilador, un intercambiador de calor para el aire del habitáculo, termostato y sensor de temperatura.

Se puede estimar que un sistema de enfriamiento para un vehículo se puede reducir en un porcentaje hasta de un 10%, un ejemplo claro son los sistemas de enfriamiento que utilizan los vehículos híbridos, los cuales cuentan con un motor a combustión interna y un motor eléctrico, por lo tanto requieren de un mayor espacio en el cofre, reduciendo así el espacio para el resto de los componentes, como son los múltiples sistemas de enfriamiento para el motor a combustión, el motor eléctrico y las baterías, esto incrementa la importancia de un nuevo diseño de radiador que pueda remplazar a los múltiples sistemas de enfriamiento.

Es por lo anterior, que en este trabajo se analiza el desempeño térmico e hidráulico de un radiador de automóvil, para encontrar alternativas en el diseño de estos radiadores.

Antecedentes

Un radiador de automóvil es básicamente un intercambiador de calor compacto por el cual circula un fluido de enfriamiento que está removiendo el calor producido por la combustión en el motor, en el área de intercambiadores de calor compactos se cuenta con diferentes estudios como los publicados por (Kays & London, 1984), quienes presentan un amplio estudio de la transferencia de calor para una gran variedad de geometrías de intercambiadores de calor compactos, así mismo (Shah & London, 2014) desarrollan diferentes trabajos en los cuales reportan datos experimentales y analíticos para tubos planos usados en un intercambiador de calor, los cuales son utilizados regularmente en los radiadores de los automóviles.

En el área automotriz, específicamente en el área de enfriamiento de los motores, la técnica de enfriamiento usada es la misma desde hace varias décadas; dicha técnica consiste en utilizar un radiador tipo panel, el cual está compuesto de tubos en los cuales circula el fluido de enfriamiento, aletas, las cuales están soldadas al tubo y utiliza un ventilador para generar el fenómeno de transferencia de calor conocido como convección forzada sobre las aletas y los tubos, de esta forma se realiza el enfriamiento del motor, removiendo el calor proveniente de la combustión y arrojándolo al ambiente por medio del radiador. Esta técnica mencionada, la cual se basa en la transferencia de calor por convección forzada, desafortunadamente está alcanzando sus límites, ya que las demandas de remoción de calor cada vez son mayores y los fluidos enfriadores tradicionales como agua o etilenglicol, tienen propiedades termofísicas pobres para incrementar la transferencia de calor.

Lo anterior hace evidente la necesidad de trabajar en nuevos conceptos y tecnologías para mejorar los sistemas de enfriamiento del vehículo.

Dentro de los trabajos publicados en el área de enfriamiento automotriz por medio de radiadores se encuentran los relacionados a la geometría del radiador y al fluido de enfriamiento utilizado, el cual puede ser agua o etilenglicol a diferentes concentraciones o incluso se puede incorporar algún tipo de nanofluido, el uso del agua puede presentar corrosión y provocará daños severos al sistema de enfriamiento. (Dittus & Boelter, 1985) son de los primeros en desarrollar estudios experimentales de transferencia de calor para radiadores de automóvil tipo tubular, en su trabajo reportan correlaciones obtenidas para flujo laminar y turbulento utilizando agua pura como fluido de trabajo, así mismo también analizan diferentes configuraciones de los tubos, analizan los efectos de tener una o varias filas de tubos en el radiador.

Otro de los trabajos experimentales con los que se cuenta es con el publicado por (Achaichia & Cowell, 1988) quienes estudian la transferencia de calor y la caída de presión para tubos planos y aletas de un intercambiador de calor. Desarrollan correlaciones para el número de Stanton y factor de fricción para diferentes números de Reynolds. Por otro lado, (Farrell, Wert, & Webb, 1991) realizan experimentos, donde examinan tubos rectangulares para radiador, analizan tubos rugosos y lisos, concluyen que los tubos que tiene una rugosidad menor presentan una transferencia de calor aceptable y una menor caída de presión.

(Dong, Chen, Zhang, & Hu, 2010), trabajaron en una combinación novedosa para los tubos del radiador, los cuales consistían en no ser rectos, sino que presentan una forma ondulada, lo cual contribuye directamente a aumentar la transferencia de calor. En sus resultados experimentales reportan que el aumento de transferencia de calor y de la caída de presión es de alrededor de 38.7 %. Es decir, se tiene un impacto alto en la transferencia de calor, pero por otro lado también se afecta la caída de presión, por lo cual se requiere mayor energía para mover el fluido.

Un estudio en donde se evalúa experimentalmente el desempeño térmico de un radiador, calculando el coeficiente global de transferencia de calor de acuerdo con la técnica de ϵ -NTU es publicado por (Peyghambarzadeh, Hashemabadi, Naraki, & Vermahmoudi, 2013), quienes usan agua y etilenglicol como fluido de enfriamiento, además agregan partículas metálicas a estos fluidos para generar un nanofluido a diferentes concentraciones (0.15, 0.4 y 0.65 vol. %). Obtiene que los nanofluidos ofrecen una mejor transferencia de calor.

En el trabajo realizado por (Agudelo Ortiz, 2020), se realiza un análisis experimental para obtener un mejor rendimiento del sistema de refrigeración de un motor, por otro lado, (Avila Navas, 2020) construye un banco de pruebas para la simulación de fallas del sistema de control de refrigeración.

En cuanto a trabajos numéricos realizados en área de radiadores se tiene el publicado por (Park & Pak, 2002), en su trabajo analizaron el fenómeno de convección en un tubo plano con forma de U, donde los tubos tienen la característica de que contienen pequeñas ranuras que contribuyen a mejorar la transferencia de calor. En sus resultados reportan los números de Nusselt y la caída de presión a través del tubo, analizan los efectos que se tienen cuando se varían las condiciones de entrada del fluido de trabajo, así como también las condiciones del aire externo. Sus resultados contribuyen a un mejor diseño de los tubos a través de los cuales pasa el fluido de trabajo. (Huang, Mao, & Zhao, 2011) analizan un modelo numérico en 3d de las aletas que se posicionan entre los tubos en un radiador de calor. Reportan contornos de velocidad y presión, donde muestran que las aletas juegan un rol importante para mejorar la transferencia de calor en el radiador de calor.

Una geometría diferente a la del tubo plano es la analizada por (Patel, Subhedar, & Ramani, 2017) quienes analizan numéricamente una forma oval para el tubo del radiador de automóvil y realizan una optimización para ese tipo de geometría, obteniendo los parámetros óptimos para la forma oval, la optimización se realiza en función de obtener una mayor transferencia de calor y una mínima caída de presión.

(Kayastha, 2015), realizan un análisis numérico de un radiador de calor usando tubos elípticos, obtienen las temperaturas de salida y la caída de presión a través de ellos, para etilenglicol, diferentes espacios entre tubos y diferentes flujos máscicos. Obtienen el mejor espacio entre los tubos y el mejor flujo masico que ocasiona mejor caída de presión y una máxima temperatura de salida.

(Huminic & Huminic, 2013) hacen un análisis numérico de la transferencia de calor de diferentes configuraciones de tubos usando etilenglicol y nanofluidos. Analizan tubos circulares, ovalados y planos. Encuentran que el tubo plano ofrece una mejor transferencia de calor. Parten de un círculo y los van alargando hasta obtener un tubo plano. Otro trabajo es el desarrollado por (Delavari & Hashemabadi, 2014), quienes investigan numéricamente la mejora en la transferencia de calor para flujo laminar y turbulento de un radiador de automóvil de tubos planos, usan como fluido de enfriamiento un nanofluido, tomando como fluido base agua y etilenglicol. Comparan los Números de Nusselt obtenidos con datos experimentales para agua y etilenglicol.

Modelo Geométrico

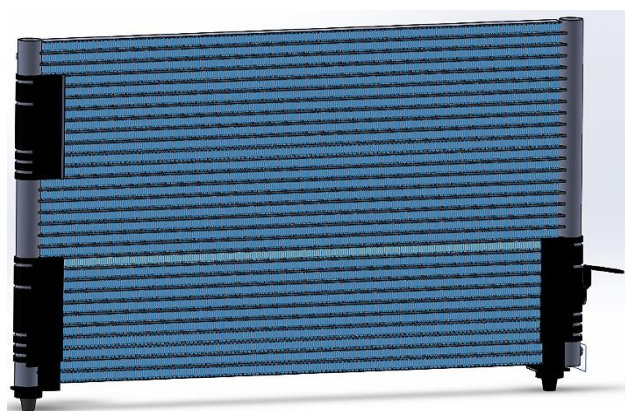


Figura 1 Configuración del radiador de automóvil
Fuente: elaboración propia [SolidWorks]

Para la elaboración de la geometría del radiador se toma como base un radiador convencional, el cual está basado en la configuración de panel como puede verse en la Figura 1.

En la Figura 2 se muestra una ilustración de la configuración del radiador usada para el análisis, la cual está compuesta por tubos paralelos, los cuales son separados por aletas, dentro de los tubos fluye el fluido refrigerante, el cual puede ser agua, etilenglicol, o una mezcla de estos, para este estudio se utiliza una mezcla de 80% agua y 20% etilenglicol. Sobre la superficie de los tubos planos y las aletas pasa aire, lo cual provoca el fenómeno de convección forzada y ayuda a la transferencia de calor.

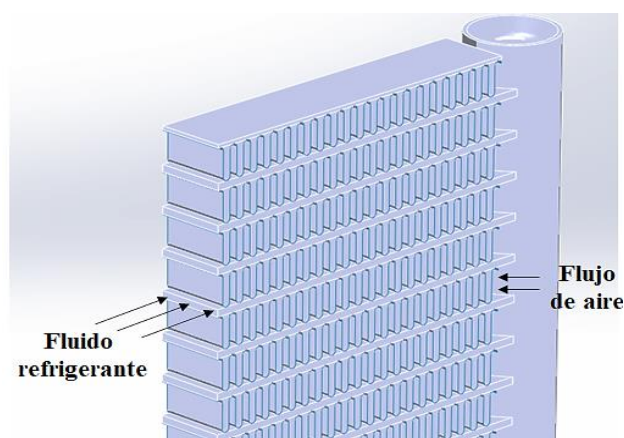


Figura 2 Geometría del radiador a analizar, tubos planos con aletas, fluido refrigerante circula en los tubos planos y flujo de aire pasa sobre la superficie de los tubos y las aletas

Fuente: elaboración propia [SolidWorks]

El análisis de este tipo de radiadores se puede simplificar al análisis de un solo tubo, sobre el cual se deben aplicar las condiciones necesarias para lograr simular su funcionamiento real en el radiador.

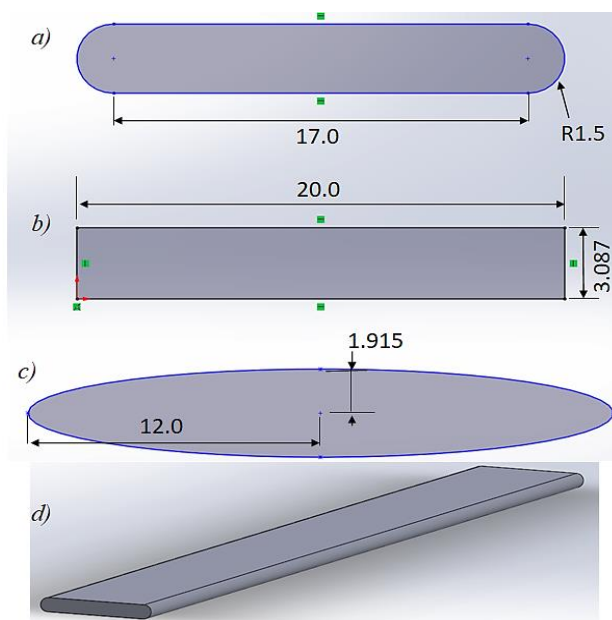


Figura 3 Geometría de los tubos del radiador que se analizan, dimensiones en mm. a) tubo plano, b) tubo cuadrado, c) tubo elíptico y d) longitud del tubo

Fuente: elaboración propia [SolidWorks]

El presente trabajo se basa en analizar las geometrías que pueden ser usadas en los tubos del radiador, los aspectos básicos que se deben cuidar en la elección de la geometría del tubo del radiador son, que exista una buena transferencia de calor, una menor caída de presión y que su fabricación sea de bajo costo.

Las geometrías de la sección transversal del tubo que se investigan en el presente trabajo se muestran en la Figura 3, estas son construidas en SolidWorks; a) presenta la sección transversal de un tubo plano, b) un tubo rectangular y c) un tubo con una sección transversal elíptica. Se observan las dimensiones usadas para la construcción de cada una de la geometría y d) muestra el largo del tubo tomado para el análisis, el cual fue de 31 cm.

Las dimensiones de cada una de las geometrías presentadas en el Figura 3, se obtienen tomando el mismo diámetro hidráulico ($D_h=5.349$ mm.), se toma el mismo diámetro hidráulico para poder hacer una comparación entre las diferentes secciones transversales. En el trabajo desarrollado por (Huminic & Huminic, 2013) comparan diferentes secciones transversales, pero cada una de ellas tiene diferentes diámetro hidráulico.

Modelo Computacional

La geometría de los tubos es construida en SolidWorks se guarda en formato .IGES y es exportada al software ICEM-ANSYS para hacer el proceso del mallado, posteriormente se procesa y postprocesa en FLUENT para obtener los resultados numéricos.

Análisis de Malla

Se realiza discretización del dominio, iniciando con una malla que contenga poca cantidad de elemento, posteriormente se incrementa el número de elemento hasta obtener una malla con la calidad suficiente para que las variables de interés no sufran variaciones debido al número de elementos de la malla.

El Gráfico 1 muestra el análisis de malla realizado, en la gráfica tenemos la temperatura tomada a lo largo de una línea en la sección transversal en la salida del tubo.

En el Gráfico 2 se muestra a detalle la temperatura para cada una de las mallas construidas. Se puede observar que para las primeras mallas la temperatura sufre pequeños cambios, y se mantiene constante a partir de la Malla VI, por lo cual se toma esta malla como la indicada para realizar el análisis posteriormente.

