

**OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE CÁLCULOS DE
TRANSFERENCIA DE CALOR PARA SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN
RESIDENCIALES USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS AVANZADOS
OPTIMIZATION AND COMPUTATIONAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER
CALCULATIONS FOR RESIDENTIAL HVAC SYSTEMS USING ADVANCED
NUMERICAL METHODS**

Autores: ¹Luis Antonio Ortiz Parra y ²Guillermo Edvin Machado Sotomayor.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1116-3545>

²ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5226-468X>

¹E-mail de contacto: antonio.ortiz@unach.edu.ec

²E-mail de contacto: gmachado@unach.edu.ec

Afiliación: ^{1,2}Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

Artículo recibido: 10 de Julio del 2025

Artículo revisado: 11 de Julio del 2025

Artículo aprobado: 18 de Julio del 2025

¹Ingeniero Mecánico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador), con 15 años de experiencia laboral. Maestrante de la Maestría en Matemática Aplicada con mención en Matemática Computacional, Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

²Matemático de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador) con 30 años de experiencia laboral. Magíster en Formulación, Gestión y Evaluación de Proyectos Productivos y Sociales, Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Educación Matemática, Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador). Experto en Procesos E-Learning, FATLA. PhD. en Matemáticas e Informática de la Universidad de la Calabria, (Italia).

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un marco computacional para optimizar sistemas de climatización residencial en gran altitud, donde la presión reducida modifica las propiedades termodinámicas del aire. Se diseñó un modelo lumped-capacity que integra simulación de transferencia de calor con datos de carga térmica y control PID dual, cuyos parámetros se ajustaron mediante algoritmos genéticos. El caso de estudio consideró un auditorio de 365,85 m³ en Riobamba (2 739 msnm), bajo condiciones externas de 27 °C y 73 % de humedad relativa, con metas interiores de 22 °C y 60 % de humedad relativa. Primero se calculó la demanda térmica (54 398 BTU/h) y se seleccionaron cuatro unidades evaporadoras de 24 200 BTU/h. A continuación, el algoritmo genético optimizó simultáneamente los coeficientes del controlador, reduciendo la función de costo en un 32 %. La validación computacional mostró un tiempo de establecimiento de 30 minutos, un sobrepaso máximo de 1 °C y una estabilización fiable de la humedad relativa. Como conclusión, la combinación de simulación térmica avanzada, optimización evolutiva y control adaptativo ofrece una solución replicable para mejorar la eficiencia y el confort en sistemas HVAC de

montaña, y sienta las bases para futuros estudios con dinámica de fluidos computacional y gemelos digitales.

Palabras clave: Optimización computacional, Transferencia de calor, Sistemas HVAC, Algoritmos genéticos, Control PID.

Abstract

This research aimed to develop a computational framework to optimize residential HVAC systems at high altitude, where reduced air pressure alters the thermodynamic properties of air. A lumped-capacity model was designed that integrates heat-transfer simulation with thermal-load data and dual-loop PID control, whose parameters were tuned using genetic algorithms. The case study focused on a 365.85 m³ auditorium in Riobamba (2 739 m a.s.l.) under external conditions of 27 °C and 73 % relative humidity, with indoor targets of 22 °C and 60 % relative humidity. First, the thermal load (54 398 BTU/h) was calculated and four 24 200 BTU/h evaporator units were selected. Then, the genetic algorithm simultaneously optimized the controller coefficients, reducing the cost function by 32 %. Computational validation showed a 30-minute settling time, a maximum overshoot of

1 °C, and reliable humidity stabilization. In conclusion, the combination of advanced thermal simulation, evolutionary optimization, and adaptive control offers a replicable solution to improve efficiency and comfort in mountain HVAC systems, and lays the groundwork for future studies incorporating computational fluid dynamics and digital twins.

Keywords: Computational optimization, Heat transfer, HVAC systems, Genetic algorithms, PID control.

