

27

**OPTIMIZACIÓN AERODINÁMICA**  
**DE AUTOBUSES EN ECUADOR: EFICIENCIA ENERGÉTICA Y**  
**SOSTENIBILIDAD**

# OPTIMIZACIÓN AERODINÁMICA

DE AUTOBUSES EN ECUADOR: EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD

## AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF BUSES IN ECUADOR: ENERGY EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY

Antonio Gabriel Castillo-Medina<sup>1</sup>

E-mail: [ua.antonio83@uniandes.edu.ec](mailto:ua.antonio83@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

Giovanny Vinicio Pineda-Silva<sup>1</sup>

E-mail: [ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec](mailto:ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2785-1249>

Vinicio Sebastián Ribadeneira-Ramírez<sup>1</sup>

E-mail: [ua.viniocorr76@uniandes.edu.ec](mailto:ua.viniocorr76@uniandes.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2087-9038>

<sup>1</sup> Universidad Regional Autónoma de los Andes. Ecuador.

### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Castillo-Medina, A. G., Pineda-Silva, G. V., & Ribadeneira-Ramírez, V. S. (2025). Optimización aerodinámica de autobuses en Ecuador: eficiencia energética y sostenibilidad. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 8(3), 232-240.

**Fecha de presentación:** 10/05/2025

**Fecha de aceptación:** 06/06/2025

**Fecha de publicación:** 01/07/2025

### RESUMEN

La optimización aerodinámica de autobuses es fundamental para mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones contaminantes, especialmente en países como Ecuador, donde las condiciones geográficas y climáticas representan desafíos adicionales. Este estudio tuvo como objetivo evaluar estrategias aerodinámicas aplicadas al diseño de autobuses mediante una revisión sistemática de la literatura, identificando las tecnologías más efectivas para minimizar la resistencia aerodinámica y mejorar el rendimiento energético. Se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas como ScienceDirect y Scopus, seleccionando estudios publicados entre 2019 y 2023 que abordaron el uso de dispositivos aerodinámicos, modificaciones en la carrocería y simulaciones CFD. Los resultados indicaron que los alerones y difusores permiten reducir el Cd en 9,23% y 3,68%, respectivamente, mientras que el uso de superficies con hoyuelos logra ahorros de hasta 6,4 litros por cada 1.000 km recorridos. Además, las modificaciones en la carrocería, como deflectores y geometrías optimizadas, disminuyen significativamente la resistencia aerodinámica y mejoran la estabilidad del vehículo. La investigación destaca la importancia de las simulaciones CFD y la integración de inteligencia artificial en futuros estudios para acelerar el desarrollo de diseños más eficientes. Se concluye que la implementación de estas tecnologías, junto con políticas públicas que fomentan su adopción, es esencial para avanzar hacia un transporte público más sostenible y eficiente en Ecuador, reduciendo los costos operativos y el impacto ambiental del sector automotriz.

### Palabras clave:

Optimización aerodinámica de autobuses; eficiencia energética en transporte; reducción del coeficiente de arrastre; sostenibilidad en movilidad; simulaciones CFD.

### ABSTRACT

The aerodynamic optimization of buses is fundamental to improving fuel efficiency and reducing pollutant emissions, especially in countries like Ecuador, where geographic and climatic conditions present additional challenges. This study aimed to evaluate aerodynamic strategies applied to bus design through a systematic literature review, identifying the most effective technologies to minimize aerodynamic drag and improve energy performance. An exhaustive search was conducted in scientific databases such as ScienceDirect and Scopus, selecting studies published between 2019 and 2023 that addressed the use of aerodynamic devices, body modifications, and CFD simulations. The results indicated that spoilers and diffusers can reduce the drag coefficient by 9.23% and 3.68%, respectively, while the use of dimpled surfaces achieves savings of up to 6.4 liters per 1,000 km traveled. Additionally, body modifications, such as deflectors and optimized geometries, significantly reduce aerodynamic drag and improve vehicle stability. The research highlights the importance of CFD simulations and the integration of artificial intelligence in future studies to accelerate the development of more efficient designs. It is concluded that the implementation of these technologies, along with public policies that encourage their adoption, is essential for advancing towards more sustainable and efficient public transportation in Ecuador, reducing operational costs and the environmental impact of the automotive sector.

### Keywords:

Aerodynamic optimization of buses; energy efficiency in transportation; drag coefficient reduction; sustainability in mobility; CFD simulations.