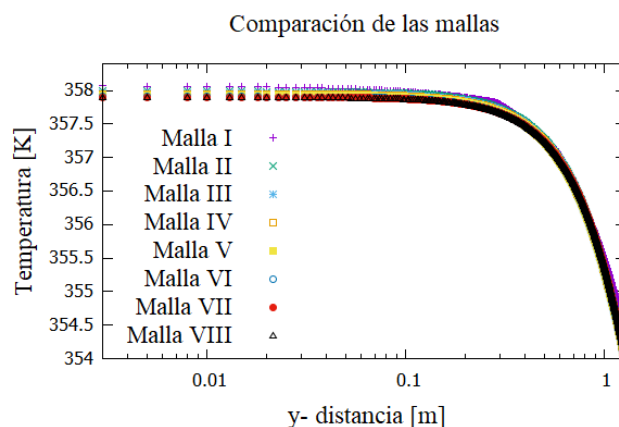


Gráfico 1 Variación de la temperatura a lo largo de la sección transversal para diferentes mallas
Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

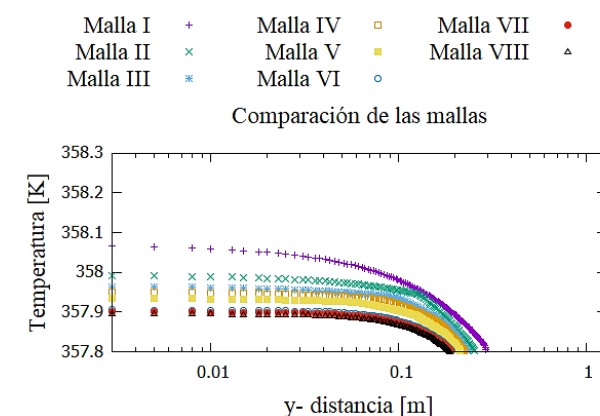


Gráfico 2 Vista a detalle de la variación de la temperatura para las diferentes mallas
Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

Malla	Nodos
I	17 400
II	51 200
III	87 000
IV	177 750
V	590 400
VI	896 000
VII	1 208 400
VIII	1 274 200

Tabla 1 Propiedades termofísicas del agua
Fuente: elaboración propia [Word]

La Tabla 1 muestra el número de nodos para cada malla. Se construyen y analizan 8 mallas con diferente número de nodos. La Malla I contiene 17 400 nodos y la Malla 8 que es la más densa contiene 1 274 200 nodos.

Como ya se mencionó la malla que se utiliza para realizar el análisis es la Malla VI, se usa esta porque a partir de ella la temperatura encontrada ya no sufre cambios significativos.

La Figura 4 muestra la malla generada para el dominio de la geometría del tubo plano, sobre esta malla se aplicarán las condiciones de frontera y posteriormente se realizará la solución. La malla generada tiene las siguientes características. Nodos: 896,000, Quads=53,014 y Hexas=708,197.

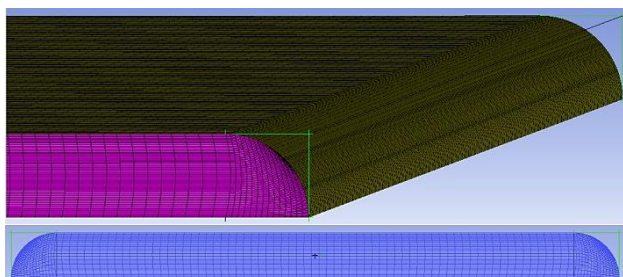


Figura 4 Vista isométrica y frontal de la malla generada para el dominio de la geometría del tubo plano
Fuente: elaboración propia [ICEM-ANSYS]

Condiciones de Frontera

Cuando ya se tienen la malla adecuada se procede a establecer las condiciones de frontera al dominio que se va a analizar. En la Figura 5 se muestran condiciones de frontera asignadas, se tiene una condición de entrada en la superficie por donde entra el fluido que proviene del motor al tubo, una condición de salida en el extremo por donde sale el fluido. En las paredes del tubo se asigna la condición de convección constante. Para no simular todo el tubo y ahorrar tiempo de cómputo se asigna la condición de simetría.

En el análisis numérico se toman ciertas consideraciones que ayudan a simplificar el modelo numérico y a que este logre los criterios de convergencia más rápido. Se toman propiedades constantes para el fluido de enfriamiento, la temperatura del fluido de enfriamiento en la entrada del tubo es de 313 K, el fluido de enfriamiento es una mezcla de 80 % agua y 20% etilenglicol, la temperatura ambiente se considera de 303 K, el coeficiente convectivo de transferencia de calor en las paredes del tubo es de 50 W/m²K, que es el coeficiente convectivo estimado cuando una automóvil viaja a una velocidad de 70 km/h (Park & Pak, 2002), estado estable para la transferencia de calor, flujo laminar y el modo de transferencia de calor por radiación es despreciado.

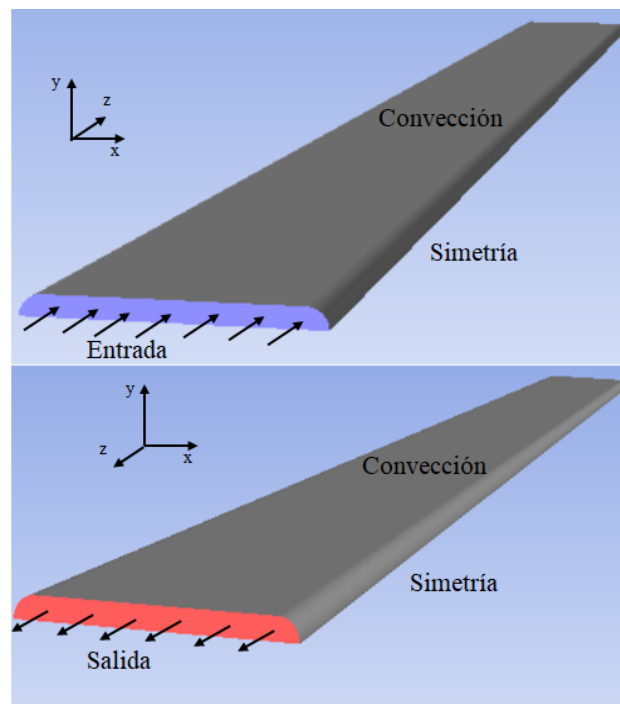


Figura 5 Asignación de las condiciones de frontera
Fuente: elaboración propia [ICEM-ANSYS]

Propiedades Termofísicas

En los sistemas de enfriamiento usados en los automóviles se emplea una mezcla de agua-etilenglicol, el porcentaje de cada uno de estos depende de las condiciones ambiental en las cuales se vaya a usar el automóvil. En el presente trabajo se usa una mezcla de 80% agua y 20% etilenglicol. Las propiedades termofísicas como la densidad, la viscosidad, la conductividad térmica y el calor específico usadas en este análisis son las que se presentan en la Tabla 2. Las propiedades para la mezcla 80% agua – 20% etilenglicol son tomadas del trabajo publicado por (Peyghambarzadeh, Hashemabadi, Naraki, & Vermahmoudi, 2013).

Propiedad Termofísicas	Valor		
	Agua	Etilenglicol	Agua 80%-Etilenglicol 20%
Densidad ρ [kg/m ³]	992	1101 ^a	1008
Viscosidad μ [kg/m – s]	0.00065	0.0095 ^b	0.0019
Conductividad térmica k [W/m – °C]	0.633	0.256 ^b	0.58
Calor específico C_p [J/kg – °C]	4174	2382 ^c	4020

Tabla 2 Propiedades termofísicas, densidad, viscosidad conductividad térmica y calor específico, del agua pura, etilenglicol puro y una mezcla de agua 80% y etilenglicol 20% a 40 °C

Ecuaciones Gobernantes

Las ecuaciones gobernantes que se deben solucionar para el dominio que se desea analizar son: ecuación de conservación de masa (ecuación 1), ecuaciones de momento (ecuaciones 2-4) y la ecuación de energía (ecuación 5).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T \quad (5)$$

Validación del modelo numérico

Todo modelo numérico requiere ser validado, para comprobar que las consideraciones tomadas, el dominio y las ecuaciones gobernantes se resuelven de forma adecuada. Para la validación del modelo numérico, se toma la correlación obtenida por (Vajjha, Das, & Ray, 2015), la cual obtuvieron para un tubo tipo plano, el fluido de enfriamiento que usaron es etilenglicol puro, para el cual tomaron una temperatura de 40 °C a la entrada del tubo de enfriamiento. Realizaron experimentos para flujo laminar y turbulento, obteniendo correlaciones para ambos casos. La ecuación (6) muestra la correlación que obtuvieron para flujo laminar, la cual se utilizara para la validación del modelo numérico.

$$Nu = 1.9421 \left(RePr \frac{D_h}{z} \right)^{0.3} \left(RePr \frac{D_h}{z} \right) \geq 33.33 \quad (6)$$

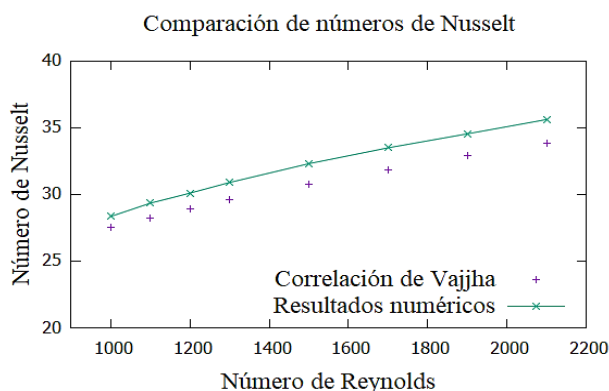


Gráfico 3 Comparación de los resultados numéricos obtenidos para etilenglicol puro con la correlación experimental obtenida por Vajjha

Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

En el Gráfico 3 se puede observar la comparación de los resultados numéricos obtenidos con el modelo numérico de este trabajo con los resultados de la correlación obtenida por Vajjha (ecuación 6). Se puede observar que los resultados del modelo numérico tienen una buena concordancia que los resultados calculados con la correlación, lo cual nos indica que el modelo numérico puede utilizarse para realizar el estudio.

Para realizar una comparación entre las diferentes geometrías que se analizan se calcula para cada una de ellas la generación de entropía, la cual se utiliza para cuantificar el rendimiento del sistema.

La ecuación (7) determina la generación de entropía local, se compone de dos partes, la primera que determina la generación de entropía local debido a los efectos de la transferencia de calor, para realizar este cálculo se utilizan los campos de temperaturas; una segunda parte de la ecuación determina la generación de entropía local debido a los efectos de la mecánica de los fluidos, en este caso se utilizan los campos de velocidades para realizar el cálculo, con esto se tienen contemplados ambos efectos, los que se producen debido a la transferencia de calor y los producido por la caída de presión.

$$s_{gen} = \frac{k}{T^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{2} \left[2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Resultados

Dentro de los resultados obtenidos se encuentran los de transferencia de calor y los hidrodinámicos.

Para la transferencia de calor se obtiene el número de Nusselt, el Gráfico 4 muestra el número de Nusselt obtenido para diferentes números de Reynolds, esto para el análisis del tubo plano. Se puede observar, como es de esperarse, un incremento del número de Nusselt conforme la velocidad del fluido de enfriamiento se incrementa, obteniendo de esta manera una mayor transferencia de calor para números mayores de Reynolds.

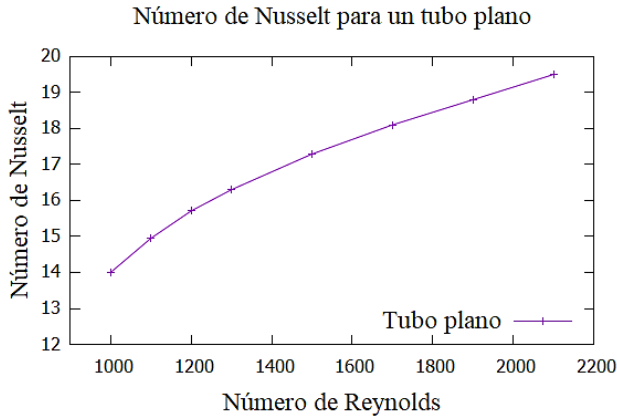


Gráfico 4 Número de Nusselt para diferentes números de Reynolds para la configuración de un tubo plano
Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

En el Gráfico 5 se muestra la diferencia de presión entre la entrada y la salida del tubo plano. Se observa que conforme aumenta la velocidad del fluido de trabajo, el incremento en la diferencia de presiones aumenta también, requiriendo de esta manera una mayor cantidad de potencia suministrada por la bomba de circulación para mover el fluido de enfriamiento.

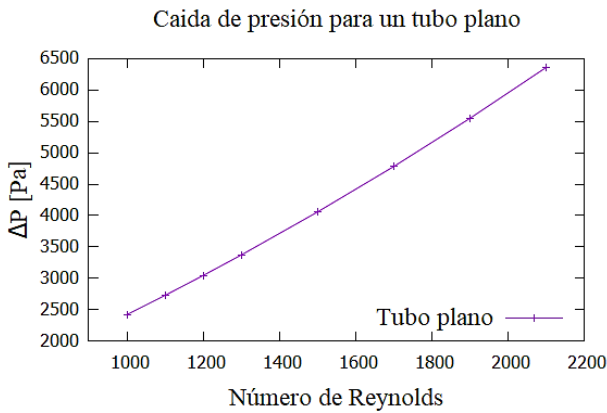


Gráfico 5 Diferencia de presión a lo largo del tubo para diferentes números de Reynolds para la configuración de un tubo plano
Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

Una vez obtenidos los números de Nusselt y la caída de presión para cada caso de estudio, se realiza una comparación de las diferentes geometrías utilizadas, para poder hacer una elección de cuál es la que ofrece un mejor rendimiento térmico e hidráulico.

En el Gráfico 6 su muestra una comparación de las diferentes geometrías estudiadas en este trabajo, se observa que la geometría que presenta el mayor número de Nusselt es la del tubo plano, seguida por el perfil cuadrado y el elíptico.

Esto nos indica que la geometría del tubo plano presenta una mayor remoción de calor proveniente del fluido de enfriamiento hacia el ambiente, donde la cantidad de calor removida proviene directamente del motor.

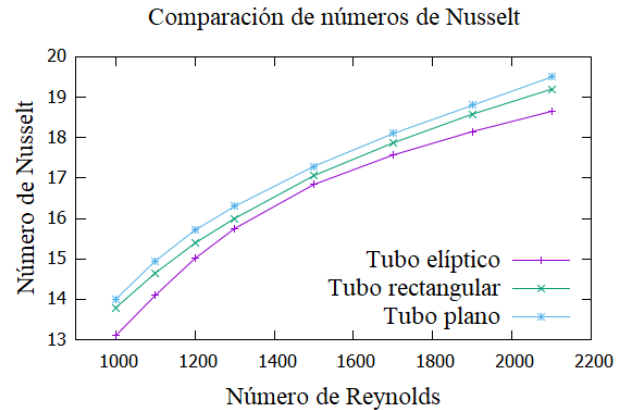


Gráfico 6 Número de Nusselt para diferentes números de Reynolds para la configuración de un tubo plano, rectangular y elíptico
Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

Así como se hace una comparación de la transferencia de calor, también se compara la diferencia de presión para cada una de las geometrías. En el Gráfico 7 se puede observar la diferencia de presión para cada una de las geometrías analizadas. Se observa que todas las geometrías presentan el mismo comportamiento, se tiene que la geometría con una menor caída de presión es la elíptica, y la que presenta la mayor caída de presión en la geometría rectangular. Por lo tanto, la geometría que requiere menos energía para mover el fluido de enfriamiento a través de los tubos contenidos en el radiador es la geometría elíptica.