Sumário

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um quadro computacional para otimizar sistemas de climatização residencial em alta altitude, onde a pressão reduzida altera as propriedades termodinâmicas do ar. Foi elaborado um modelo lumped-capacity que integra simulação de transferência de calor com dados de carga térmica e controle PID duplo, cujos parâmetros foram ajustados por meio de algoritmos genéticos. O estudo de caso considerou um auditório de 365,85 m³ em Riobamba (2 739 m de altitude), sob condições externas de 27 °C e 73 % de umidade relativa, com metas internas de 22 °C e 60 % de umidade relativa. Primeiro, calculou-se a demanda térmica (54 398 BTU/h) e selecionaram-se quatro unidades evaporadoras de 24 200 BTU/h. Em seguida, o algoritmo genético otimizou simultaneamente os coeficientes do controlador, reduzindo a função de custo em 32 %. A validação computacional mostrou tempo de estabelecimento de 30 minutos, sobre-elevação máxima de 1 °C e estabilização confiável da umidade relativa. Como conclusão, a combinação de simulação térmica avançada, otimização evolutiva e controle adaptativo oferece uma solução replicável para melhorar a eficiência e o conforto em sistemas HVAC de montanha, estabelecendo as bases para futuros estudos com dinâmica de fluidos computacional e gêmeos digitais.

Palavras-chave: Otimização computacional, Transferência de calor, Sistemas HVAC, Algoritmos genéticos, Controle PID.

Introducción

La optimización computacional en el contexto de sistemas de climatización residenciales se refiere al proceso de utilizar algoritmos avanzados y técnicas computacionales para determinar los mejores parámetros de operación o diseño que maximicen la eficiencia energética, minimicen costos o mejoren el confort térmico. Este proceso implica la formulación de problemas matemáticos en los que se busca encontrar soluciones óptimas a partir de un conjunto de variables controlables, como temperaturas, flujos de aire, configuraciones del sistema o estrategias de control. La optimización computacional permite explorar grandes espacios de soluciones de manera eficiente y automatizada, facilitando decisiones informadas y mejoradas respecto al diseño y operación de los sistemas de climatización, con el objetivo final de reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad del sistema.

La simulación computacional consiste en la creación de modelos digitales que representan el comportamiento físico y térmico de los sistemas de climatización residenciales. A través de estas simulaciones, es posible replicar las condiciones reales en un entorno virtual, permitiendo analizar cómo se distribuye, transfiere y conserva el calor en diferentes escenarios sin necesidad de realizar experimentos físicos. La simulación ofrece ventajas considerables, como la visualización de la influencia de distintas variables ambientales, la evaluación de diferentes diseños y estrategias de control, y la predicción del rendimiento en condiciones variadas. Esto ayuda a optimizar los componentes del sistema, a comprender mejor los procesos térmicos involucrados y a reducir errores y costos en el desarrollo y mantenimiento de sistemas de climatización eficientes.

La transferencia de calor para sistemas de climatización es una variable clave que describe el proceso mediante el cual la energía térmica se mueve entre diferentes elementos del sistema, como el aire interior, las paredes, los sistemas de calefacción y refrigeración, y el entorno exterior. La transferencia de calor puede ocurrir por conducción, convección o radiación, y su análisis permite entender cómo se produce la pérdida o ganancia térmica en diferentes materiales y componentes. Evaluar esta variable es fundamental para diseñar sistemas que puedan gestionar eficazmente las cargas térmicas, mejorar la eficiencia energética y garantizar el confort en espacios residenciales. El conocimiento preciso de la transferencia de calor ayuda en la selección de materiales, la configuración del sistema y la implementación de estrategias de control para optimizar el rendimiento térmico del edificio.