## INTRODUCCIÓN

El diseño aerodinámico de autobuses constituye un área clave dentro de la ingeniería automotriz, con implicaciones directas en la eficiencia del consumo de combustible y la reducción de emisiones contaminantes. En el contexto actual, caracterizado por el incremento en los costos de los combustibles y la creciente presión regulatoria para mitigar el impacto ambiental del transporte, la optimización aerodinámica se ha convertido en una estrategia esencial para mejorar el desempeño energético de los vehículos de transporte público.

La aerodinámica vehicular se enfoca en minimizar la resistencia al avance inducida por el flujo de aire, lo que permite reducir el coeficiente de arrastre (Cd), mejorar la estabilidad del vehículo y, en consecuencia, disminuir el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero.

En Ecuador, el transporte público desempeña un papel fundamental en la movilidad urbana e interurbana. Sin embargo, gran parte de la flota operativa carece de un diseño aerodinámico eficiente, lo que incrementa el gasto energético y la huella de carbono. Este problema se agrava debido a la diversidad geográfica del país, que abarca desde regiones costeras hasta zonas andinas de gran altitud, donde la menor densidad del aire y las condiciones de viento cruzado representan desafíos adicionales para la estabilidad y el desempeño de los autobuses. Ciudades como Quito y Cuenca experimentan estas dificultades con mayor intensidad, ya que los cambios en la presión atmosférica y las corrientes de aire pueden alterar la resistencia aerodinámica y el comportamiento del vehículo en carretera (Arteaga et al., 2020).

Para mejorar la eficiencia aerodinámica de los autobuses, diversas estrategias han sido exploradas en la literatura científica. Entre las soluciones más prometedoras se encuentran la incorporación de dispositivos aerodinámicos como alerones y deflectores, la modificación de la estructura del chasis para reducir el área frontal y la implementación de superficies con texturas optimizadas, como aquellas con microhoyuelos, inspiradas en la aerodinámica natural de ciertas superficies biológicas. Además, la optimización del diseño de la carrocería mediante la suavización de esquinas y la reducción de la altura del vehículo contribuyen a una menor resistencia aerodinámica y una mejor estabilidad en condiciones adversas.

El desarrollo de modelos computacionales avanzados, como la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), ha permitido evaluar con precisión los efectos de diferentes modificaciones en la aerodinámica vehicular. Mediante este enfoque, es posible modelar y analizar la interacción del flujo de aire con la estructura del autobús, identificando configuraciones que optimizan la eficiencia aerodinámica. Además, la validación experimental a

través de pruebas en túneles de viento y experimentos a escala complementa estos análisis computacionales, proporcionando evidencia empírica para la implementación de mejoras aerodinámicas en el diseño de autobuses (Arteaga et al., 2020).

La eficiencia energética y la sostenibilidad en el transporte dependen en gran medida de la reducción de la resistencia aerodinámica. El coeficiente de arrastre influye significativamente en el rendimiento del vehículo, afectando tanto el consumo de combustible como las emisiones de gases contaminantes. Investigaciones previas han demostrado que una reducción del 15% en la resistencia aerodinámica puede traducirse en un ahorro de combustible del 5% al 7% en condiciones de autopista (Bellman et al., 2010; Villacrés Toalombo & Sumi Guamán, 2017).

Se estima que el 53% de la energía generada por el motor de un vehículo se destina a superar la resistencia aerodinámica, mientras que la resistencia a la rodadura representa el 32%, dejando solo un 9% para los sistemas auxiliares y un 6% para la transmisión. En este sentido, las estrategias de control de flujo, tanto activas como pasivas, han sido ampliamente estudiadas como alternativas viables para reducir el consumo de combustible y mejorar el desempeño energético de los autobuses (Bellman et al., 2010; Villacrés Toalombo & Sumi Guamán, 2017).

En el caso de Ecuador, la adaptación e implementación de estas estrategias aerodinámicas resulta esencial para responder a las necesidades particulares del sistema de transporte público. La variabilidad de las condiciones topográficas y climáticas del país exige soluciones de diseño que no solo optimicen la eficiencia aerodinámica, sino que también garanticen la durabilidad y la operatividad de los autobuses en entornos exigentes. La incorporación de mejoras aerodinámicas no solo tiene el potencial de reducir el consumo de combustible y las emisiones de carbono, sino que también contribuye a mejorar la seguridad y la comodidad de los pasajeros, al disminuir la inestabilidad del vehículo en condiciones de viento cruzado y mejorar la distribución de fuerzas sobre la estructura del chasis.