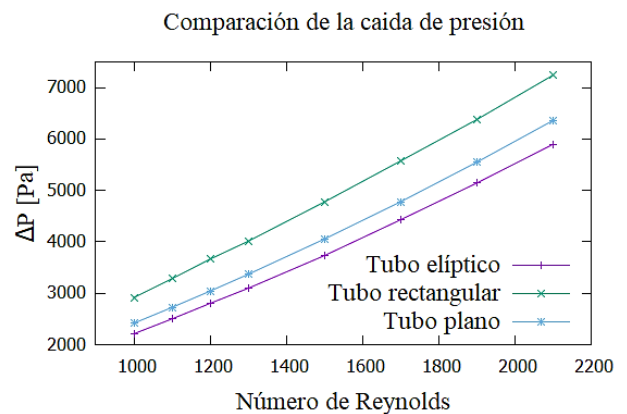


Gráfico 7 Diferencia de presión a lo largo del tubo para diferentes números de Reynolds para la configuración de un tubo plano, rectangular y elíptico
Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

De las gráficas anteriores se obtiene que la geometría que ofrece un mejor rendimiento térmico es la del tubo plano, pero también esta tiene una mayor diferencia de presión que la del tubo elíptico, si el objetivo es tener una mejor de transferencia de calor sin importar la caída de presión, se puede elegir la geometría del tubo plano.

Si por otro lado se requiere una menor caída de presión, se elige la del tubo elíptico. Es por lo que se debe obtener un balance entre la transferencia y la caída de presión obtenidas, para esto se usa el análisis de generación de entropía.

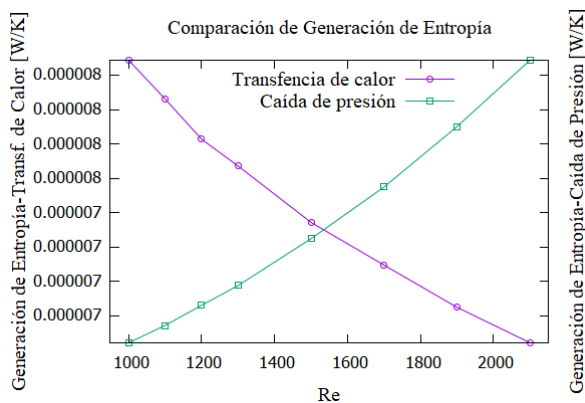


Gráfico 8 Generación de entropía debido a la transferencia de calor y la caída de presión para el tubo plano a diferentes números de Reynolds

Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

El Gráfico 8 muestra la generación de entropía debido a la transferencia de calor y a la caída de presión para un tubo plano. Observamos que la entropía generada por la transferencia de calor disminuye con el aumento del número de Reynolds, y que en el caso de la generación de entropía debido a la caída de presión sucede lo contrario, esta aumenta con el aumento del número de Reynolds.

Por lo tanto, se debe tener cuidado ya que debe existir un balance entre ambas generaciones de entropía, esto para encontrar un punto óptimo entre la transferencia de calor obtenida y la caída de presión producida.

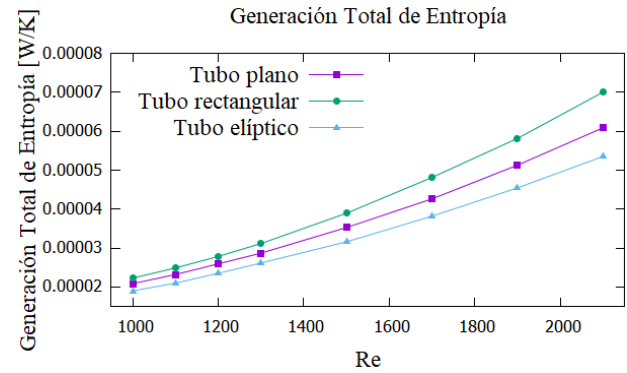


Gráfico 9 Generación de entropía total para las geometrías analizadas en el presente trabajo para diferentes números de Reynolds

Fuente: elaboración propia [Gnuplot]

El Gráfico 9 muestra la generación de entropía total para las diferentes geometrías analizadas a diferentes números de Reynolds. Los resultados muestran que la geometría que genera una mayor cantidad de entropía es la cuadrada, la que presenta una menor generación de entropía es la elíptica, es por esto que la geometría elíptica ofrece un mejor rendimiento en cuanto al balance de transferencia de energía y la caída de presión.

Conclusiones

Se analizan un radiador de calor para el enfriamiento de un automóvil. Diferentes geometrías de la sección transversal de un tubo de radiador de automóvil son estudiadas y comparadas. Se construyen las geometrías en CAD, se malla el dominio que se desea estudiar y se realiza un análisis de sensibilidad de malla, para posteriormente obtener la solución de las ecuaciones gobernantes y condiciones de frontera.

Se compara el modelo numérico usado con las correlaciones encontradas en la bibliografía, teniendo que el modelo numérico tiene una muy buena exactitud de acuerdo a las correlaciones, esto nos sirve para poder usar el modelo numérico en este y en futuros trabajos.

De los resultados obtenidos se tiene que la geometría del tubo plano ofrece una mayor transferencia de calor, esto debido que los números de Nusselt encontrados son mayores para esta geometría. Por otro lado, la caída de presión para la geometría elíptica es la menor, es decir, esta geometría ofrece la mayor transferencia de calor, pero también se requiere menor energía para mover el fluido de enfriamiento.

Considerando solamente la transferencia de calor, la geometría del tubo plano se debería de usar en los tubos que componen un radiador de automóvil, ya que con esto se puede obtener una mayor transferencia de calor.

Por otro lado, se realiza un análisis de generación de entropía, el cual nos indica que la geometría elíptica es la que genera una menor cantidad de entropía, por lo tanto, es la que tiene un mejor balance entre la transferencia de calor y la caída de presión.

En futuros trabajos se propondrá una configuración completa del radiador de calor en base a los resultados aquí obtenidos, esto para comprobar que el radiador cumple con su objetivo de mantener el motor a la temperatura adecuada y obtener una configuración completa del radiador.

Nomenclatura

D	Diámetro (m)
k	Conductividad térmica, (W/m-K)
c_p	Calor específico, (kJ/kg-K)
\dot{S}_{gen}'''	Generación de entropía por unidad de volumen [W/m ³ K]
T	Temperatura, (K)
P	Presión, (Pa)
u	Componente de la velocidad en la dirección x, (m/s)
v	Componente de la velocidad en la dirección y, (m/s)
w	Componente de la velocidad en la dirección z, (m/s)

Símbolos griegos

Δ	Diferencia
ρ	Densidad, (kg/m ³)
μ	Viscosidad dinámica, (kg/m-s)

Subíndice

h	Hidráulico
-----	------------

Referencias

Achaichia, A., & Cowell, T. A. (1988). Heat transfer and pressure drop characteristics of flat tube and louvered plate fin surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(2), 147–157.

Agudelo Ortiz, J. V. (2020). Fabricación e instalación de una toma auxiliar de aire para el carenaje del motor de la Aeronave T-90 CALIMA para obtener un mejor rendimiento del sistema de refrigeración.

Avila Navas, H. A. (2020). Modelo didáctico del funcionamiento del motor y tren de potencia, para el taller de automecatronica de la Universidad los Libertadores.

Delavari, V., & Hashemabadi, S. H. (2014). CFD simulation of heat transfer enhancement of Al₂O₃/water and Al₂O₃/ethylene glycol nanofluids in a car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), 380–390.

Dittus, F. W., & Boelter, L. M. K. (1985). Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 12(1), 3–22.

Dong, J., Chen, J., Zhang, W., & Hu, J. (2010). Experimental and numerical investigation of thermal-hydraulic performance in wavy fin-and-flat tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 30(11–12), 1377–1386.

Farrell, P., Wert, K., & Webb, R. (1991). Heat transfer and friction characteristics of turbulator radiator tubes. *SAE Transactions*, 218–230.

Huang, H., Mao, F., & Zhao, X. (2011). Numerical Simulation of Heat-Transfer Character of Ribbon-Tubular Radiator on Air Side. 2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 505–508. IEEE.

Huminic, G., & Huminic, A. (2013). Numerical analysis of laminar flow heat transfer of nanofluids in a flattened tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 52–57.

Kayastha, K. S. (2015). CFD simulation of heat transfer analysis of automobile radiator using helical tubes. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 24–35.

Kays, W. M., & London, A. L. (1984). Compact heat exchangers.

Park, K. W., & Pak, H. Y. (2002). Flow and heat transfer characteristics in flat tubes of a radiator. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, 41(1), 19–40.

Patel, H. V, Subhedar, D. G., & Ramani, B. (2017). Numerical Investigation of performance for Car Radiator Oval Tube. *Materials Today: Proceedings*, 4(9), 9384–9389.

Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Naraki, M., & Vermahmoudi, Y. (2013). Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 8–16.

Shah, R. K., & London, A. L. (2014). *Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data*. Academic press.

Vajjha, R. S., Das, D. K., & Ray, D. R. (2015). Development of new correlations for the Nusselt number and the friction factor under turbulent flow of nanofluids in flat tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 353–367.

Efecto del grupo funcional en la adsorción de Ag(I) en soluciones sintéticas con materiales mesoporosos de sílica

Effect of the functional group on the adsorption of Ag (I) in synthetic solutions with silica mesoporous materials

SALAZAR-HERNÁNDEZ, Mercedes^{†*}, SALAZAR-HERNÁNDEZ, Carmen^{''}, RANGEL-PORRAS, Gustavo['] y CORONA-ARROYO, Mario[']

[']Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, México.

^{''}Instituto Politécnico Nacional, Unidad de Ingeniería, México.

ID 1^{er} Autor: Mercedes, Salazar-Hernández / ORC ID: 0000-0001-8039-8124, SCOPUS Author ID: 56182864800

ID 1^{er} Coautor: Carmen, Salazar-Hernández / ORC ID: 0000-0002-6901-2937, SCOPUS Author ID: 25928824300

ID 2^{do} Coautor: Gustavo, Rangel-Porras / SCOPUS Author ID: 56000762500

ID 3^{er} Coautor: Mario, Corona-Arroyo / SCOPUS Author ID: 56748085300

DOI: 10.35429/JIE.2020.11.4.24.30

Recibido Enero 14 2020; Aceptado Marzo 31, 2020

Resumen

Una de las principales metodologías utilizada en la industria para recuperación del oro y plata de las soluciones ricas de cianuración, es la adsorción en carbón activado, proceso que presenta como principal desventaja la formación de finos en las cribas clasificadoras que es en donde se recupera, dichos finos representan una considerable pérdida de valores en el proceso, es por ello que la búsqueda de alternativas que permitan la recuperación del oro y la plata de las soluciones ricas de cianuración es de interés para la hidrometalurgia, en este sentido la preconcentración magnética podría ser una alternativa para dicho proceso; el presente trabajo muestra la síntesis, caracterización y estudio de la capacidad de adsorción de Ag(I) de materiales mesoporosos de sílica modificados con magnetita. Dichos materiales mostraron una buena retención de la magnetita en su estructura en función a la presencia de los grupos amino en su estructura, así como capacidades adsorción de plata de 86.21 – 19.8 mgg⁻¹.

Abstract

One of the main methodologies used in the industry for the recovery of gold and silver from cyanidation-rich solutions is the adsorption of activated carbon, a process that presents as the main disadvantage the formation of fines in the sorting screens that is where it is recovered, These fines represent a considerable loss of values in the process, which is why the search for alternatives that allow the recovery of gold and silver from the cyanidation rich solutions is of interest to hydrometallurgy, in this sense the magnetic preconcentration could be an alternative to this process; The present work shows the synthesis, characterization and study of the adsorption capacity of Ag (I) of mesoporous materials of silica modified with magnetite. These materials showed a good retention of magnetite in their structure based on the presence of amino groups in their structure, as well as silver adsorption capacities of 86.21-19.8 mgg⁻¹.

Cianuración Ag, Recuperación Magnética, Sílica

Cyanidation process, Magnetic recovery, Silica

Citación: SALAZAR-HERNÁNDEZ, Mercedes, SALAZAR-HERNÁNDEZ, Carmen, RANGEL-PORRAS, Gustavo y CORONA-ARROYO, Mario. Efecto del grupo funcional en la adsorción de Ag(I) en soluciones sintéticas con materiales mesoporosos de sílica. Revista de Ingeniería Industrial. 2020. 4-11:24-30.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: enriquecontreras@utez.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Industrialmente en México y en el mundo una de las metodologías más usada para la recuperación del oro y/o plata de sus soluciones de cianuración, es la adsorción en carbón activado, proceso mejor conocido por sus siglas en inglés como CIL (*Carbon in Leach*) entre las ventajas que este proceso ofrece es el costo moderado del adsorbente, así como la simplicidad del proceso. En general este proceso consiste en dejar en contacto el adsorbente (carbón activado) con la solución de lixiviación, comúnmente, soluciones ricas de cianuración; dicho contacto puede realizarse en columnas (CIC) o en tanques agitados (CIL) de los cuales el carbón es recuperado en cribas clasificadoras. La simplicidad de este proceso; es lo que lo hace tan atractivo para la industria. Sin embargo, la principal desventaja que este tiene es el desgaste del carbón en dichas cribas que producen partículas finas de carbón con valores metálicos adsorbidos. Las partículas finas se pierden en la mayoría de los casos ocasionando una pérdida considerable de los valores en el proceso, por ejemplo, la unidad minera IAMGOLG's Essakane en Burkina Faso ha reportado una formación de finos al mes de 23.5 ton que corresponden a una pérdida de 1938 g/ton de plata mensualmente [1-3].

La recuperación de los finos en algunas plantas en el mundo se realiza mediante una serie de circuitos de decantación y filtros-prensa, que frecuentemente son difíciles de operar por el tamaño fino del carbón activado. En México, la formación de finos en los procesos de CIL y CIC representan una pérdida considerable de los valores metálicos en los procesos de cianuración; muy específicamente en la Unidad Minero-Metalúrgica de Palmarejo se tiene una formación de 5-6 ton diarias de finos que al mes corresponden a 180 ton de carbón [2,3].

En este sentido, la búsqueda de alternativas que permitan eliminar la generación de finos de estos procesos es de interés en la metalurgia. Recientemente en los últimos años se han estudiado una gran variedad de nanomateriales y nano materiales híbridos magnéticos como adsorbentes en la recuperación de iones metálicos y otros contaminantes de soluciones acuosas [17-19].

Los nanomateriales magnéticos, se han propuesto como una alternativa en la hidrometalurgia para la recuperación de metales preciosos principalmente (Pd, Pt, Rh, Ag y Au) y tierras raras de *procesos de recuperación de desechos electrónicos* [4-12]. Estas propuestas implican el uso de un material nano-estructurado magnético como Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, CoFe_2O_4 , MnFe_2O_4 entre otros. Estos materiales suelen ser recubiertos con una película de un surfactante, polímero o silica como una película protectora y que favorezca la modificación de la superficie del magneto con diversos grupos funcionales que otorgan la selectividad al ion metálico de interés [4]. Por lo que, el presente trabajo muestra el desarrollo de un proceso de recuperación magnética empleando materiales funcionalizados de sílice con grupos amino, tiol y urea como una alternativa al uso del carbón activado.