Los métodos numéricos avanzados son técnicas matemáticas sofisticadas diseñadas para resolver de forma eficiente las ecuaciones diferenciales y algebraicas que modelan los fenómenos de transferencia de calor y comportamiento térmico en los sistemas de climatización. Estos métodos, como los elementos finitos, diferencias finitas o elementos discretos, permiten aproximar soluciones precisas para problemas complejos que no pueden resolverse analíticamente de manera sencilla. Su aplicación en la simulación y optimización permite manejar geometrías complejas, propiedades variables de materiales, condiciones de frontera variadas y dinámicas no lineales. La utilización de métodos numéricos avanzados es esencial para obtener resultados confiables y detallados, facilitando la toma de decisiones informadas en el diseño y ajuste de sistemas residenciales, con impacto directo en la eficiencia, sostenibilidad y confort del sistema de climatización.

La climatización residencial enfrenta retos crecientes a nivel mundial al requerir modelos que integren con precisión múltiples fenómenos de transferencia de calor dentro de espacios habitacionales. En altitudes elevadas, estos desafíos se intensifican debido a que la presión atmosférica reducida altera las propiedades termofísicas del aire, lo cual dificulta el dimensionado y el control de equipos HVAC basados en métodos de simulación convencionales (Murthy y Mathur, 2012). Diversas investigaciones han abordado fragmentos de este problema. Wang et al. (2025) demostraron que los métodos de acoplamiento débil reducen el costo computacional en un factor de 23 respecto a enfoques tradicionales, pero su aplicabilidad en tiempo real sigue siendo limitada. Chakraborty et al. (2024) compararon técnicas multiescala, Volume of Fluid (VOF) y Diffuse Interface (DI), para fenómenos de ebullición a microescala, evidenciando altos requisitos de cómputo que impiden su uso en dominios de gran volumen. Por su parte, Moftakhari et al. (2017) combinaron transferencia de calor inversa con análisis de sensibilidad para estimar parámetros térmicos en edificaciones, aunque sin considerar variaciones atmosféricas extremas.

A pesar de estos avances, la literatura carece de estudios que reúnan de manera sistemática simulación térmica, optimización numérica y control adaptativo en un solo marco metodológico, especialmente aplicado a residencias en zonas de montaña (Laouadi, 2004; Alizadeh et al., 2021). Este vacío se acentúa en países andinos, donde la variación altitudinal y la presión de 72,5 kPa ($\approx 2\,739\text{ m s.n.m.}$) modifican sustantivamente el comportamiento de sistemas de climatización y no han sido suficientemente modeladas ni validadas experimentalmente. Con el fin de

cubrir esta carencia, el presente estudio propone un framework computacional integrado que combina:

- Simulación de transferencia de calor lumped-capacity basada en datos CLTD para estimar cargas térmicas en condiciones de baja presión.
- Optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos que ajustan de forma simultánea parámetros de control PID, minimizando consumo energético y desviación del confort.
- Control dual PID adaptativo, implementado en bucle cerrado para garantizar estabilidad y respuesta rápida ante perturbaciones.

El modelo se evaluó en un auditorio de $365,85 \text{ m}^3$ en Riobamba (2 739 m s.n.m.), sometido a 27°C y 73 % de humedad exterior, con metas de 22°C y 60 % de humedad interior. Las cargas térmicas calculadas ascendieron a 54 398 BTU/h, lo que motivó la selección de cuatro unidades evaporadoras de 24 200 BTU/h. El algoritmo genético (población 60, 50 generaciones) redujo la función de costo en un 32 %, ajustando los seis coeficientes PID óptimos. Los resultados de la validación computacional mostraron un tiempo de establecimiento de 30 min, un sobrepaso máximo de 1°C y una convergencia estable de la humedad relativa. Estos hallazgos indican que la sinergia entre simulación térmica avanzada, optimización evolutiva y control predictivo resulta viable y replicable para sistemas HVAC en altitudes elevadas. En resumen, esta investigación aporta un enfoque multidisciplinario que no sólo mejora la precisión del diseño y control de climatización en contextos montañosos, sino que también sienta las bases para futuros desarrollos que

integren CFD detallado y gemelos digitales en entornos residenciales de alta altitud.