Este estudio tiene como objetivo evaluar estrategias aerodinámicas aplicadas al diseño de autobuses mediante una revisión sistemática de la literatura, identificando las tecnologías más efectivas para minimizar la resistencia aerodinámica y mejorar el rendimiento energético. Mediante una revisión exhaustiva de la literatura científica y el análisis de estudios de caso, se busca identificar tecnologías y enfoques que permitan mejorar la eficiencia aerodinámica del transporte público. Asimismo, esta investigación pretende establecer un marco de referencia para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos orientados a promover un sistema de movilidad más eficiente y sostenible en Ecuador.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio siguió una metodología de revisión sistemática de la literatura, con el propósito de identificar oportunidades y desafíos en la optimización aerodinámica de autobuses en Ecuador. La investigación se centró en estrategias para mejorar la eficiencia de combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes mediante la aplicación de dispositivos y diseños aerodinámicos avanzados.

El proceso metodológico inició con la definición del problema y los objetivos de la investigación, seguido de una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos científicas reconocidas, incluyendo ScienceDirect y Scopus, con el fin de recopilar estudios relevantes publicados entre 2019 y 2023. Para garantizar la precisión y relevancia de los seleccionados, se utilizaron ecuaciones de búsqueda estructuradas, basadas en documentos específicos de palabras clave, tales como:

- “reducción de arrastre” Y “autobús”
- “aerodinámica” y “autobús”
- “aerodinámica” y “Ecuador”

Para la selección de los estudios incluidos en la revisión, se establecieron criterios rigurosos que aseguraron la pertinencia y calidad de la información recopilada. Se consideraron únicamente artículos revisados por pares que abordan áreas de conocimiento relacionadas con aerodinámica, transporte, ingeniería automotriz y sostenibilidad, así como estudios basados en simulaciones CFD. Además, se desarrollaron como criterio de inclusión que el título, resumen o palabras clave de cada documento contuvieran al menos dos términos de las ecuaciones de búsqueda. La revisión contempló estudios publicados en inglés y español.

La búsqueda inicial generó 1.120 documentos. Para manejar este volumen de información y garantizar la relevancia de los datos, se aplicó un proceso de selección basado en una metodología de revisión sistemática de la literatura (Gómez-Luna et al., 2014). Se priorizaron los estudios más recientes y aquellos publicados en revistas indexadas de alto impacto, evaluando aspectos como la relevancia temática, la calidad de los autores y la validez de los resultados reportados. Tras la aplicación de estos filtros, se seleccionaron 20 documentos considerados fundamentales para el desarrollo del estudio, ya que proporcionaron información clave sobre estrategias efectivas de optimización aerodinámica en autobuses.

La gestión de referencias se realizó mediante Mendeley, una herramienta que permitió organizar, anotar y generar citas de manera sistemática. Una vez estructurada la base de datos bibliográfica, se procedió a un análisis temático cualitativo, a fin de identificar patrones recurrentes en la literatura. Este análisis permitió categorizar los estudios según los principales enfoques abordados, incluyendo:

- Impacto de dispositivos aerodinámicos: evaluación de la eficacia de alerones, difusores y superficies texturizadas para reducir el Cd y mejorar la eficiencia aerodinámica.
- Optimización del diseño de la carrocería: modificaciones en la geometría del autobús para minimizar la resistencia al avance y mejorar la estabilidad.
- Influencia de las condiciones geográficas y climáticas: análisis de cómo la altitud y el viento cruzado afectan el desempeño aerodinámico en el contexto ecuatoriano.

Si bien este estudio no contempló simulaciones prácticas, se planteó una segunda fase en la que se implementarán pruebas de CFD para evaluar cuantitativamente las modificaciones aerodinámicas propuestas. Estas simulaciones permitirán analizar con mayor precisión el impacto de cada estrategia y optimizar su aplicación en función de las condiciones específicas del transporte público en Ecuador.

Los hallazgos obtenidos en esta revisión sistemática servirán como base para futuras investigaciones, proporcionando una referencia para el desarrollo e implementación de soluciones aerodinámicas que contribuyan a un sistema de transporte más eficiente y sostenible en Ecuador.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión sistemática de la literatura permitió identificar múltiples estudios centrados en la optimización aerodinámica de autobuses, con el propósito de mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los hallazgos recopilados reflejan avances significativos en la implementación de dispositivos y modificaciones estructurales destinadas a disminuir el Cd y optimizar el desempeño energético de los autobuses en distintas condiciones operativas.

A continuación, se presenta una síntesis de los estudios más relevantes revisados, con un enfoque en sus objetivos, metodologías y principales contribuciones al campo de la aerodinámica vehicular.