Metodología

Síntesis de sílice mesoporosa, mediante precursores de bajo costo

La síntesis de la sílice mesoporosa, se realizará mediante la metodología reportada previamente por Avalos y colaboradores [13,14]. Donde se utiliza como precursor de la sílice al $\text{Si}(\text{OH})_4$ que se obtiene a partir de silicato de sodio y una columna de intercambio DOWEX 50WX8-100, recolectando la fracción ácida de pH 1-3. [13,14]. Por lo que, el ácido silícico obtenido de la columna de intercambio se gelifica en una solución de Pluronic P-123 (templante) manteniendo el sistema a reflujo por 24 hr. El sólido formado es filtrado y se elimina el P-123 por extracción sólido/líquido con etanol acidificado; finalmente el mesoporoso de sílice se filtra y seca por 24 hr a 80°C . La caracterización del material se realizará mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier, estudios de adsorción-desorción de N_2 y microscopia electrónica de barrido (MEB).

Obtención de los materiales híbridos mesoporosos

La obtención de sílice funcionalizadas con grupos: amino, dietilenamino y trietilenamino, se realizó mediante técnicas de postsíntesis utilizando un 25% en mol del precursor del grupo funcional con respecto a la sílice e hidróxido de amonio como catalizador de condensación. La Tabla 1, muestra las estructuras de los materiales que se propone obtener y los respectivos precursores de los diferentes grupos funcionales.

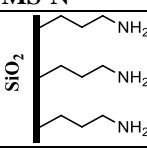
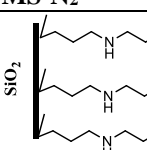
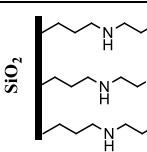
Estructura	MS-N 
Precursor	3-(aminopropil)trimetoxisilano
Estructura	MS-N₂ 
Precursor	3-(diaminopropil)metildimetoxisilano
Estructura	MS-N₃ 
Precursor	N¹-(3-trimetoxisililpropil)dietiltriamina

Tabla 1 Precursores de los grupos funcionalizantes para la obtención de las sílices modificadas

La modificación de las sílices funcionalizadas con magnetita: se realizará con nanopartículas de magnetita obtenidas a partir de la precipitación de las sales de cloruro férrico y ferroso con NaOH.

Estudio de la adsorción-desorción de Ag con sílices funcionalizadas con soluciones sintéticas de Ag(I)

Los estudios de adsorción de Ag se evaluarán con la cinética de adsorción de la plata, colocando 0.1g del material con 20 mL de una disolución de plata a las diversas concentraciones en estudio (50, 100, 200, 500, 1000ppm) por tiempos de contacto de 5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos y se evaluará la concentración residual de la plata en la disolución medida por absorción atómica.

La cinética de adsorción se estudiará mediante los modelos de primer, segundo pseudo-orden y bajo el modelo de difusión: además, se evaluarán las isothermas de adsorción mediante el modelo de Langmuir y Freundlich.

Resultados

Síntesis y caracterización de los materiales

El Gráfico 1, muestra la caracterización por FTIR de los materiales modificados con los diversos grupos funcionales y con la magnetita. La presencia de la materia orgánica se observa en el rango de los 3000-2500 cm^{-1} y de 1600-1200 cm^{-1} . En todos los casos se observa un desplazamiento de la vibración de δ C-N en los materiales modificados con la magnetita, lo que sugiere la interacción $\text{N} \rightarrow \text{Fe}$ en los materiales y el anclaje de esta vía la coordinación del Fe con los grupos amino funcionales de los materiales.

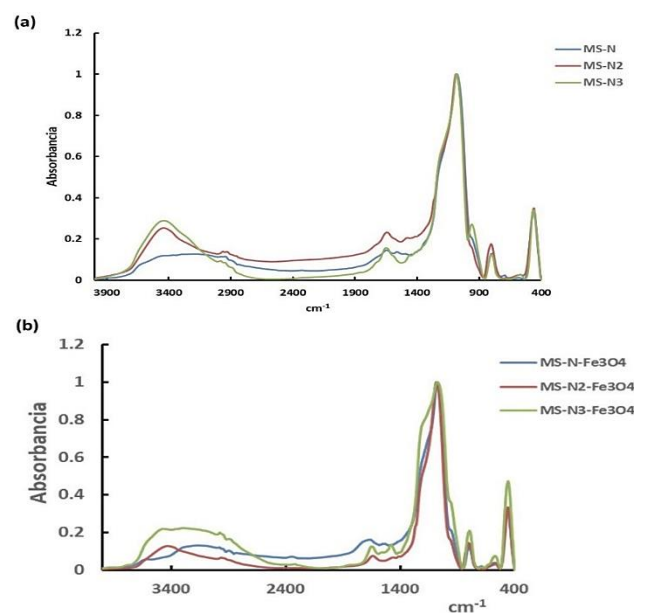
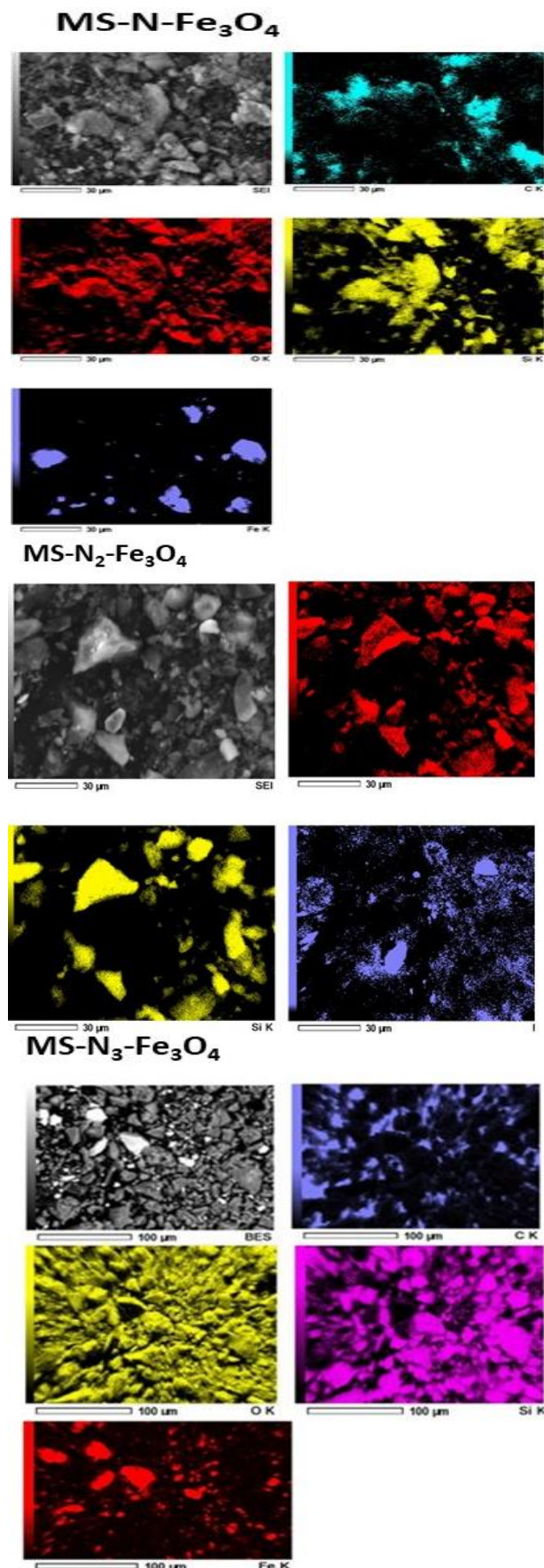


Gráfico 1 FTIR comparativo de: (a) MS-N, MS-N₂ y MS-N₃ y (b) MS-N-Fe₃O₄, MS-N₂-Fe₃O₄ y MS-N₃-Fe₃O₄

La caracterización por MEB-EDS de los materiales, mostro la distribución de la magnetita en el material asociada a la materia orgánica (C), lo que sugiere en efecto el anclaje de esta vía las interacciones del Fe con los grupos NH₂ del material, observándose una mayor cantidad de Fe (Fe₃O₄), en función al número de N presentes en el material (Figura 1). La caracterización por fisisorción de N₂, se resume en la Tabla 2. Todos los materiales mostraron una isoterma tipo IV, típica para materiales mesoporosos y lazos de histéresis H2, de acuerdo a la clasificación de la IUPAC, mostrándose materiales mesoporosos.

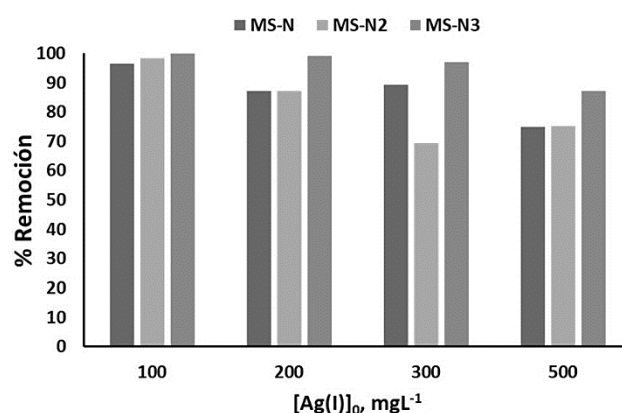
	A [m ² g ⁻¹]	V[cm ³ g ⁻¹]	d[nm]
MS-N-Fe ₃ O ₄	75.95	0.143	7.09
MS-N ₂ -Fe ₃ O ₄	128.9	0.234	6.58
MS-N ₃ -Fe ₃ O ₄	169.14	0.23	5.7

Tabla 2 Propiedades Texturales

Figura 1 MEB-EDS de los materiales modificados con magnetita: MS-N, MS-N₂ y MS-N₃

Estudios de adsorción de Ag(I)

La Figura 3, muestra la capacidad de adsorción de los materiales en estudio, en donde se observa, que a diferencia de la MS-N₃-Fe₃O₄, los materiales MS-N-Fe₃O₄ y MS-N₂-Fe₃O₄, no mostraron una remoción cuantitativa del 99% de la plata en el rango de concentraciones iniciales de la plata de 100-500mgL⁻¹. La MS-N-Fe₃O₄ y MS-N₂-Fe₃O₄, mostraron una remoción del 99% a concentraciones bajas de 100 y 200 ppm, disminuyendo su capacidad de remoción a concentraciones moderadas de 300 y 500 ppm, removiendo entre el 80-75 % de la plata únicamente (Gráfico 2).

Gráfico 2 Capacidad de Adsorción de la Ag(I) con la MS-N-Fe₃O₄, MS-N₂-Fe₃O₄ y MS-N₃-Fe₃O₄

Los datos experimentales fueron estudiados mediante los modelos de adsorción de Langmuir, Freundlich y Tempkin. El modelo de Langmuir, presume una adsorción en monocapa y nula interacción entre sorbato-adsorbente y sorbato-sorbato, mientras que los modelos de adsorción de Lagmuir y Tempkin, consideran la adsorción en policapas y las interacciones sorbato-sorbente. La Tabla 3, resume los modelos estudiados [15,16].

Modelo Langmuir	$q_e = \frac{Q_0 K_L C_e}{1 + K_L C_e}$ <p>Dónde: q_e=carga al equilibrio[mg/g] Q_0=carga máxima [mg/g] K_L=Constante de Langmuir [L/g] C_e= [sorbato] equilibrio en la solución [mg/L]</p>
Freundlich	$q_e = K_F C_e^{1/n}$ <p>Dónde: q_e=carga al equilibrio[mg/g] K_F=Constante de Freundlich [mg/g] C_e= [sorbato] equilibrio en la solución [mg/L]</p>

Temkin	$q_e = \frac{RT}{b} \ln A_t C_e$
	Dónde: q_e =carga al equilibrio[mol/g] T =temperatura en K. R = constante universal de los gases (8.314Jmol ⁻¹ K ⁻¹) b =constante de Temkin asociada al calor de adsorción (Jmol ⁻¹) A_t =constante de Temkin C_e = [sorbato] equilibrio en la solución [mg/L]

Tabla 3 Modelos de Adsorción

Todos los materiales mostraron un equilibrio de adsorción a los 20 minutos de contacto (Gráfico 3). Se observó en general una adsorción favorable de acuerdo a los modelos de Langmuir. La Tabla 4, resume los parámetros termodinámicos de la adsorción de la plata

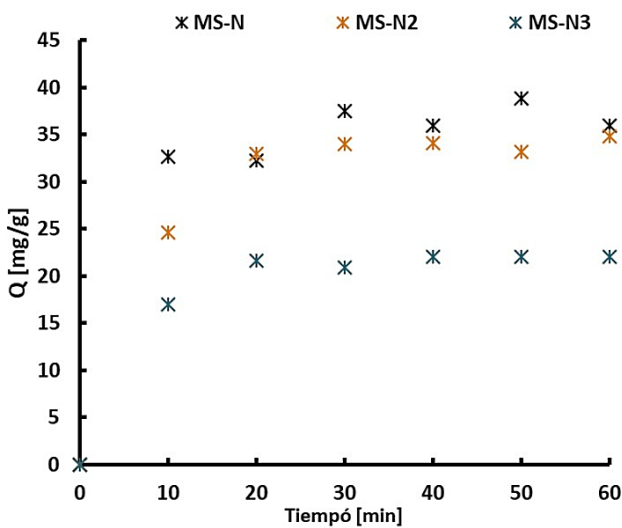


Gráfico 3 Isotermas de adsorción

Modelo	Parámetros	MS-N ₃ -Fe ₃ O ₄	MS-N ₂ -Fe ₃ O ₄	MS-N-Fe ₃ O ₄
Langmuir	Q_0 [mg g ⁻¹]	86.21	19.76	30.12
	K_L [L mg ⁻¹]	0.0299	0.588	0.122
	R^2	0.9563	0.9869	0.9242
	Δq (%)	7.73	4.4	6.9
	R_L (100 - 500 ppm)	0.031-0.177	0.0037-0.016	0.075-0.14
Freundlich	ΔG [KJ mol ⁻¹]	-1.26	-7.91	-24.45
	K_F [mg g ⁻¹] ^{1/n}	4.17	8.216	0.0167
	1/n	0.497	0.2504	2.439
Temkin	R^2	0.8705	0.8761	0.9615
	b [KJ mol ⁻¹]	0.127	0.876	0.288
	A [L g ⁻¹]	0.207	19.51	0.699
	R^2	0.9993	0.999	0.9124

Tabla 4 Parámetros experimentales del ajuste de los datos de adsorción de Ag(I) a los modelos de adsorción de Langmuir

Conclusiones

Se sintetizaron y caracterizaron fisicoquímicamente los materiales híbridos mesoporosos de sílice, funcionalizados con grupos propilamino (MS-N), dietilen amino (MS-N₂) y trietilen triamino (MS-N₃), así como su modificación con magnetita. Dichos materiales fueron obtenidos a partir de precursores de bajo costo y se evaluó su capacidad de adsorción de plata en sistemas acuosos. Los datos experimentales, fueron estudiados mediante el modelo de adsorción de Langmuir, observándose en todos los materiales una adsorción de la plata favorable con capacidades de carga de 86.2, 30.1 y 19.8 mgg⁻¹, para la MS-N₃, MS-N, y MS-N₂ respectivamente. La cinética de adsorción de los materiales fue evaluada por los modelos cinéticos de primer y segundo pseudo orden, observándose en todos los casos un mejor ajuste de los datos experimentales al modelo de pseudo segundo orden. Adicionalmente, estudio de los datos experimentales a los modelos cinéticos de difusión intra-particular y difusión externa, sugirieron que en todos los casos el mecanismo de adsorción de la plata se limita por ambos procesos de difusión.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo, desean agradecer a la Universidad de Guanajuato por el apoyo económico institucional otorgado al proyecto titulado “ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN MAGNETICA DE PLATA CON MATERIALES HÍBRIDOS MESOPOROSOS DE SILICE MODIFICADOS CON MAGNETITA” y a Q. Daniela Moncada por su apoyo en la caracterización de los materiales utilizados en este trabajo.

