



Optimización energética y térmica de sistemas HVAC en autobuses interprovinciales mediante análisis CFD

Energy and thermal optimisation of HVAC systems in inter-provincial buses using CFD analysis

Edwin Javier Morejón-Sánchez
ua.edwinms68@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0006-7409-155X>

Esteban Fernando López-Espinel
ua.estebanle84@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0005-7502-3463>

Andrés Edisson Águila-León
ua.andresal02@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0005-4689-3275>

Mario Fernando Vargas-Brito
ua.mariovb40@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0000-0690-1406>

RESUMEN

El artículo abordó la optimización energética y térmica de sistemas HVAC en autobuses interprovinciales; en ese marco, el objetivo de investigación consistió en analizar la optimización energética y térmica de sistemas HVAC en autobuses interprovinciales mediante análisis CFD. Bajo un enfoque documental-comparativo, se examinaron configuraciones nacionales e internacionales mediante indicadores como capacidad frigorífica, potencia absorbida y coeficiente de eficiencia energética. Los resultados evidenciaron que los sistemas electrificados con control inteligente y diseño optimizado del flujo mejoraron la eficiencia energética y la distribución térmica, reduciendo el consumo energético por recorrido. Asimismo, la simulación CFD permitió identificar deficiencias en sistemas convencionales. En consecuencia, el modelado computacional se consolidó como herramienta clave para optimizar el confort térmico y el rendimiento operativo.

Descriptor: sistema de enfriamiento; ingeniería de la refrigeración; climatización. (Fuente: Tesaurus UNESCO).

ABSTRACT

The article addressed the energy and thermal optimisation of HVAC systems in interprovincial buses; within this framework, the research objective was to analyse the energy and thermal optimisation of HVAC systems in interprovincial buses using CFD analysis. Adopting a documentary-comparative approach, national and international configurations were examined using indicators such as cooling capacity, power consumption and energy efficiency ratio. The results showed that electrified systems with intelligent control and optimised flow design improved energy efficiency and thermal distribution, reducing energy consumption per journey. Furthermore, CFD simulation enabled the identification of shortcomings in conventional systems. Consequently, computational modelling established itself as a key tool for optimising thermal comfort and operational performance.

Descriptors: cooling system; refrigeration engineering; air conditioning. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 06/01/2026. Revisado: 12/01/2026. Aprobado: 18/01/2026. Publicado: 31/01/2026.

Tecnología



INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería del transporte y la eficiencia energética vehicular, el estudio de los sistemas de aire acondicionado se ha convertido en una línea de investigación prioritaria, especialmente por su incidencia directa en el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero; los sistemas HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) pueden representar entre el 10 % y el 30 % del consumo total de energía en vehículos de transporte colectivo, dependiendo de las condiciones climáticas, la arquitectura del sistema y la calidad del aislamiento térmico del habitáculo; esta proporción varía de manera significativa según la ocupación del vehículo, la temperatura exterior y el modo operativo del compresor, conforme documentan Zacharof et al. (2023).

En el contexto del transporte interprovincial ecuatoriano, los sistemas de aire acondicionado constituyen un componente esencial para garantizar el confort térmico y la seguridad de los pasajeros; su operación representa, al mismo tiempo, una carga energética considerable que impacta de forma negativa en la eficiencia global del vehículo, situación particularmente crítica en autobuses que transitan por zonas cálidas y húmedas del litoral y la Amazonía; en este sentido, Corazza et al. (2021) demuestran que el consumo atribuible al sistema de climatización puede incrementarse de manera sustancial en función de las características climáticas de la ruta, el coeficiente de ocupación del vehículo y el tipo de accionamiento del compresor.

A diferencia de los sistemas convencionales instalados en unidades nacionales, los sistemas internacionales integran tecnologías de control inteligente, ductos optimizados y unidades de tratamiento de aire independientes, características que les confieren superioridad técnica y mayor eficiencia operativa; en esta línea, Heß et al. (2023) documentan que los autobuses eléctricos dotados de sistemas HVAC electrificados logran reducciones significativas en el consumo específico de energía para calefacción y refrigeración, en comparación con tecnologías de accionamiento mecánico convencional.