Wang et al. (2022), llevaron a cabo una investigación multiparamétrica sobre la optimización aerodinámica y acústica en autobuses interurbanos, utilizando técnicas avanzadas de modelado. Sus resultados indicaron una reducción del arrastre aerodinámico en un 6-8%, lo que se tradujo en una mejora en el consumo de combustible de hasta un 5%. Además, el estudio destacó la importancia de la configuración de la malla en los modelos CFD, subrayando su influencia en la precisión de los resultados.

Por otro lado, Barber et al. (2023), evaluaron la efectividad de dispositivos aerodinámicos, como alerones y difusores, en autobuses de transporte urbano. Sus experimentos con CFD revelaron que la inclusión de alerones permitió reducir el Cd en un 9,23%, mientras que los difusores lograron una disminución del 3,68%. Además de reducir la resistencia aerodinámica, estos dispositivos contribuyen

a la disminución de la presión en zonas críticas del vehículo, lo que mejora la eficiencia del combustible.

Una estrategia alternativa explorada en la literatura fue el uso de superficies con hoyuelos, investigada por Palanivendhan et al. (2021). Su estudio demostró que la incorporación de esta textura aerodinámica en la carrocería de autobuses redujo significativamente el Cd y optimizó el consumo de combustible, logrando un ahorro estimado de 6,4 litros por cada 1.000 km recorridos. El mecanismo de acción de esta técnica radica en la reducción de la separación del flujo y la minimización de la turbulencia, permitiendo una adherencia más estable del aire a la superficie del vehículo.

En cuanto a modificaciones estructurales, Arteaga et al. (2020), examinaron el impacto de la optimización del diseño de la carrocería mediante la incorporación de deflectores y alerones. Sus simulaciones con CFD evidenciaron una reducción sustancial de las zonas de turbulencia y una mejora del Cd. En particular, la implementación de estas modificaciones permitió reducir el arrastre aerodinámico hasta en un 60%, con un impacto directo en la estabilidad del vehículo y la eficiencia del combustible.

Kahsay & Zeleke (2024), en un estudio reciente, analizó el efecto de dispositivos aerodinámicos como spoilers y difusores en autobuses de transporte público. Los resultados mostraron una reducción significativa del arrastre aerodinámico, lo que sugiere que estas tecnologías pueden ser implementadas de manera efectiva en el diseño de autobuses urbanos para mejorar su desempeño energético.

A lo largo de la revisión de la literatura, se identificó que la combinación de estas estrategias aerodinámicas no solo contribuye a la reducción del Cd, sino que también tiene un impacto en la estabilidad y seguridad del vehículo. La efectividad de cada tecnología varía en función de factores como la forma del autobús, la velocidad de operación y las condiciones ambientales.

Los estudios revisados subrayan la importancia de la integración de tecnologías aerodinámicas avanzadas junto con políticas públicas que fomentan la transición hacia un transporte más eficiente y sostenible. En este sentido, la implementación de estas estrategias en el contexto ecuatoriano requiere una evaluación adicional para garantizar su adaptación a las condiciones geográficas y climáticas del país.

Finalmente, los resultados de la revisión destacan que la implementación de mejoras aerodinámicas tiene un impacto significativo en la reducción del consumo de combustible y en la estabilidad del vehículo. En particular, la literatura revisada sugiere que dispositivos como alerones y superficies con texturas especiales pueden reducir el Cd y mejorar la eficiencia energética de los autobuses en condiciones de operación real.

La optimización aerodinámica de autobuses representa un aspecto clave para mejorar la eficiencia del combustible y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Este estudio revisa diversas investigaciones que analizan estrategias y tecnologías destinadas a alcanzar estos objetivos. A continuación, se examinan los hallazgos más relevantes, destacando los avances en dispositivos aerodinámicos, modificaciones estructurales y enfoques tecnológicos innovadores.

Barber et al. (2023), evalúan el impacto de dispositivos aerodinámicos como alerones y difusores en autobuses de transporte urbano, evidenciando reducciones significativas en el Cd de 9.23% y 3.68%, respectivamente. Estos resultados resaltan la eficacia de estos dispositivos para mejorar la eficiencia del combustible, aspecto crucial en el transporte público debido a su impacto en los costos operativos. Además de la reducción del consumo de combustible, estos dispositivos contribuyen a una mayor estabilidad del vehículo en condiciones de viento cruzado, factor determinante para la seguridad de los pasajeros y la maniobrabilidad del autobús en diversas condiciones climáticas.