References

[1] Aubé V., Bellec S., Barakate M., Eddahabi M. R., Chaik Y., Deshaies M., Girard J. “What to do with CIL carbon fines? IAMGOLD innovative solution” *Proceeding The conference of metallurgists hosting World Gold & Nickel Cobalt* (2017).

- [2] Vuuren, C. P. J. V., C. P. Snyman, A. J. Boshoff. "Gold Losses from Cyanide Solutions Part II: The Influence of the Carbonaceous materials Present in the Shale Material." *Minerals Engineering* (2000) 13(10-11): 1177-1181
- [3] Engineering, P. (2014). Proyecto Mascota Evaluación de Planta ADR y Laboratorio Metalúrgico. Chihuahua, Chihuahua, Agnico Eagle México S.A. de C.V.
- [4] Elham Aghaei, Richard Diaz Alorro, Ashly N. Encila, Kyoungkeun Yoo "Magnetic adsorbents for the recovery of precious metals from leach solutions and wastewater" *Metals* (2017) 7: 529-560.
- [5] Henrique E. Toma "Magnetic nanohydrometallurgy: a nanotechnological approach to elemental sustainability" *J. Name* (2013), 17: 2027-2042.
- [6] David Dupont, Jakob Luyten, Maarten Bloemen, Thierry Verbiest, Koen Binnemans "Acid-stable magnetic core-shell nanoparticles for separation of rare earths" *Ind. Eng. Chem. Res.* (2014) 53: 15222-15229.
- [7] Ulisses Condomitti, Alceu T. Silveira, George W. Condomitti, Sergio H. Toma, K. Araki, Henri E. Toma *Hydrometallurgy* (2014) 147-148: 241-245.
- [8] N. Zandi-Atashbar, Ali A. Ensafi, Amir Hooshmand Ahoor "Magnetic Fe₂CO₄/rGO nanocomposite as an efficient recyclable catalyst to convert discard tire into diesel fuel and as an effective mercury adsorbent from wastewater" *Journal of Cleaner Production* (2018) 172: 68-80.
- [9] Ulisses Condomitti, Andre Zuin, Alceu T. Silveira, Koiti Araki, Henrique E. Toma "Magnetic nanohydrometallurgy: A promising nanotechnological approach for metal production and recovery using functionalized supermagnetic nanoparticles" *Hydrometallurgy* (2012) 125-126: 148-151.
- [10] Sabrina da N. Almeida, Henrique E. Toma "Neodymium(III) and Lanthanum(III) separation by magnetic nanohydrometallurgy using DTPA functionalized magnetic nanoparticle" *Hydrometallurgy* (2016) 161: 22-28.
- [11] Ahmed M. Donia, Asem A. Atia, Khalid Z. Elwakeel "Recovery of gold(III) and silver(I) on a chemically modified chitosan with magnetic properties" *Hydrometallurgy* (2007) 87: 197-206.
- [12] Fan Wu, Ying Xue Zhang, Yong Le Chen, Hao Qian "Recycle of Ag⁺ and Zn²⁺ with magnetic adsorbent in process of its purification from wastewater" *Clean Soil, Air, Water*, (2013) 42(1):71-80.
- [13] Avalos Hernández Flor Jared "Efecto de la concentración de Si(OH)₄ en la obtención de materiales mesoporosos de sílice y su uso como adsorbentes de cromo(III)" Tesis para la Obtención del Título de Ingeniero Ambiental; Universidad de Guanajuato, (2014). Director de Tesis: Dra. Ma. Mercedes Salazar Hernández.
- [14] Salazar Hernández Carmen, Elorza-Rodríguez Enrique, Miranda-Avilés Raúl, Salazar Hernández Mercedes, "Estudio de la adsorción de plata con sílice mesoporosa modificada con magnetita" *Revista de Análisis Cuantitativo y Estadístico* (2018) 5(14):7-11. ISSN 2410-3438
- [15] Tan K. L., Hameed B. H. "Insight into the adsorption kinetics models for the removal of contaminants from aqueous solutions" *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* (2017) 74: 25-48.
- [16] Largitte L., Pasquier R. "A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon" *Chemical Engineering Research and Design* (2016) 109: 495-504.
- [17] Hubdar Ali Maitlo, Ki-Hyun Kim, Vanish Kumar, Sumin Kim, Jae-Woo Park "Nanomaterials-based treatment options for chromium in aqueous environments" *Environment International* (2019) 130:104748-10495

- [18] M. Ruthiraan, N. M. Mubarak, E. C. Abdullah, Mohammad Khalid, Sabzoi Nizamuddin, Rashmi Walvekar, and Rama Rao Karri “An Magnetic Material: Preparation and Adsorption Removal of Heavy Metals from Wastewater” Chapter 8: Magnetic Nanostructures: Environmental and Agricultural Applications, Edited by Kamel A. Abd-Elsalam, Mohamed A. Mohamed, Ram Prasad, Springer (2019).
- [19] Fawzia I. El-Dib, Dalia E. Mohamed, Omnia A.A. El-Shamy, Marwa R. Mishrif “Study the adsorption properties of magnetite nanoparticles in the presence of different synthesized surfactants for heavy metal ions removal” Egyptian Journal of Petroleum 29 (2020) 1–7.

Estudio de factibilidad para la aplicación de algoritmos de estimación de distribución al problema de secuenciación de vehículos

A feasibility study for the application of estimation of distribution algorithms to the car sequencing problem

VELÁZQUEZ-JUÁREZ, Juan Carlos†*, PUGA-SOBERANES, Héctor José, PADIERNA-GARCÍA, Luis Carlos y SÁNCHEZ-MÁRQUEZ, Elvi Malintzin

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de León, México.

Universidad de Guanajuato/División de Ciencias e Ingenierías Campus León, México.

ID 1^{er} Autor: Juan Carlos, Velázquez-Juárez / ORC ID: 0000-0002-7659-6280, CVU CONACYT ID: 930308

ID 1^{er} Coautor: Héctor José, Puga-Soberanes / ORC ID: 0000-0002-1315-1436

ID 2^{do} Coautor: Luis Carlos, Padierna-García / ORC ID: 0000-0002-7474-9159

ID 3^{er} Coautor: Elvi Malintzin, Sánchez-Márquez / ORC ID: 0000-0003-2395-4459

DOI: 10.35429/IIE.2020.11.4.31.42

Recibido Enero 10, 2020; Aceptado Marzo 31, 2020

Resumen

El principal objetivo de una planta de producción de automóviles es entregar en tiempo y forma los pedidos que se reciben a diario. Estos pedidos no son homogéneos ya que involucran grandes cantidades de autos que generalmente pertenecen a distintos modelos y deben ser pintados con colores diferentes. El problema de secuenciación de vehículos que toma en cuenta estas características fue propuesto por la compañía Renault en 2005 como parte del ROADEF Challenge. Este problema es NP-Duro y se han propuesto diversas técnicas para resolverlo, desde métodos exactos hasta distintos algoritmos heurísticos. En este trabajo se presenta un estudio de factibilidad para aplicar dos Algoritmos de Estimación de Distribución (EDAs) para resolver este problema. Se presentan, además, tres aspectos importantes: el proceso de adaptación de los algoritmos, una técnica para la ejecución de los algoritmos denominada "Enfoque Escalonado con Descarte" y una metodología que implica tolerancia en la sustitución de los individuos. También se muestran los resultados obtenidos por los algoritmos. El análisis de resultados muestra el proceso de la adaptación de los algoritmos al problema y los ajustes que pueden hacerse para mejorar su competencia respecto al estado del arte.

Problema de Secuenciación de Vehículos, Algoritmos de Estimación de Distribución, ROADEF Challenge

Abstract

The main objective of an automobile production plant is to deliver on time and form the orders that are received daily. These orders are not homogeneous since they involve large quantities of cars that generally belong to different models and must be painted in different colors. The car sequencing problem that takes these characteristics into account was proposed by the Renault Company in 2005 as part of the ROADEF Challenge. This problem is NP-Hard and various techniques have been proposed to solve it, from exact methods to different heuristic algorithms. This work presents a feasibility study to apply two Distribution Estimation Algorithms (EDAs) to solve this problem. In addition, three important aspects are presented: the adaptation process of the algorithms, a technique for the execution of the algorithms called the "Stepped Approach with Discard" and a methodology that involves tolerance in the substitution of the individuals. The results obtained by the algorithms are also shown. The analysis of the results shows the algorithms adaptation process and the adjustments that can be made to improve their competence with the state of art.

Car Sequencing Problem, Estimation of Distribution Algorithms, ROADEF Challenge

Citación: VELÁZQUEZ-JUÁREZ, Juan Carlos, PUGA-SOBERANES, Héctor José, PADIERNA-GARCÍA, Luis Carlos y SÁNCHEZ-MÁRQUEZ, Elvi Malintzin. Estudio de factibilidad para la aplicación de algoritmos de estimación de distribución al problema de secuenciación de vehículos. Revista de Ingeniería Industrial. 2020. 4-11:31-42.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: velazquezjuarezjc@hotmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El proceso de manufactura de automóviles suele llevarse a cabo en tres talleres: el taller de carrocería donde se prepara el esqueleto de los vehículos, el taller de pintura que es el encargado de pintar los autos según los pedidos recibidos y la línea de ensamble donde se instalan todos los componentes que debe tener cada modelo de automóvil. En 2005 se llevó a cabo el ROADEF Challenge organizado por la Asociación Francesa de Investigación de Operaciones y Análisis de Decisión cuyo tema principal fue una variante del problema de secuenciación de vehículos (CSP por sus siglas en inglés) presentado por la empresa manufacturera Renault.

El principal objetivo de este desafío fue resolver una versión multiobjetivo del CSP clásico que toma en cuenta los talleres de pintura y la línea de ensamble. Varios equipos alrededor del mundo participaron en este desafío utilizando diversas técnicas de optimización, desde métodos exactos como Programación de Restricciones o Programación Entera hasta métodos heurísticos como Búsqueda local u Optimización por Colonia de Hormigas, entre otros. Una reseña del desafío puede encontrarse en (Solnon, Cung, Nguyen, & Artigues, 2008). Desde entonces, se han desarrollado mejoras a los métodos utilizados o se han propuesto nuevas aproximaciones. En este trabajo se proponen dos métodos pertenecientes a la familia de los Algoritmos de Estimación de Distribución para estudiar su factibilidad.

Los algoritmos propuestos han demostrado ser una herramienta poderosa en la solución de distintos problemas de optimización debido a que utilizan la información proveniente de los individuos generados para estimar su distribución estadística. Una vez obtenida esta información, construyen un modelo probabilístico a partir del cual se crean nuevos individuos de manera iterada.

Los métodos a implementar son: una versión discreta del Algoritmo de Estimación de Distribución Marginal Univariante de Boltzmann (BUMDA) (Valdez-Peña, Hernández, & Botello, 2013) y el Algoritmo de Estimación de Distribución Multinomial (MEDAL) (Duarte-Carrera, Rojas-Domínguez, & Padierna García, 2018).

Estos algoritmos presentan características comunes y algunas diferencias que los hacen obtener algunas ventajas al dar solución al problema. Por una parte, BUMDA calcula los parámetros necesarios (i.e. media y varianza) para generar una distribución normal utilizada para aproximarse a la distribución de Boltzmann. Después de calcular esta distribución, se hace un muestreo aleatorio para generar nuevos individuos. MEDAL calcula las frecuencias de los componentes en los mejores individuos de la población, con estas frecuencias se construye una distribución multinomial y, mediante un muestreo aleatorio, se genera una nueva población de individuos. Además, se presenta una técnica para la ejecución de los algoritmos denominada “Enfoque Escalonado con Descarte” que es una mejora a las aproximaciones utilizadas en la literatura para abordar problemas multiobjetivo (Al Chami, Manier, & Manier, 2019; Palacio & Larrea, 2017). Esta variante provee a los algoritmos una forma de conservar a los mejores individuos en cada generación.

La siguiente sección describe el Problema de Secuenciación de Vehículos. La sección 3 presenta los algoritmos utilizados y detalla la forma en que se adaptaron al CSP. En la sección 4 se muestra cómo fueron realizados los experimentos mientras que en la sección 5 se puntualizan los resultados obtenidos y su análisis. Por último, la sección 6 presenta las conclusiones de este trabajo.

Descripción del problema

La fabricación de automóviles se caracteriza por el hecho de que los autos producidos en un solo día en una línea de ensamblaje sencilla no son homogéneos: cada auto puede requerir un conjunto de opciones ligeramente diferente (Parrello, Kabat, & Wos, 1986). El objetivo del problema de secuenciación de vehículos es minimizar el número total de sobrecargas en las estaciones de trabajo, estas estaciones son las encargadas de instalar las opciones (también conocidas como componentes) requeridas por cada auto, este objetivo también es conocido como suavizado de restricciones. Una secuencia puede definirse como una permutación de todo el conjunto de automóviles que deben ser producidos, mientras que una subsecuencia es un elemento de alguna partición de la secuencia.

Una sobrecarga se produce cuando la cantidad de autos que requieren una opción es mayor a la capacidad que tiene la estación encargada de instalar dicho componente. Este problema fue descrito por Parello en 1986 como una variante del Job-Shop Scheduling Problem (JSSP), donde cada trabajo es representado como un auto que requiere un conjunto de opciones a ser instaladas (aire acondicionado, estéreo, quemacocos, etc.) el cual debe secuenciarse en una línea de ensamblaje. Un auto puede requerir un conjunto ligeramente distinto de opciones que su predecesor o su sucesor y cada estación de trabajo (donde se instalan dichas opciones) tiene una restricción de capacidad p_i/q_i . Esta restricción indica que, para cualquier subsecuencia de autos consecutivos de tamaño q_i , a lo mucho p_i de ellos pueden requerir la opción que se instale en esa estación de trabajo. Distintos autores (Estellon & Gardi, 2013; Ian P., 1998; Kis, 2004) han demostrado que este problema es NP-Duro. Originalmente, el CSP fue presentado como un problema de satisfacción de restricciones que solo incluía el objetivo de suavizado de restricciones, aunque también puede definirse como un problema de optimización combinatoria debido a que las soluciones son representadas como vectores con permutaciones de números enteros. Estos números representan los índices que se le asigna a cada auto dentro del conjunto de autos a secuenciar. En este trabajo, el CSP es abordado como un problema de optimización combinatoria.