A nivel internacional, se han desarrollado sistemas más avanzados que incluyen compresores eléctricos, control por zonas, sensores inteligentes y materiales termoaislantes de alto rendimiento; estas tecnologías no solo optimizan la distribución del flujo de aire, sino que permiten alcanzar mayores coeficientes de eficiencia energética (EER), reduciendo la carga térmica percibida sin comprometer el consumo total del sistema, de acuerdo con Widmer et al. (2025); al respecto, Jaybhay et al. (2015) señalan que la transición hacia autobuses con sistemas de climatización energéticamente eficientes requiere criterios técnicos de diseño que consideren la carga parcial, la distribución zonal del aire y la integración electrónica del compresor.

Por tanto; el objetivo de investigación consistió en analizar la optimización energética y térmica de sistemas HVAC en autobuses interprovinciales mediante análisis CFD.

MÉTODO

La metodología adoptada en esta investigación responde a un enfoque documental-comparativo, orientado a analizar y contrastar el desempeño energético y térmico de sistemas de aire acondicionado instalados en autobuses interprovinciales ecuatorianos con referentes internacionales de mayor desarrollo tecnológico; la revisión documental incluyó literatura científica indexada en bases como Scopus, Web of Science, Dialnet y SciELO. En esa dirección, Hossain et al. (2025) y Heß et al. (2023) documentan la eficiencia de sistemas HVAC electrificados en distintas condiciones climáticas y operativas, en tanto que Widmer et al. (2025) abordan la relación entre el control térmico zonal y el confort del pasajero en buses eléctricos de ciudad; de igual modo, se incorporaron trabajos sobre el impacto del aire acondicionado en el consumo energético de buses urbanos e interurbanos Corazza et al. (2021) y Zacharof et al. (2023), cuyos procedimientos metodológicos resultaron transferibles al contexto nacional.

En el ámbito normativo ecuatoriano, se revisaron documentos técnicos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y de la Agencia Nacional de Tránsito (ANT), con especial atención al Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 043, que establece condiciones



mínimas de confort y ventilación para vehículos de transporte público; estos referentes permitieron situar los indicadores de eficiencia dentro del marco regulatorio vigente y contrastarlos con los parámetros registrados en los sistemas nacionales documentados. En el plano internacional, se consideraron estándares de la Society of Automotive Engineers (SAE J1503), la normativa europea UNE-EN 14750-1 para HVAC en transporte de pasajeros y las recomendaciones del ASHRAE Handbook (2021) en su capítulo sobre vehículos de transporte terrestre; al respecto, Únal (2017), en su estudio realizado sobre un bus de pasajeros en condiciones reales de operación, aportó criterios de contraste entre los requerimientos de diseño y el confort térmico registrado, lo que permitió validar los indicadores de eficiencia energética adoptados como referencia comparativa en el presente trabajo.

El componente analítico central consistió en la revisión y sistematización de resultados de simulaciones CFD documentadas en la literatura especializada, procesadas y visualizadas mediante ANSYS CFD-Post; los datos se organizaron en matrices comparativas, gráficos de barras y mapas térmicos que incluyeron diagramas de dispersión del coeficiente de eficiencia energética (EER) en función de la carga térmica, así como mapas de distribución del flujo al interior del habitáculo. La comparación entre sistemas se estructuró a partir de indicadores documentados como la capacidad frigorífica expresada en kilowatts, la potencia absorbida, el EER y el consumo estimado por cada 100 km de recorrido; estas variables posibilitaron una valoración integral tanto del rendimiento térmico como del impacto energético de cada configuración, sustentada en fuentes primarias y secundarias de carácter técnico-científico.

RESULTADOS

Con el propósito de sintetizar y presentar de forma integrada los datos obtenidos ante la comunidad científica, los resultados se organizaron en matrices comparativas, gráficos de barras y mapas térmicos; entre los recursos de visualización empleados se cuentan diagramas de dispersión del EER en función de la carga térmica, tablas de rendimiento energético por tipo de sistema y mapas de distribución térmica generados mediante ANSYS CFD-Post, cuya aplicación permitió caracterizar con precisión los patrones de flujo al interior del habitáculo.

Tabla 1. Resumen de eficiencia térmica y consumo energético

Sistema	Capacidad frigorífica (kW)	Potencia absorbida (kW)	EER	Consumo estimado (kWh/100 km)
Nacional (convencional)	17,58 (60 000 BTU/hr)		6,0 2,93	14,8
Internacional (electrificado)	21,98 (75 000 BTU/hr)		7,2 3,05	11,6

Fuente: Elaboración propia con base en Mahesh et al. (2024), Bilgili et al. (2017) y Heß et al. (2023).