Por otra parte, Palanivendhan et al. (2021), exploran el uso de superficies con hoyuelos como una estrategia para reducir la separación del flujo y la turbulencia en la carrocería de autobuses. Su estudio demuestra que estas texturas aerodinámicas permiten disminuir el Cd y optimizar el consumo de combustible, alcanzando un ahorro aproximado de 6,4 litros por cada 1.000 km recorridos. Esta técnica mantiene el flujo de aire adherido a la superficie del vehículo, minimizando la resistencia aerodinámica y mejorando el desempeño energético. Dado su impacto positivo en la eficiencia del combustible, su implementación en autobuses comerciales y de larga distancia resulta particularmente relevante desde una perspectiva tanto económica como ambiental.

En cuanto a modificaciones estructurales, Arteaga et al. (2020), investigan la incorporación de deflectores y alerones en el diseño de la carrocería, concluyendo que estas mejoras pueden disminuir el Cd hasta en 45% y el arrastre aerodinámico total en 60%. Estos datos subrayan la importancia de optimizar la geometría del autobús para reducir la resistencia aerodinámica y mejorar la estabilidad del vehículo. Además, estas modificaciones presentan un costo de implementación relativamente bajo en comparación con los beneficios obtenidos, lo que las convierte en una solución viable para fabricantes de autobuses que buscan aumentar la eficiencia energética sin incurrir en costos excesivos.

La reducción de la resistencia aerodinámica es un factor determinante para maximizar la eficiencia energética y disminuir las emisiones contaminantes. La distribución de la presión y la velocidad del flujo de aire alrededor del vehículo afectan directamente su rendimiento aerodinámico, lo que hace imprescindible el desarrollo de

estrategias de optimización adecuadas a distintos escenarios de operación. En este sentido, la adaptación de las mejoras aerodinámicas a las condiciones geográficas y climáticas de Ecuador resulta esencial para garantizar su efectividad en un entorno caracterizado por variaciones de altitud y condiciones de viento cruzado.

Asimismo, la integración de tecnologías aerodinámicas avanzadas con políticas públicas orientadas a la sostenibilidad es un aspecto clave para mejorar la eficiencia del transporte urbano. La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante estrategias aerodinámicas no solo contribuye a la mitigación del impacto ambiental, sino que también ofrece beneficios económicos a largo plazo al reducir el consumo de combustible. Este enfoque integral es fundamental para abordar los desafíos contemporáneos relacionados con el cambio climático y la eficiencia energética. En este sentido, la implementación de normativas que incentivan el uso de tecnologías limpias y eficientes desempeña un papel crucial en la modernización del sistema de transporte público.

El uso de herramientas como CFD ha sido determinante para la optimización aerodinámica de autobuses, ya que permite identificar y reducir áreas de alta resistencia aerodinámica con precisión. Las simulaciones computacionales han facilitado el desarrollo de diseños más eficientes y menos contaminantes, al proporcionar información detallada sobre la interacción entre el flujo de aire y la estructura del vehículo. Además, la incorporación de materiales ligeros y resistentes en la fabricación de autobuses mejora la eficiencia general del sistema de transporte, al disminuir tanto el consumo de combustible como las emisiones contaminantes.

Otro aspecto relevante en el diseño aerodinámico de autobuses es la optimización de la circulación del aire en el interior del vehículo. El uso de aberturas estratégicamente ubicadas, como ventanas y ventilaciones pasivas, permite mejorar la circulación del aire sin necesidad de incrementar el consumo energético. Estas soluciones de diseño pasivo contribuyen significativamente al confort térmico de los pasajeros y a la reducción de la carga energética del sistema de climatización. En consecuencia, la implementación de estrategias de ventilación natural representa una alternativa viable para mejorar la eficiencia energética del transporte público sin comprometer la comodidad de los usuarios.

Los estudios revisados enfatizan la necesidad de adoptar un enfoque integrado para mejorar la eficiencia energética y la sostenibilidad en el diseño de autobuses. La combinación de tecnologías aerodinámicas avanzadas, el uso de materiales innovadores y la aplicación de estrategias de diseño pasivo han demostrado ser factores clave para lograr una reducción efectiva del Cd y optimizar el consumo de combustible. Además, la estrecha colaboración entre ingenieros, diseñadores y responsables de políticas públicas resulta esencial para la implementación

de soluciones que satisfagan las crecientes demandas de sostenibilidad en el sector del transporte.