De acuerdo con (Solnon, Cung, Nguyen, & Artigues, 2008), una instancia del problema de CSP clásico se define por una tupla (V, O, p, q, r) donde:

- $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ es el conjunto de autos a ser producido.
- $O = \{o_1, \dots, o_m\}$ es el conjunto de opciones.
- $p : O \rightarrow N$ y $q : O \rightarrow N$ definen la restricción de capacidad para cada opción $o_i \in O$. Esta restricción establece que, para cada subsecuencia de q_i autos consecutivos en la línea de ensamblaje, como máximo p_i autos deben requerir o_i .

- $r : V \times O \rightarrow \{0, 1\}$ definen los requerimientos de las opciones, es decir, para cada vehículo $v_j \in V$ y para cada opción $o_i \in O$, se tiene que:

$$r_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{si } o_i \text{ debe instalarse en } v_j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El espacio de búsqueda para una instancia del CSP está compuesto por todas las posibles permutaciones de los autos de V .

En 2005, la compañía RENAULT propuso una variante del CSP para el ROADEF Challenge donde divide el objetivo de suavizado en dos: uno que toma en cuenta las estaciones de alta prioridad y el otro las estaciones de baja prioridad. Además, se añade un tercer objetivo que involucra restricciones de pintura por lotes. Este último se debe a que se quiere minimizar el uso del solvente que se utiliza al limpiar el equipo encargado de pintar los autos. Con estas modificaciones y conforme a (Solnon, Cung, Nguyen, & Artigues, 2008), se puede definir al CSP propuesto por RENAULT como:

- Una instancia del CSP clásico como se definió anteriormente.
- Dos subconjuntos O_H y O_L de O donde O_H contiene el conjunto de opciones de alta prioridad y O_L contiene el conjunto de opciones de baja prioridad. Estas opciones son instaladas en las estaciones de alta y baja prioridad mencionadas anteriormente.
- Un conjunto de colores C y una función $c : V \rightarrow C$ que asocia con cada vehículo $v_i \in V$ con un color c_i .
- Un límite de autos del mismo color que pueden secuenciarse consecutivamente. Este límite se representa con $B \in N$.
- Una secuencia que contiene los últimos vehículos secuenciados pertenecientes al día anterior. Esto permite tomar en cuenta el día de producción anterior cuando se calcula el número de sobrecargas y cambios de color.

El CSP propuesto por RENAULT se plantea como un problema de optimización multiobjetivo que puede ser resuelto de forma lexicográfica asignando pesos a cada uno de los objetivos dependiendo de su nivel de prioridad. La evaluación de una solución se lleva a cabo mediante la suma de cada valor fitness de los tres objetivos multiplicado por su respectivo peso. En la ecuación (1) FT representa el fitness total obtenido por la suma lexicográfica de F_1 , F_2 y F_3 que pueden tomar el valor de cualquiera de los tres objetivos: FH para las estaciones de alta prioridad, FL para las estaciones de baja prioridad y FC para los cambios de color dependiendo de la instancia. α , β y γ son los pesos que se asignan a cada objetivo de tal manera que ($\alpha < \beta < \gamma$).

$$FT = \alpha * F_1 + \beta * F_2 + \gamma * F_3 \quad (1)$$

En este trabajo de investigación se utilizó la expresión (2) en la que no se privilegia a ninguno de los objetivos individuales. La finalidad es observar el comportamiento global de los algoritmos propuestos tomando los valores directos de los objetivos individuales.

$$FT = F_1 + F_2 + F_3 \quad (2)$$

Existen diversas variantes del método utilizado para evaluar la función objetivo (comúnmente llamada “ventana deslizante”) que permite calcular el número de sobrecargas que genera una secuencia dada (véase (Solnon, Cung, Nguyen, & Artigues, 2008; Fliedner & Boysen, 2008; Jähren & Achá, 2018)). Para este trabajo se utilizará la función objetivo como se muestra en la ecuación (3).

$$FE_i(S) = \sum_a^b FE_i(S, W_{P_i}) + \sum_k^{NewP_i} FE_i(S, W_{NewP_i}) \quad (3)$$

Donde $FE_i(S)$ representa la función fitness de una secuencia S en la i -ésima estación de trabajo E_i . Como se mencionó anteriormente, estas estaciones están divididas en dos categorías: H para las estaciones de alta prioridad y L para las de baja prioridad, de tal manera que E_i puede ser sustituida por H o L según sea el caso.

Las variables W_{P_i} y W_{NewP_i} representan las ventanas de la i -ésima estación de tamaño P_i y $NewP_i$ respectivamente, que se deslizarán a lo largo de la solución contando las sobrecargas ocurridas en la subsecuencia que abarca dicha ventana. En esta versión del CSP, se toman en cuenta los autos que fueron secuenciados en el día de producción anterior pero que no alcanzaron a ser producidos. Para contar las sobrecargas de la secuencia del día actual, se toma en cuenta un subconjunto de los autos del día anterior que quedaron pendientes de procesar. Este subconjunto varía en tamaño ya que depende del índice q_i de la estación de trabajo que se está evaluando. Para mayor profundización en la función objetivo, el lector puede referirse a (Sánchez Márquez, y otros, 2019).

El objetivo de cambios de color determina que en una secuencia no puede haber más de B autos consecutivos que requieran ser pintados con el mismo color. Además, este objetivo toma en cuenta las veces que se cambia el color de la pintura. La función que contabiliza los cambios de color en una secuencia S (ecuación (4)) puede definirse como la suma de las diferencias de color (DC) entre los autos k y $k + 1$ de tal manera que $DC_{k,k+1} = 1$ si los autos k y $k + 1$ tienen un color diferente y $DC_{k,k+1} = 0$ en otro caso. Concretamente el objetivo de cambios de color (FC) se define como (Chutima & Olarnviwatchai, 2018):

$$FC(S) = \sum_{k=0}^n DC_{k,k+1} \quad (4)$$

A diferencia de los otros dos objetivos donde el número de autos tomados del día anterior depende de la restricción de capacidad de la estación de trabajo que se está evaluando, en la ecuación (4) el índice k comienza en 0 ya que se considera al último auto secuenciado el día anterior. Esto se debe a que, si el color del primer auto de la secuencia es distinto al último auto del día anterior, se realiza un cambio de color.

Algoritmos de Estimación de Distribución

Los Algoritmos de Estimación de Distribución (EDAs) son técnicas de optimización estocástica que exploran el espacio de soluciones potenciales al construir modelos probabilísticos explícitos de las soluciones más prometedoras (Armazañas, y otros, 2011).

Una de las principales diferencias entre EDAs y los algoritmos evolutivos como los Algoritmos Genéticos (AG), es la forma en que se regenera la población. Los AG utilizan un subconjunto de los individuos más aptos de la población actual mientras que los EDAs emplean una distribución de probabilidad para generar nuevas soluciones.

Esta estrategia permite a los EDAs incrementar la probabilidad de generar la solución óptima en el espacio de búsqueda (Valdez-Peña, Hernández, & Botello, 2013). El proceso fundamental de cualquier EDA se describe en el Algoritmo 1 (Armazañas, y otros, 2011).

Generalmente, los EDAs trabajan con una población de posibles soluciones al problema, la cual se crea a partir de la distribución uniforme de todas las soluciones admisibles. Después, cada individuo se califica de acuerdo con una función fitness. Esta función evalúa que tan buena es una solución de acuerdo con el tipo de problema (maximización o minimización) y a sus requisitos: por ejemplo, el número de sobrecargas que genera la secuencia de autos creada por el algoritmo.

Una vez obtenidos los valores fitness de cada individuo, la población se somete a un método de selección para elegir a las soluciones más prometedoras con las cuales se construye el modelo probabilístico que intenta estimar la distribución de probabilidad de los individuos seleccionados. Existen diversos métodos para seleccionar a los mejores individuos de una población.

Entre los más comunes destacan aquellos que ordenan a los individuos de acuerdo a su fitness. Sin embargo, existen otros métodos que ayudan a evitar la convergencia prematura que causa el uso de métodos basados en fitness (Gaudín, Madruga, & Rodríguez, 2020).

Una vez que el modelo es construido, se generan nuevos individuos al realizar un muestreo de la distribución calculada por el modelo. Estas nuevas soluciones se añaden a la vieja población o la reemplazan por completo. Este proceso se repite hasta que se cumple un criterio de paro.

1. $g \leftarrow 0$
2. generar la población inicial $P(0)$
3. mientras no se alcance el criterio de paro
3.1. seleccionar los mejores individuos $S(g)$ de $P(g)$
3.2. construir un modelo probabilístico de $S(g)$
3.3. generar nuevos individuos $O(g)$ con el modelo $S(g)$ generado.
3.4. incorporar la nueva población $O(g)$ a la actual $P(g)$
3.5. $g \leftarrow g + 1$
fin mientras

Algoritmo 1 EDA básico

Fuente: (Armazañas, y otros, 2011) [Microsoft Word]

En la última década y media, los EDAs han sido aplicados a muchos problemas de optimización desafiantes (Larrañaga & Lozano, 2002) tales como diseño de configuración del sistema celular CDMA (Sun, Zhang, Li, & Yao, 2008), predicción de estructura proteica (Bacardit, y otros, 2007), selección de Peakbin en espectrometría de masas (Armazañas, y otros, 2011), entre otros y aunque en (Ceberio, Irurozki, Mendiburu, & Lozano, 2012) se señala que varios trabajos encontrados en la literatura confirman el buen funcionamiento de los EDAs aplicados a problemas reales de distintos campos de investigación, tales como problemas de ruteo de vehículos, calibración de aplicaciones químicas, encontrar la ruta óptima en espacios 3D, testeo de software, optimización del tratamiento de quimioterapia para cáncer, etc., el autor hace mayor hincapié en los problemas basados en permutaciones, específicamente en 4: el problema del agente viajero (TSP), flow shop scheduling problem (FSSP), el problema de asignación cuadrática (QAP) y el problema de ordenamiento lineal (LOP) indicando que los EDAs también son efectivos en la solución de los problemas de optimización combinatoria.

Esta es una de las principales razones de implementar EDAs a un problema como el CSP ya que, como se explica en la sección 2, este problema puede ser tratado como un problema basado en permutaciones, además de ser una variante del FSSP. Con esto en mente, en las secciones siguientes se describen los algoritmos utilizados en esta investigación detallando la forma en que fueron adaptados, la representación de los individuos y sus diferencias y similitudes.

Boltzmann Univariate Marginal Distribution Algorithm (BUMDA)

BUMDA es un algoritmo de estimación de distribución que utiliza un modelo normal gaussiano para aproximarse a la distribución de Boltzmann. Esta aproximación se logra calculando los parámetros de dicho modelo (media y varianza) con fórmulas derivadas de una minimización analítica de la divergencia Kullback–Leibler. Este algoritmo ha sido utilizado para resolver problemas de optimización con dominio continuo como las funciones Rosenbrock, Sum Cancellation, Ackley, etc. También ha sido aplicado en la optimización de hiper parámetros de los kernels utilizados en máquinas de soporte vectorial. En ambos casos, BUMDA demuestra un buen desempeño comparado con otros EDAs, esto se debe a que emplea selección por truncamiento para dirigir la búsqueda a las regiones más prometedoras en el espacio de búsqueda. En el Algoritmo 2 se detallan los pasos seguidos en BUMDA.

1. Generar uniformemente la población inicial P_t iniciar $t = 0$.
2. Mientras no se alcance el criterio de paro
 - 2.1 $t \leftarrow t + 1$
 - 2.2 Evaluar y trunca la población de acuerdo con el algoritmo de selección en (Valdez-Peña, Hernández, & Botello, 2013)
 - 2.3 Calcular la aproximación para todas las dimensiones de μ y v del conjunto seleccionado (con tamaño n_{selec}) con las ecuaciones (5) y (6)
 - 2.4 Generar nuevos individuos $Q(x, t)$ con el nuevo modelo.
 - 2.5 Incorporar la élite de la nueva población a la actual P_t
3. Retornar el mejor individuo

Algoritmo 2 BUMDA

Fuente: (Valdez-Peña, Hernández, & Botello, 2013) [Microsoft Word]

Los parámetros que se utilizan en BUMDA son calculados mediante las ecuaciones (5) y (6) donde $\bar{F}(x_i) = F(x) - F(x_{selec}) + 1$ y $F(x_i)$ es el valor fitness del individuo x_i .

$$\mu \approx \frac{\sum_1^{n_{selec}} x_i \bar{F}(x_i)}{\sum_1^{n_{selec}} \bar{F}(x_i)} \quad (5)$$

$$v \approx \frac{\sum_1^{n_{selec}} \bar{F}(x_i) (x_i - \mu)^2}{\sum_1^{n_{selec}} \bar{F}(x_i)} \quad (6)$$

Originalmente en BUMDA, un individuo I es representado como un vector de tamaño n donde cada componente $I_k \in \mathbb{R}$. Debido a que una solución para el CSP es un vector que contiene los índices de los autos a secuenciar y estos índices son números enteros, esta representación no es la adecuada para que la versión original de este algoritmo sea utilizada.

Secuencia	1	2	3	4	...	n - 2	n - 1	n
Cromosoma Clase	3	2	5	1	...	3	3	1
Cromosoma Color	3	3	4	1	...	2	2	1

Figura 1 Representación de los individuos en BUMDA

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

Por tal motivo, en este trabajo se propone una versión discreta de BUMDA denominada BUMDAD. Esta versión utiliza un par de cromosomas (Chutima & Olarnviwatchai, 2018) como se muestra en la Figura 1. El primer cromosoma consiste en la clase del auto. El segundo cromosoma representa el color de cada auto. En esta figura, Secuencia representa el índice (posición) que tiene el auto en la instancia original.

Con la información de los cromosomas, se generan dos distribuciones de probabilidad, una para el vector de clase y otra para el vector de color. Para ello se calculan cuatro parámetros denominados μ_{clase} , μ_{color} , v_{clase} y v_{color} . Con las distribuciones generadas se realiza un muestreo por cada k -ésimo componente generando valores de clase y color para un individuo.

Experimentos preliminares demostraron que este proceso puede generar individuos infactibles, es decir, secuencias con valores fuera del rango de cada vector lo que resulta en autos inexistentes en la secuencia original y/o autos repetidos. Esto es un inconveniente ya que ambos casos implican que uno o varios autos no sean tomados en cuenta al momento de evaluar la secuencia produciéndose un cálculo incorrecto del fitness de estos individuos.

Para preservar la factibilidad de los individuos generados, se utiliza un reparador cromosómico como se especifica en (Sánchez Márquez, y otros, 2019).

Este reparador, dotado con los rangos de clases y colores correctos, recorre toda la secuencia en busca de valores anormales, una vez detectados son reemplazados con algunos de los valores faltantes considerando también que no se sobrepase el número de autos de cualquier clase o color.

Multinomial Estimation of Distribution Algorithm (MEDAL)

MEDAL es un algoritmo de estimación de distribución basado en la distribución multinomial aplicable a problemas de optimización discretos. Fue empleado exitosamente para resolver el problema de desenvolvimiento de fase para reconstrucción de objetos 3D en (Duarte-Carrera, Rojas-Domínguez, & Padierna García, 2018). El proceso general de MEDAL se describe en el Algoritmo 3.