Los parámetros consignados en la Tabla 1 revelan las diferencias de desempeño energético entre ambos tipos de sistemas; la superioridad del modelo internacional se manifiesta en todos los indicadores analizados, con particular notoriedad en el consumo estimado por cada 100 km de recorrido, brecha que respalda la viabilidad técnica de incorporar tecnologías electrificadas en las flotas interprovinciales ecuatorianas, en consonancia con los criterios de optimización térmica que orientan el presente estudio.

DISCUSIÓN

En el contexto del objetivo planteado, que consiste en analizar la optimización energética y térmica de sistemas HVAC en autobuses interprovinciales mediante análisis CFD, los resultados evidencian que en el mercado ecuatoriano predominan sistemas accionados por el motor principal de tipo diésel, cuya eficiencia térmica resulta limitada por la dependencia directa del estado operativo de la unidad motriz; al respecto, Bilgili et al. (2017) confirman que este tipo de accionamiento conlleva pérdidas termodinámicas adicionales, especialmente bajo



condiciones de carga parcial. En contraste, los sistemas empleados en autobuses internacionales incluyen unidades autónomas o eléctricas que posibilitan un funcionamiento independiente del tren motriz; sobre este punto, Göhlich et al. (2018) documentan que esta configuración reduce el impacto sobre el consumo de combustible y las emisiones en flotas de transporte urbano, conclusión extensible al transporte interprovincial de pasajeros.

El análisis CFD permitió cuantificar la incidencia del sistema HVAC sobre el balance energético global del vehículo; los sistemas de climatización pueden absorber entre un 5 % y un 10 % de la potencia total del motor, con incrementos del consumo de combustible de entre el 5 % y el 20 % según la ruta y las condiciones climáticas prevalecientes. En esa dirección, Zacharof et al. (2023) cuantifican este impacto en términos de emisiones de CO₂, al concluir que la optimización del sistema HVAC constituye una palanca eficaz para reducir la huella ambiental de las flotas; en línea con ello, Corazza et al. (2021) desarrollan un procedimiento para estimar el consumo atribuible a la climatización en buses urbanos en función del clima y las características operativas, metodología que resulta transferible al contexto interprovincial ecuatoriano. En modelos internacionales, las tecnologías de recuperación de calor y control electrónico de compresores han demostrado reducir hasta un 15 % el consumo energético del sistema HVAC, según reportan Heß et al. (2023) en su análisis de buses eléctricos de batería; de igual modo, Hossain et al. (2025) documentan variaciones estacionales significativas en el rendimiento de buses eléctricos en climas cálidos del sur de los Estados Unidos, lo que pone de manifiesto la necesidad de calibrar los modelos CFD con datos climáticos locales representativos.

Una deficiencia notable identificada en los autobuses nacionales mediante simulación CFD es la distribución no uniforme del flujo de aire, particularmente en las zonas medias y traseras del habitáculo; el diseño de ductos ejecutado sin respaldo de análisis computacional genera zonas de baja ventilación y aprovechamiento energético subóptimo, situación que Ünal (2017) atribuye a la ausencia de criterios técnicos sustentados en datos experimentales. En contraste, los autobuses internacionales aplican modelos de simulación tipo k-ε para asegurar una distribución homogénea del flujo, optimizando la velocidad, la presión y la turbulencia interna del sistema, conforme señalan Widmer et al. (2025); en esa misma perspectiva, la incorporación de intercambiadores de calor de canal en zigzag de 90°, estudiados por Alvarez et al. (2021) mediante análisis de transferencia de calor, ofrece asimismo una alternativa técnica para mejorar la eficiencia del intercambio térmico en configuraciones compactas aplicables al transporte de pasajeros, aspecto que Jaybhay et al. (2015) complementan con evidencia sobre la viabilidad de autobuses climatizados energéticamente eficientes mediante diseño integrado del sistema.