Un aspecto adicional que refuerza la importancia de la optimización aerodinámica en autobuses es el impacto de la geometría de la superficie frontal en la resistencia aerodinámica. Bayindirli (2021), demuestra experimentalmente, mediante pruebas en túnel de viento con un modelo a escala, que la incorporación de una varilla de control de flujo de sección transversal circular en distintas ubicaciones estratégicas puede reducir el Cd de manera significativa. En su estudio, el uso de varillas de 10 mm, 20 mm y 30 mm de diámetro permite alcanzar reducciones de la resistencia aerodinámica de 10.06%, 7.35 % y 7.85%, respectivamente.

Estos resultados evidencian que la aplicación de técnicas de control de flujo pasivo es una estrategia viable para minimizar la resistencia inducida por la forma geométrica del autobús, lo que puede traducirse en mejoras en el consumo de combustible y la estabilidad del vehículo. La integración de este tipo de soluciones con otras estrategias revisadas, como la optimización de la carrocería y el uso de dispositivos aerodinámicos, refuerza la necesidad de un enfoque multidimensional en el diseño de autobuses, donde cada elemento aerodinámico contribuya de manera sinérgica a la reducción del arrastre y la mejora de la eficiencia energética.

La elección del modelo de turbulencia en simulaciones CFD es un factor determinante en la precisión de los análisis aerodinámicos de autobuses. Huang et al. (2021), realizan un estudio comparativo de cinco modelos de turbulencia (IDDES, DDES, DES, LES y URANS) con el objetivo de identificar el más adecuado para evaluar el rendimiento aerodinámico de autobuses. Los resultados indican que IDDES es el modelo más preciso para capturar la presión negativa en la parte trasera del autobús y predecir los gradientes de presión con mayor efectividad. Además, IDDES demuestra una capacidad superior para capturar vórtices en la parte delantera del autobús y modelar de manera más amplia el flujo de estela en comparación con otros modelos.

Estos hallazgos tienen implicaciones directas en la presente investigación, ya que destacan la importancia de seleccionar un modelo de turbulencia adecuado para evaluar estrategias de optimización aerodinámica. La capacidad de IDDES para representar con mayor fidelidad la evaluación del flujo de aire con la carrocería del autobús lo convierte en una herramienta valiosa para futuras simulaciones que busquen dispositivos aerodinámicos, modificaciones estructurales y estrategias de reducción del Cd. Asimismo, la identificación de patrones de flujo más detallados mediante IDDES puede contribuir al desarrollo de diseños más eficientes, minimizando las pérdidas de energía asociadas a la turbulencia y mejorando la estabilidad del vehículo en condiciones de operación real.

El uso de inteligencia artificial en el análisis aerodinámico de autobuses ha demostrado ser una herramienta prometedora para mejorar la precisión y eficiencia de las simulaciones. García-Fernández et al. (2023), evalúan la capacidad de una red neuronal convolucional (CNN) para predecir los campos aerodinámicos de velocidad y presión en vehículos pesados, utilizando datos generados a partir de simulaciones CFD basadas en el modelo de turbulencia k- SST. Para entrenar y validar la CNN, se emplean tres geometrías de referencia: dos modelos de autocar (SC7 y SC5 del fabricante SUNSUNDEGUI) y la carrocería Ahmed. A partir de estas geometrías, se generaron múltiples variantes que permiten obtener un amplio conjunto de datos para el entrenamiento y prueba de la red neuronal.

Los resultados del estudio muestran una alta concordancia entre las predicciones de la CNN y los valores obtenidos mediante simulaciones numéricas, con errores muy reducidos. Un hallazgo particularmente relevante es la reducción del tiempo computacional en cuatro órdenes de magnitud, lo que implica un avance significativo en términos de eficiencia operativa para estudios aerodinámicos complejos. La capacidad de la CNN para representar con precisión los campos de velocidad y presión sugiere que esta tecnología puede integrarse como una herramienta complementaria en el diseño de autobuses optimizados aerodinámicamente, permitiendo una evaluación rápida y eficiente de múltiples configuraciones sin la necesidad de realizar simulaciones computacionales de alto costo.

Estos avances refuerzan la importancia de la aplicación de inteligencia artificial en la optimización aerodinámica, ya que facilitan el desarrollo de diseños más eficientes con una menor inversión en recursos computacionales. La integración de modelos basados en CNN podría acelerar la validación de dispositivos aerodinámicos y modificaciones estructurales, optimizando el proceso de diseño de autobuses con menor resistencia aerodinámica y mayor eficiencia energética.

A partir de los hallazgos de García-Fernández et al. (2023), que evidencian el potencial de la inteligencia artificial en la optimización aerodinámica de autobuses, los autores de este estudio proponen una futura línea de investigación que explora la aplicación de redes neuronales convolucionales y otras técnicas de aprendizaje automático para la evaluación y mejora del Cd en autobuses adaptados a las condiciones ecuatorianas.