1. Inicializar aleatoriamente la población de soluciones candidatas
2. **Mientras** no se alcance el criterio de paro
 - 2.1. Evaluar cada solución conforme la función fitness
 - 2.2. Elegir los mejores M individuos de la población ($M < N$)
 - 2.3. Estimar una distribución multinomial de los M individuos seleccionados
 - 2.4. Generar una nueva población utilizando la distribución multinomial
3. Retornar la mejor solución encontrada

Algoritmo 3 MEDAL

Fuente: (Duarte-Carrera, Rojas-Domínguez, & Padierna García, 2018) [Microsoft Word]

Debido a su naturaleza, MEDAL puede clasificarse como un algoritmo orientado a permutaciones. Por lo tanto, se utiliza una estructura más simple que en BUMDA. Esta estructura (Figura 2) está compuesta por un solo vector donde cada componente es el índice de los autos en la secuencia original.

Secuencia	1	2	3	4	...	n - 2	n - 1	n

Figura 2 Estructura de un individuo en MEDAL

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

Para estimar la distribución, se selecciona un subconjunto de los mejores individuos de la población. A partir de este subconjunto se construye una matriz de frecuencias que contabiliza las veces que cada auto aparece en cada posición en los individuos seleccionados.

Una vez terminado este proceso, a cada auto se le asigna una probabilidad de ser seleccionado en una posición específica mediante un proceso de selección por ruleta. Si la frecuencia de determinado auto en cierta posición disminuye, significa que ese auto puede ser recolocado en la secuencia en una posición donde mejore el fitness de los individuos.

Suponiendo un conjunto de 25 autos se obtiene el vector de frecuencias del auto 1 y, como se puede observar en la Figura 3, este auto aparece con mayor frecuencia en la posición 12. También destaca el hecho que en las posiciones 19 y 24 la frecuencia es igual a 0 lo que significa que de los M individuos seleccionados para calcular las frecuencias, en ningún individuo aparece el auto 1 en dichas posiciones.

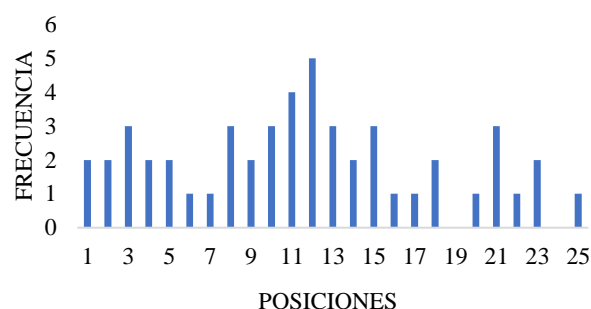


Figura 3 Histograma de frecuencias del auto 1

Fuente: elaboración propia [Microsoft Excel]

La Figura 4 muestra la probabilidad que tiene el auto 1 en ser elegido para cualquiera de las 25 posiciones. Este algoritmo, a diferencia de BUMDA, no hace uso del reparador cromosómico ya que su metodología permite crear individuos factibles en cada iteración.

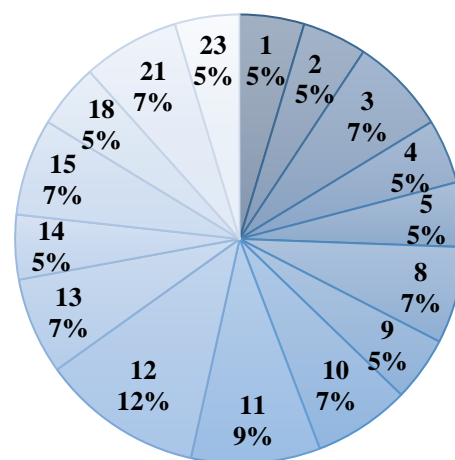


Figura 4 Ruleta de porcentajes del auto 1

NOTA: se omiten los porcentajes menores al 2% por fines ilustrativos

Fuente: elaboración propia [Microsoft Excel]

Adaptación de MEDAL a CSP con Escalonamiento y Tolerancia

En esta sección se presentan dos estrategias de adaptación de MEDAL para resolver el CSP. La primera es utilizar un enfoque escalonado con descarte (MEDAL ST) y la segunda es mejorar este enfoque con un método de sustitución de individuos con tolerancia en el proceso de descarte definido como MEDAL CT. Las siguientes subsecciones puntualizan los detalles de estas dos metodologías.

Enfoque Escalonado con Descarte

El Enfoque Escalonado con Descarte (Sánchez Márquez, y otros, 2019) (Figura 5) consiste en evaluar los objetivos de manera individual respetando en que se presentan en el escalonamiento. Además, este enfoque está orientado a evitar un decremento en los fitness ya calculados cuando se evalúa el siguiente. Lo anterior se logra reutilizando la población final del primer objetivo para ser la inicial del segundo y lo mismo con el tercer objetivo resultando en un conjunto de secuencias evaluadas en cada uno de los objetivos.

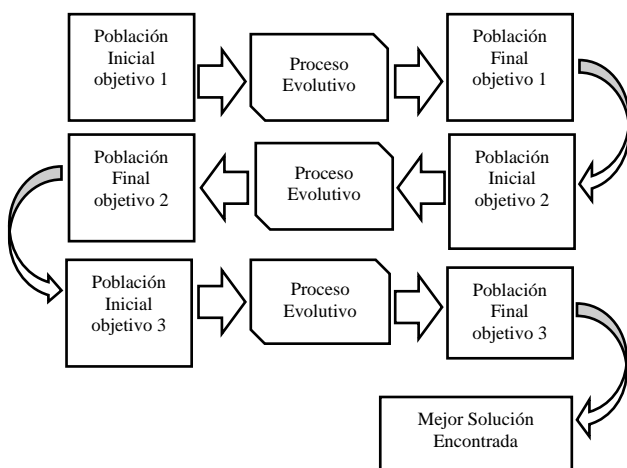


Figura 5 Proceso del Enfoque Escalonado con Descarte
Fuente: elaboración propia [Microsoft Power Point]

Durante el proceso evolutivo, se realiza una comparación y sustitución de secuencias. En la comparación se descarta la secuencia que genere un número mayor de sobrecargas (o cambios de color). Cuando se está evaluando el segundo o tercer objetivo, se considera que las secuencias no deben incrementar las violaciones de los objetivos ya evaluados. Si esto sucede, la secuencia es descartada.

Pruebas preliminares demostraron que, con este método, algunas buenas secuencias son descartadas, aunque obtengan un mejor fitness en dos de los tres objetivos. Por esta razón, se propone dar un nivel de tolerancia en la comparación de las soluciones.

Enfoque Escalonado con Tolerancia en el Descarte

Suponiendo un individuo I en cierta generación gen_i tiene un fitness en FH de 10 y en FC su fitness es 20 al transcurso de una generación un nuevo individuo obtiene un fitness de 15 en FC pero en FH su fitness aumenta una unidad, el enfoque ilustrado en la Figura 5 descarta a este nuevo individuo aunque haya disminuido el FC en 5 unidades. El método de sustitución con tolerancia (CT) permite al algoritmo elegir a este nuevo individuo ya que la ganancia en FC es mayor al aumento del fitness en FH. Para tomar esta decisión se debe fijar un nivel de tolerancia máximo, este nivel se representa como θ , cuando se comparan ambos individuos se calcula la diferencia entre ambos fitness, si esta diferencia es negativa significa que el nuevo individuo es peor que el anterior y se descarta. Si la diferencia es positiva el nuevo individuo es mejor que el anterior y se procede a comparar los fitness del objetivo anterior. Se calcula la diferencia entre estos objetivos y si la diferencia es positiva el nuevo individuo reemplaza al anterior. En cambio, si la diferencia es negativa indica un aumento en el fitness, entonces se calcula el valor absoluto de ambas diferencias y se divide la diferencia del objetivo actual con el anterior. Si este cociente es menor que θ el nuevo individuo es aceptado, si no, se descarta.

Diseño de experimentos

Esta sección detalla cómo se llevaron a cabo los experimentos realizados en esta investigación, desde cómo se dividen las instancias de prueba utilizadas hasta el equipo donde se ejecutaron los algoritmos.

Agrupación de las instancias de prueba

Para el desafío de ROADEF en 2005 se utilizaron 3 conjuntos de instancias provenientes de diferentes fábricas de RENAULT. El primero, denominado conjunto A, consta de 16 instancias que se utilizaron en la etapa de clasificación del desafío.

El conjunto B está constituido de 45 instancias que fueron dadas a los participantes que superaron la primera etapa. El tercero, set X, se compone de 19 instancias que sirvieron como evaluación final del desafío. En este trabajo, se utilizan las instancias del conjunto A. La Tabla 1 muestra cómo están agrupadas las 16 instancias utilizadas para esta investigación.

Grupo	Prioridad de los objetivos	Nombres de las instancias
Fáciles	Estaciones de alta prioridad (FH) Cambios de color (FC) Estaciones de baja prioridad (FL)	HEPL1, HEPL2, HEPL3, HEPL4, HELP
Color	Cambios de color (FC) Estaciones de alta prioridad (FH) Estaciones de baja prioridad (FL)	PHEL1, PHEL2, PHEL3, PHE
Difíciles	Estaciones de alta prioridad (FH) Cambios de color (FC) Estaciones de baja prioridad (FL)	HDLP1, HDLP2, HDLP3, HDPL1, HDPL2, HDPL3, HDP

Tabla 1 Clasificación de las 16 instancias del conjunto A
Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

En el primer grupo se encuentran las instancias que tienen como objetivo principal disminuir las sobrecargas de trabajo en las estaciones de alta prioridad, estas instancias son fáciles de resolver para RENAULT. El segundo grupo se compone de las instancias cuyo objetivo primordial es minimizar los cambios de color. Las instancias que priorizan el suavizado de sobrecargas en estaciones de alta prioridad y que son etiquetadas como difíciles de resolver pertenecen al grupo tres. En cualquier grupo, los objetivos 2 y 3 pueden variar en orden y en algunas instancias no se contemplan estaciones de trabajo de baja prioridad por lo que solo hay dos objetivos a optimizar (i.e. PHE y HDP).

Se realizaron 10 ejecuciones por algoritmo en cada una de las instancias pertenecientes al conjunto A utilizadas en el desafío de 2005. Esto debido a las especificaciones proporcionadas a los equipos participantes por la compañía Renault (Nguyen). Estas pruebas se realizaron en una PC GameFactor con procesador Intel Core i5-8400 y memoria RAM de 16 gb. Los algoritmos fueron programados en Java con el IDE Apache NetBeans v11.1.

Resultados y Análisis

Derivado de los experimentos realizados, la Tabla 2 muestra el número total de mejores resultados que obtuvieron los algoritmos. Estos resultados están separados por objetivo. Como se puede observar en la tabla, de las tres versiones de MEDAL y BUMDA el algoritmo con mejores resultados en los objetivos de FH y FC es MEDAL CT. Mientras que para el objetivo de FL, el mejor algoritmo es MEDAL ST. Un factor importante en la obtención de estos resultados puede ser la aleatoriedad implicada en el proceso de generación de nuevos individuos utilizada por MEDAL como se explica en la sección 3.2.

Algoritmo	FH	FC	FL
MEDAL ST	8	4	9
MEDAL CT	9	9	2
BUMDA	0	4	2

Tabla 2 Total de mejores resultados obtenidos por los algoritmos

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

Cabe señalar que en algunas instancias algunos algoritmos obtuvieron los mismos resultados, por eso en FH y FC la suma de las columnas difiere de 16. En el caso de FL, de las 16 instancias, 2 no contemplan este objetivo.

Para corroborar lo descrito en la Tabla 2 y las observaciones presentadas, se ejecutaron pruebas estadísticas no paramétricas (concretamente el Test de Friedman). En la siguiente subsección se detallan los resultados de esta prueba.

Análisis de los resultados del Test de Friedman

Se realizó el test de Friedman cuya hipótesis nula declara que no existe diferencia significativa en el comportamiento de los algoritmos. El nivel de significancia utilizado para esta prueba es de 0.05%. Los valores p arrojados por la prueba son: para FH $p=0.000$ para FC $p=0.001$ y para FL $p=0.000$, estos valores indican que sí se encuentra diferencia significativa entre los resultados arrojados por los algoritmos. En la Tabla 3 se muestran los rangos asignados en el test de Friedman.

Algoritmo	FH	FC	FL
MEDAL ST	1.56	2.03	1.71
MEDAL CT	1.50	1.72	1.89
BUMDA	3.31	3.25	3.50

Tabla 3 Rangos obtenidos por los algoritmos implementados

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

En la tabla anterior se puede observar que, para los objetivos FH y FC, la versión de MEDAL que aplica tolerancia (MEDAL CT) en el proceso de sustitución de individuos obtuvo los mejores rangos. Para el objetivo FL, el algoritmo mejor posicionado es la versión de MEDAL que no usa tolerancia (MEDAL ST). Lo que confirma los datos mostrados en la Tabla 2. Se realizó la comparación de los dos mejores algoritmos (MEDAL CT y MEDAL ST) contra los datos proporcionados por Renault. Además, se realizó el test de Friedman con un nivel de significancia de 0.05%. Los valores p arrojados por la prueba son de 0.001 para el objetivo de FH y de 0.000 para los objetivos de FC y FL.

Algoritmo	FH	FC	FL
RENAULT	1.25	1.00	1.14
MEDAL ST	2.41	2.66	2.29
MEDAL CT	2.34	2.34	2.57

Tabla 4 Rangos asignados por el Test de Friedman para los mejores algoritmos y los resultados de Renault

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

Como se muestra en la Tabla 4, los rangos de Renault son inferiores a los obtenidos por MEDAL CT y MEDAL ST. Destaca el hecho que, en FC, Renault obtiene un rango promedio de 1. Esto indica que Renault obtuvo los mejores resultados en las 16 instancias. Para los objetivos FH y FL el rango promedio de Renault es mayor a 1, lo que indica que en algunas instancias los dos mejores algoritmos implementados en este trabajo obtuvieron mejores resultados que Renault.

Instancia	Renault FH	MEDAL ST FH	MEDAL CT FH
PHEL1	197	81.5	97.5
PHEL3	462	350	350

Tabla 5 Instancias donde se superaron los resultados de Renault en FH

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

La Tabla 5 y la Tabla 6 muestran las instancias donde los algoritmos MEDAL CT y MEDAL ST obtienen mejores resultados que Renault. Se observa que para FH se logra disminuir la cantidad de sobrecargas en poco más de 100 unidades mientras que en FL se logran disminuir las sobrecargas hasta en 60 unidades. Este comportamiento muestra buenos indicios para seguir utilizando este tipo de algoritmos en este problema.

Instancia	Renault FL	MEDAL ST FL	MEDAL CT FL
PHEL3	883	826	821

Tabla 6 Instancias donde se superaron los resultados de Renault en FL

Fuente: elaboración propia [Microsoft Word]

Adicional a los resultados estadísticos que se obtuvieron, un aspecto muy importante que se observó en la investigación es que los objetivos de suavizado y de color son altamente conflictivos ya que mientras el objetivo de suavizado tiende a crear conjuntos pequeños de autos (de tamaño q que depende de la restricción de capacidad de la estación evaluada), el objetivo de pintura requiere que se formen grupos grandes del tamaño de lote establecido en la instancia.