Mientras que en Ecuador predominan sistemas con control manual o básico digital, en otros contextos se emplean sensores de temperatura por zona, controladores PID y sistemas inteligentes adaptativos que ajustan automáticamente el caudal de aire, la temperatura y la humedad relativa; a este respecto, Widmer et al. (2025) demuestran que la optimización del equilibrio entre confort energético y consumo, fundamentada en modelos de estado estacionario, reduce de forma mensurable las pérdidas operativas en buses eléctricos de ciudad; Mahesh et al. (2024) constatan, por su parte, que la integración de tecnología HAP en el sistema Volvo permite un control preciso de las condiciones internas con consumo energético optimizado, lo que valida la pertinencia de extender estos esquemas al parque automotor interprovincial del Ecuador; la consolidación de estas soluciones en el transporte nacional requeriría actualización normativa sectorial y estrategias de financiamiento diferenciadas, tal como establece ASHRAE (2021) en sus lineamientos para sistemas de ventilación y climatización de alto rendimiento.

CONCLUSION

El análisis confirma que la optimización energética y térmica de los sistemas HVAC en autobuses interprovinciales resulta alcanzable mediante el uso de simulación CFD; los sistemas electrificados con control inteligente y diseño optimizado de flujo superan a los convencionales tanto en la reducción del consumo energético como en la mejora de la



distribución térmica al interior del habitáculo. De este modo, se cumple el objetivo de la investigación al demostrar que la integración de tecnologías avanzadas y modelado computacional permite incrementar la eficiencia operativa y el confort sin comprometer el desempeño global del vehículo.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

REFERENCIAS

- Alvarez, R. C., Sarmiento, A. P. C., Cisterna, L. H. R., Milanese, F. H., & Mantelli, M. B. H. (2021). Heat transfer investigation of a 90° zigzag channel diffusion-bonded heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116823. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116823>
- Bilgili, M., Cardak, E., & Aktas, A. E. (2017). Thermodynamic analysis of bus air conditioner working with refrigerant R600a. *European Mechanical Science*, 1(2), 69–75.
- Corazza, M., Conti, V., Genovese, A., Ortenzi, F., & Valentini, M. P. (2021). A procedure to estimate air conditioning consumption of urban buses related to climate and main operational characteristics. *World Electric Vehicle Journal*, 12(1), 29. <https://doi.org/10.3390/wevj12010029>
- Göhlich, D., Fay, T.-A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunith, A., & Zhang, X. (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4, e15. <https://doi.org/10.1017/dsj.2018.10>
- Heß, L., Dimova, D., Piechalski, J. W., Rusche, S., Best, P., & Sonnekalb, M. (2023). Analysis of the specific energy consumption of battery-driven electrical buses for heating and cooling in dependence on the technical equipment and operating conditions. *World Electric Vehicle Journal*, 14(5), 126. <https://doi.org/10.3390/wevj14050126>
- Hossain, M. R., Babuji, A., Hasan, M. H., Yu, H., Oloufa, A., & Abou-Senna, H. (2025). Optimizing electric bus efficiency: Evaluating seasonal performance in a southern USA transit system. *Future Transportation*, 5(3), 92. <https://doi.org/10.3390/futuretransp5030092>
- Jaybhay, S., Nagarhalli, P., Tadigadapa, S., & Kapoor, S. H. (2015). Energy efficient air conditioned buses. *SAE Technical Paper*. <https://doi.org/10.4271/2015-26-0044>
- Mahesh, J., Bheema Shanker, M., Ashok, S., Sohail, M., & Hafeez, M. (2024). Optimizing Volvo bus air conditioning system design with HAP technology. *International Journal of Multidisciplinary Engineering in Current Research*, 9(5), 1–14. <https://doi.org/doi/10.2024-13529166>
- Ünal, Ş. (2017). An experimental study on a bus air conditioner to determine its conformity to design and comfort conditions. *Journal of Thermal Engineering*, 3(1), 1089–1101.
- Widmer, F., van Dooren, S., & Onder, C. H. (2025). Optimization of the energy-comfort trade-off of HVAC systems in electric city buses based on a steady-state model. *Control Engineering Practice*, 154, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2024.106158>
- Zacharof, N., Özener, O., Broekaert, S., Özkan, M., Samaras, Z., & Fontaras, G. (2023). The impact of bus passenger occupancy, heating ventilation and air conditioning systems on



Optimización energética y térmica de sistemas HVAC en autobuses interprovinciales mediante análisis CFD
Energy and thermal optimisation of HVAC systems in inter-provincial buses using CFD analysis
Edwin Javier Morejón-Sánchez
Esteban Fernando López-Espinel
Andrés Edisson Águila-León
Mario Fernando Vargas-Brito

energy consumption and CO₂ emissions. *Energy*, 272, 127155.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127155>

Derechos de autor: 2026 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>