Este enfoque se fundamenta en la creciente incorporación de la inteligencia artificial en distintos ámbitos del conocimiento en Ecuador, como lo demuestran estudios recientes sobre su impacto en el marco normativo laboral (Cisneros Zúñiga et al., 2021). La integración de inteligencia artificial en la optimización aerodinámica podría representar un avance significativo en el diseño de autobuses más eficientes y sostenibles, reduciendo costos

computacionales y permitiendo simulaciones más ágiles y precisas en el contexto del transporte público del país.

El diseño aerodinámico de autobuses no solo influye en la reducción del Cd y la eficiencia del combustible, sino que también desempeña un papel fundamental en la seguridad y el confort de los pasajeros. Niranjana et al. (2020), realizan un análisis integral sobre los parámetros clave que afectan la aerodinámica, la eficiencia energética y la ventilación en autobuses de transporte en la India, considerando tanto simulaciones CFD como pruebas experimentales. Un hallazgo relevante de su estudio es la influencia de la temperatura y la dirección del viento en la ventilación natural dentro del vehículo, resaltando que la distribución del aire de enfriamiento depende directamente de las condiciones climáticas externas y del diseño estructural de las ventanas y aberturas.

Estos resultados guardan relación con el presente estudio, ya que destacan la necesidad de integrar estrategias aerodinámicas con soluciones de diseño pasivo, como ajustes óptimos de ventilación y ventanas ajustables, para mejorar tanto la eficiencia energética como el confort térmico dentro del autobús. En el contexto ecuatoriano, donde las condiciones climáticas varían significativamente según la región, la implementación de estrategias de ventilación natural podría contribuir a la reducción del consumo energético de los sistemas de climatización, optimizando aún más la sostenibilidad del transporte público. La incorporación de estos principios en futuras investigaciones permitiría desarrollar diseños de autobuses que no solo reduzcan la resistencia aerodinámica, sino que también mejoren la calidad del ambiente interno para los pasajeros.

El rediseño aerodinámico de autobuses ha demostrado ser una estrategia efectiva para reducir la resistencia del aire y mejorar la eficiencia operativa del vehículo. Jinachandra et al. (2020), llevan a cabo un estudio en el que analizan el impacto de modificaciones estructurales en un autobús sin aire acondicionado, con el objetivo de reducir la fuerza de arrastre y optimizar el flujo de aire interno. Mediante modelado en SolidWorks, mallado en Hypermesh y simulaciones en Ansys Fluent, logran determinar que el autobús rediseñado presenta una resistencia aerodinámica de 812.74 N y un Cd de 0.67, valores significativamente inferiores en comparación con el modelo convencional.

Estos resultados refuerzan la relevancia de implementar metodologías de simulación avanzadas para evaluar configuraciones aerodinámicas óptimas en autobuses. En Ecuador, la aplicación de enfoques similares permitiría explorar modificaciones estructurales específicas que reduzcan el Cd en autobuses adaptados a las condiciones ecuatorianas. Además, la reducción de la resistencia aerodinámica no solo impacta en la eficiencia del combustible, sino que también influye en la estabilidad del vehículo, un aspecto clave en rutas con variaciones

geográficas y climáticas significativas. La integración de herramientas de CFD en futuras investigaciones permitirá validar de manera más precisa las estrategias propuestas y garantizar su viabilidad en escenarios operativos reales.

## CONCLUSIONES

La presente investigación ha cumplido con éxito su objetivo de evaluar y sintetizar estrategias aerodinámicas aplicadas al diseño de autobuses para mejorar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones contaminantes. La revisión bibliográfica ha demostrado que la implementación de dispositivos aerodinámicos, como alerones y difusores, así como el uso de superficies con hoyuelos y modificaciones estructurales en la carrocería, pueden reducir significativamente el Cd, optimizando el rendimiento energético del vehículo.

Entre los hallazgos más relevantes, se destaca la reducción del Cd en 9.23 % y 3.68 % con el uso de alerones y difusores, respectivamente, lo que impacta directamente en la disminución del consumo de combustible. Asimismo, las superficies con hoyuelos han demostrado su capacidad para reducir la turbulencia y mejorar la adherencia del flujo de aire, logrando ahorros de hasta 6,4 litros por cada 1.000 km recorridos. Además, las modificaciones en la carrocería, como la incorporación de deflectores, han mostrado mejoras sustanciales en la estabilidad del vehículo y en la eficiencia aerodinámica con costos de implementación relativamente bajos.