Para ilustrar lo anterior, en la Figura 6 se presenta un ejemplo en tres tablas (a), (b), (c). Cada tabla cuenta con tres renglones, el primer renglón es una secuencia de autos, el segundo renglón la necesidad de instalación o no de un aire acondicionado en el auto ($r=1$ o $r=0$ respectivamente) y un tercer renglón con el número de color con que se pintará cada auto. En cada secuencia los números 530, 531 y 532 representan los números de autos no atendidos en la secuencia del día anterior, el resto de los números de la secuencia son el orden de los autos a procesar el día actual. En el ejemplo se maneja como restricción del objetivo de color, que el número máximo de autos secuenciados del mismo color es 5. Como restricción de capacidad de la estación, el que se pueden recibir tres autos, pero solo a uno se le puede instalar aire acondicionado. En cada tabla, en el segundo renglón, se pueden obtener las sobrecargas o conflictos de suavizado sumando el número de veces que se excede en 1 la solicitud de instalación de aire acondicionado al deslizar una ventana de tamaño de tres posiciones consecutivas a lo largo de la secuencia.

Por otra parte, en cada tabla en el tercer renglón se pueden obtener los cambios de color contando las veces que se cambia de número del color al seguir la secuencia. En el ejemplo se puede observar la naturaleza conflictiva entre los objetivos de suavizado y color. Se parte de una secuencia mostrada en la tabla (a) que tiene el mismo número de sobrecargas y cambios de color, 5 en este caso, de la cual se obtienen las secuencias mostradas en las tablas (b) y (c).

La segunda secuencia (b) minimiza los cambios de color colocando consecutivamente los autos que tienen el mismo color teniendo un total de 2 cambios de color mientras que las sobrecargas suman 8. En la última secuencia (c) los autos han sido colocados para minimizar el total de sobrecargas en la estación de trabajo resultando en 4 sobrecargas, sin embargo, el total de cambios de color aumenta a 8.

	Día anterior			Día Actual									
(a) Secuencia	530	531	532	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
color	2	2	2	1	1	3	2	2	3	3	1	1	1

(b) Secuencia	530	531	532	4	5	1	2	8	9	10	3	6	7
r	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
color	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	3	3	3

(c) Secuencia	530	531	532	2	3	1	6	7	4	8	5	9	10
r	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
color	2	2	2	1	3	1	3	3	2	1	2	1	1

Figura 6 Conflicto entre objetivos, representado con el conteo de sobrecargas y cambios de color
Fuente: *Elaboración propia [Microsoft Word]*

Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se presentaron dos EDAs aplicados al problema de secuenciación de vehículos, la forma en que fueron adaptados y los resultados obtenidos. Se realizó un análisis estadístico para comparar el desempeño de MEDAL (en dos versiones) y BUMDA. Derivado de este análisis se concluye que la versión MEDAL CT obtuvo mejores soluciones para los objetivos FH y FC, mientras que para FL los mejores resultados fueron los de MEDAL ST. Para contrastar el desempeño de estas adaptaciones de EDAs con el estado del arte, estos algoritmos fueron comparados con los resultados de Renault.

Aunque las adaptaciones hechas al algoritmo MEDAL, no muestran competitividad con los resultados del estado del arte, si muestran la factibilidad para ser aplicado al CSP, la investigación permitió observar que se pueden mejorar los resultados evitando el conflicto contradictorio de los objetivos que afectaron el desempeño de los algoritmos.

Para mejorar el desempeño de los algoritmos y el conflicto contradictorio de éstos, se plantea dar continuidad a este trabajo incluyendo dos estrategias. Una relacionada con el estudio de los pesos adecuados a los objetivos en el enfoque lexicográfico y otra en la generación de clases en la secuenciación de vehículos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo obtenido a través de la beca para estudios de posgrado: 930308 (Juan Carlos Velázquez Juárez), al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de León, a la Universidad de Guanajuato/División de Ciencias e Ingenierías Campus León y al SICES por el apoyo al proyecto CONV-PNPC/191/2019 por el apoyo brindado para la realización de esta investigación.

Referencias

Al Chami, Z., Manier, H., & Manier, M. A. (2019). A lexicographic approach for the bi-objective selective pickup and delivery problem with time windows and paired demands. *Annals of Operations Research*, 273 (1-2), 237-255. doi:<https://doi.org/10.1007/s10479-017-2500-9>

Armazañas, R., Saeys, Y., Inza, I., Garcia-Torres, M., Bielza, C., van de Peer, Y., & Larrañaga, P. (2011). Peakbin selection in mass spectrometry data using a consensus approach with estimation of distribution algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 8 (3), 760-774.

Bacardit, J., Stout, M., Hirst, J. D., Sastry, K., Llorà, X., & Krasnogor, N. (7-11 de Julio de 2007). Automated alphabet reduction method with evolutionary algorithms for protein structure prediction. (D. Thierens, Ed.) *GECCO 2007: Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 346. doi:<https://doi.org/10.1145/1276958.1277033>

Ceberio, J., Irurozki, E., Mendiburu, A., & Lozano, J. A. (2012). A review on estimation of distribution algorithms in permutation-based combinatorial optimization problems. *Progress in Artificial Intelligence*, 1(1), 103-117. doi:<https://doi.org/10.1007/s13748-011-0005-3>

- Chutima, P., & Olarnviwatchai, S. (2018). A multi-objective car sequencing problem on two-sided assembly lines. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(7), 1617-1636.
- Duarte-Carrera, D., Rojas-Domínguez, A., & Padierna García, L. (2018). Phase Unwrapping for 3D Object Reconstruction by means of Population-based Metaheuristics. *Research in Computing Science*, 147(11), 21–30.
- Estellon, B., & Gardi, F. (2013). Car sequencing is NP-hard: a short proof. *Journal of the Operational Research Society*, 64(10), 1503-1504. doi:<https://doi.org/10.1057/jors.2011.165>
- Fliedner, M., & Boysen, N. (2008). Solving the car sequencing problem via Branch & Bound. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1023-1042. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.045>
- Gaudín, A., Madruga, G., & Rodríguez, C. (2020). Planificación de vuelo utilizando algoritmos evolutivos. Informe de Proyecto de Grado, Universidad de la República Uruguay, Instituto de Computación - Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay.
- Hauschild, M., & Pelikan, M. (2011). An introduction and survey of estimation of distribution algorithms. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(3), 111-128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.08.003>
- Ian P., G. (1998). Two Results on Car-sequencing Problems. University of Strathclyde. (APES-02-98).
- Jahren, E., & Achá, R. A. (2018). A column generation approach and new bounds for the car sequencing problem. *Annals of Operations Research*, 264(1-2), 193-211. doi:<https://doi.org/10.1007/s10479-017-2663-4>
- Kis, T. (2004). On the complexity of the car sequencing problem. *Operations Research Letters*, 32(4), 331-335. doi:<https://doi.org/10.1016/j.orl.2003.09.003>
- Larrañaga, P., & Lozano, J. A. (2002). Estimation of Distribution Algorithms: A New Tool for Evolutionary Computation. En *Genetic Algorithms and Evolutionary Computation* (Vol. 2, págs. 1568-2587). Springer US. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1539-5>
- Nguyen, A. (s.f.). Challenge ROADEF' 2005 Car Sequencing Problem. RENAULT.
- Palacio, J. D., & Larrea, O. L. (2017). A lexicographic approach to the robust resource-constrained project scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*, 24(1-2), 143-157. doi:<https://doi.org/10.1111/itor.12301>
- Parrello, B. D., Kabat, W. C., & Wos, L. (1986). Job-shop scheduling using automated reasoning: A case study of the car-sequencing problem. *Journal of Automated Reasoning*, 2, 1-42.
- Sánchez Márquez, E. M., Puga Soberanes, H. J., Mancilla Espinoza, L. E., Carpio Valadez, J. M., Ornelas Rodríguez, M., & Manzanares Cuadro, J. I. (2019). Algoritmo de evolución diferencial con reparador cromosómico aplicado a un problema de secuenciación de vehículos. *Research in Computing Science*, 148(8), 279-292.
- Solnon, C., Cung, V., Nguyen, A., & Artigues, C. (2008). The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem. *European Journal of Operational Research*, 191, 912–927.
- Sun, J., Zhang, Q., Li, J., & Yao, X. (2008). A Hybrid Estimation of Distribution Algorithm for CDMA Cellular System Design. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 7(2), 187-200. doi:<https://doi.org/10.1142/S1469026808002235>
- Valdez-Peña, S. I., Hernández, A., & Botello, S. (2013). A Boltzmann based estimation of distribution algorithm. *Information Sciences*, 236, 126–137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.02.040>

Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

[Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1^{er} Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2^{do} Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3^{er} Coautor

Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1^{er} Autor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1^{er} Autor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1^{er} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1^{er} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 2^{do} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 2^{do} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 3^{er} Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 3^{er} Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

Resumen (En Español, 150-200 palabras)

Objetivos
Metodología
Contribución

Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Español)

Resumen (En Inglés, 150-200 palabras)

Objetivos
Metodología
Contribución

Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Inglés)

Citación: Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor†*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor. Título del Artículo. Revista de Ingeniería Industrial. Año 1-1: 1-11 (Times New Roman No. 10)

* Correspondencia del Autor (ejemplo@ejemplo.org)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Artículo

Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

En el *contenido del Artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No. 10 y Negrita]

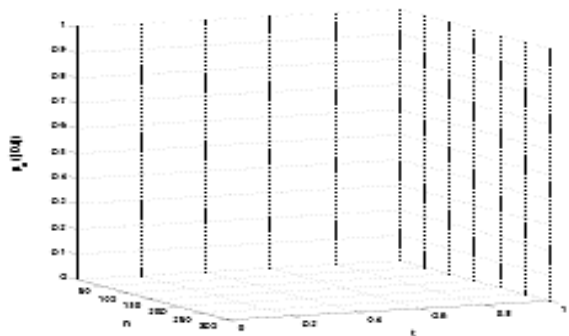


Gráfico 1 Título y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

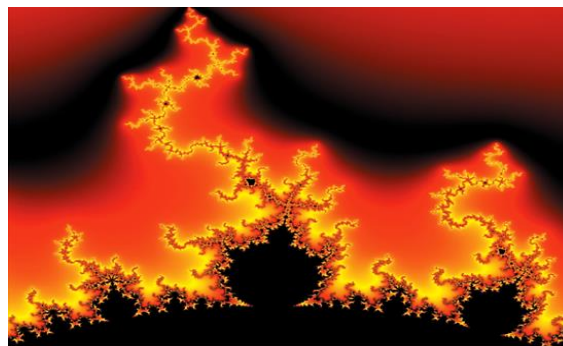


Figura 1 Título y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Tabla 1 Título y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Cada Artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Título secuencial.

Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij} \quad (1)$$

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Artículo.

Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

Referencias

Utilizar sistema APA. No deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Artículo.

Utilizar Alfabeto Romano, todas las referencias que ha utilizado deben estar en el Alfabeto romano, incluso si usted ha citado un Artículo, libro en cualquiera de los idiomas oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (Inglés, Francés, Alemán, Chino, Ruso, Portugués, Italiano, Español, Árabe), debe escribir la referencia en escritura romana y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

Ficha Técnica

Cada Artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

-Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

Reserva a la Política Editorial

Revista de Ingeniería Industrial se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los Artículos a la Política Editorial del Research Journal. Una vez aceptado el Artículo en su versión final, el Research Journal enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del Artículo.

Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Declaración de Originalidad y carácter inédito del Artículo, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de Artículos que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes del Artículo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia del Artículo propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título del Artículo:

- El envío de un Artículo a Revista de Ingeniería Industrial emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en este Artículo ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en el Artículo, así como las teorías y los datos procedentes de otros Artículos previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Perú considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de este Artículo se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en el Artículo.

Copyright y Acceso

La publicación de este Artículo supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding Perú para su Revista de Ingeniería Industrial, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada del Artículo y la puesta a disposición del Artículo en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título del Artículo:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre Artículos enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio al Artículo el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de los Artículos. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con los Artículos que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter el Artículo a evaluación.

Responsabilidades de los Autores

Los Autores deben garantizar que sus Artículos son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Artículos definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza del Artículo presentado a arbitraje.

Servicios de Información

Indización - Bases y Repositorios

RESEARCH GATE (Alemania)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

HISPANA (Información y Orientación Bibliográfica-España)

Servicios Editoriales

Identificación de Citación e Índice H

Administración del Formato de Originalidad y Autorización

Testeo de Artículo con PLAGSCAN

Evaluación de Artículo

Emisión de Certificado de Arbitraje

Edición de Artículo

Maquetación Web

Indización y Repositorio

Traducción

Publicación de Obra

Certificado de Obra

Facturación por Servicio de Edición

Política Editorial y Administración

1047 Avenida La Raza -Santa Ana, Cusco-Perú. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: contact@ecorfan.org www.ecorfan.org

ECORFAN®

Editor en Jefe

SERRUDO-GONZALES, Javier. BsC

Directora Ejecutiva

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

Director Editorial

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

Diseñador Web

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

Diagramador Web

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

Asistente Editorial

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

Traductor

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

Filóloga

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

Publicidad y Patrocinio

(ECORFAN® Republic of Peru), sponsorships@ecorfan.org

Licencias del Sitio

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. financingprograms@ecorfan.org

Oficinas de Gestión

1047 Avenida La Raza -Santa Ana, Cusco-Perú.

Revista de Ingeniería Industrial

“Análisis aerodinámico en CFD de los alerones en automóviles convencionales”

HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced y RODRIGUEZ-ORTIZ, Gabriel

Universidad Politécnica de Juventino Rosas

“Análisis térmico e hidráulico de diferentes geometrías de tubos para mejorar el desempeño de un radiador de automóvil”

ZUÑIGA-CERROBLANCO, José Luis, HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, COLLAZO-BARRIENTOS, Juan Carlos y HERNANDEZ-GUERRERO, Abel

Universidad Politécnica de Juventino Rosas

Universidad Politécnica de Aguascalientes

Universidad de Guanajuato

“Efecto del grupo funcional en la adsorción de Ag(I) en soluciones sintéticas con materiales mesoporosos de sílica”

SALAZAR-HERNÁNDEZ, Mercedes, SALAZAR-HERNÁNDEZ, Carmen, RANGEL-PORRAS, Gustavo y CORONA-ARROYO, Mario

Universidad de Guanajuato

Instituto Politécnico Nacional

“Estudio de factibilidad para la aplicación de algoritmos de estimación de distribución al problema de secuenciación de vehículos”

VELÁZQUEZ-JUÁREZ, Juan Carlos, PUGA-SOBERANES, Héctor José, PADIERNA-GARCÍA, Luis Carlos y SÁNCHEZ-MÁRQUEZ, Elvi Malintzin

Instituto Tecnológico de León

Universidad de Guanajuato