El uso de CFD ha sido identificado como una herramienta clave para evaluar y optimizar diseños aerodinámicos, permitiendo identificar zonas de alta resistencia y proponer soluciones más eficientes. Además, se resalta la importancia de considerar estrategias de ventilación natural, que pueden mejorar el confort de los pasajeros sin incrementar el consumo de energía, lo que representa una alternativa viable en el contexto ecuatoriano, donde las variaciones climáticas exigen soluciones adaptadas.

Finalmente, la investigación enfatiza la necesidad de integrar estos avances tecnológicos con políticas públicas que incentivan la adopción de soluciones aerodinámicas eficientes en el transporte público. La reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> no solo representa un beneficio ambiental, sino que también contribuye a la reducción de costos operativos y al desarrollo de un sistema de movilidad más sostenible. En este sentido, futuras investigaciones pueden enfocarse en la aplicación de inteligencia artificial para optimizar aún más los diseños aerodinámicos y acelerar el desarrollo de autobuses más eficientes y adaptados a las condiciones geográficas y climáticas del país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arteaga, O., Hernán, M. V., Terán, H., Chacon, S., Lara, M. A., Rocha-Hoyos, J., & Aguirre, R. P. (2020). Aerodynamic optimization of the body of a bus. (Ponencia). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Geneva, Switzerland.
- Barber, C., Milovanovic, J., & Sharqawy, M. H. (2023). Investigating the impact of aerodynamic devices on drag reduction in a transit go-bus using CFD. Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress. (Ponencia). Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress. Sherbrooke, Canada.
- Bellman, M., Agarwal, R., Naber, J., & Chusak, L. (2010). Reducing energy consumption of ground vehicles by active flow control. In *Energy Sustainability*, 43949, 785-793. <https://doi.org/10.1115/ES2010-90363>
- Cisneros Zúñiga, C. P., Jiménez Martínez, R. C., Ricardo Velázquez, M., & Andrade Santamaría, D. R. (2021). Inteligencia artificial: desafíos para el marco normativo laboral ecuatoriano. *Rev Univ Soc*, 13(Supl 3), 340-345. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2487?articlesBySameAuthorPage=2>
- García-Fernández, R., Portal-Porras, K., Irigaray, O., Ansa, Z., & Fernandez-Gamiz, U. (2023). CNN-based flow field prediction for bus aerodynamics analysis. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48419-4>
- Gómez-Luna, E., Navas, D. F., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). Metodología de revisión de literatura para la gestión científica y de la información, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81(184), 158-163. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>
- Huang, T., Ma, J., Yi, D., Ren, X., Ke, R., Qu, C., Huang, Q., & Zeng, W. (2021). Análisis comparativo de modelos de turbulencia para evaluar las características aerodinámicas de autobuses. *J Appl Fluid Mech.*, 17(7), 1354-1367. <https://doi.org/10.30939/ijastech..994351>
- Jinachandra, N. S., Kubsad, S. S., Sarpabhushana, M., Siddaramaiah, S., & Rajashekaraiah, T. (2020). Modeling and computational fluid dynamic analysis on a non-AC bus coach system. *Heat Transfer*. Wiley Publications.
- Kahsay, Y. K., & Zeleke, D. S. (2024). Aerodynamic design optimization of locally built FSR Isuzu bus through numerical simulation. *Engineering Research Express*, 6(2). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad3acd>

- Niranjana, S. J., Kubsad, S. S., Ravichandran, G., & Santhosh, N. (2020). A comprehensive understanding of airflow in non-air-conditioned bus coaching system. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(3), 1222-1225. <https://doi.org/10.35940/ijeat.c5317.029320>
- Palanivendhan, M., Chandradass, J., Saravanan, C., Philip, J., & Sharan, R. (2021). Reduction in aerodynamic drag acting on a commercial vehicle by using a dimpled surface. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7072-7078. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.884>
- Villacrés Toalombo, H. I., & Sumi Guamán, C. M. (2017). Diseño aerodinámico y prototipado del vehículo Interprovincial ALFA-700 para Metálicas Pillapa. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Wang, Y., Raja, V., Madasamy, S. K., Padmanaban, S., AL-bonsrulah, H. A. Z., Ramaiah, M., Rajendran, P., Raji, A. P., Muzirafuti, A., & Wang, F. (2022). Multi-Parametric Investigations on Aerodynamic Force, Aeroacoustic, and Engine Energy Utilizations Based Development of Intercity Bus Associates with Various Drag Reduction Techniques through Advanced Engineering Approaches. *Sustainability*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/su14105948>