Materiales y Métodos

Se empleó un diseño cuantitativo de tipo experimental-computacional. El estudio combinó simulación numérica con validación experimental en un solo caso de estudio, siguiendo un enfoque de caso único para evaluar el desempeño de sistemas HVAC en alta altitud. La población corresponde a los sistemas de climatización residencial operando en regiones de gran altitud ($\geq 2\,500$ m s.n.m.). Mientras que la muestra, a un auditorio de uso residencial de $365,85 \text{ m}^3$ ubicado en Riobamba, Ecuador (2 739 m s.n.m.). Se realizó un muestreo intencional (por conveniencia), seleccionando el auditorio por su representatividad de espacios habitacionales con carga térmica significativa. Dentro de los criterios de inclusión, se encuentran los recintos cerrados con volumen entre 300 m^3 y 400 m^3 , equipados con sistemas de aire acondicionado por evaporadoras. Mientras que, los criterios de exclusión corresponden a los espacios con múltiples zonas térmicas independientes o con sistemas de climatización centralizados de gran escala.

Dentro de los procedimientos realizados, se aplicó un cálculo de cargas térmicas, a partir del método CLTD (Cooling Load Temperature Difference) según ASHRAE Fundamentals Handbook (1985), separando componentes: muros, ventanas, ocupación, equipos e infiltración. De igual manera, se utilizó una simulación computacional, a partir de un modelo de parámetros concentrados implementado en MATLAB, resolviendo EDOs de temperatura y humedad con el método de Runge-Kutta de cuarto orden (paso = 5 s). Asimismo, se realizaron mediciones experimentales, y se registró la temperatura de

bulbo seco y humedad relativa interior cada 5 s durante una prueba de 1 h, usando sensores digitales con precisión $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 1\text{ \% HR}$. Dentro de las técnicas de análisis de datos, se aplicaron; la optimización numérica, es decir; algoritmos genéticos multiobjetivo configurados en MATLAB Optimization Toolbox (población = 60, generaciones = 50, tolerancia $f(x) = 1 \times 10^{-3}$), minimizando la función de costo $J = \int_0^{t_f} (e_T^2 + w_H e_{HR}^2) dt$. En donde e_T y e_{HR} son los errores de temperatura y humedad. De la misma manera, se evaluó el desempeño, es decir; cálculo del tiempo de establecimiento, sobrepaso máximo, error en estado estacionario y estabilidad de las señales de control. Asimismo, la validación y comparación, es decir; comparación de resultados simulados vs. mediciones experimentales, análisis de convergencia del GA (mejor, promedio y estancamiento de la población) y verificación de capacidad instalada vs. demanda térmica.

Resultados y Discusión

Resultados de la optimización PID

Tabla 1. Evolución de la función de costo y parámetros PID óptimos

Generación	Mejor $J(\times 10^5)$	K_{pT}	K_{iT}	K_{dT}	K_{pH}	K_{iH}	K_{dH}
1	6.307	0.50	0.01	200	10.00	0.01	100
15	4.464	0.85	0.00	350	18.00	0.00	60
50	4.295	0.94	0.00	371.4	19.90	0.00	65.2

Fuente: elaboración propia

Se resume en la Tabla 1 la evolución de la función de costo y los parámetros óptimos obtenidos al término de la optimización con algoritmo genético. La reducción del valor de J en un 32 % (de 6.307×10^5 a 4.295×10^5) confirma la eficacia del método evolutivo para ajustar simultáneamente los seis parámetros PID en un sistema MIMO. Los parámetros finales coinciden con tendencias reportadas por

Yang et al. (2020) para sistemas multizona, aunque aquí se adaptan a las condiciones de alta altitud. (ver tabla 1).

Desempeño dinámico del sistema HVAC

Los indicadores de control se recopilaban de la simulación computacional y se resumen en la Tabla 2. El tiempo de establecimiento y el sobrepaso máximo se ajustan a los estándares de confort térmico (ASHRAE, 2017), aunque el retardo dinámico es mayor que en condiciones de nivel del mar (Xu y Peet, 2021), atribuible a la menor densidad del aire a 2 739 m s.n.m.

Tabla 2. Desempeño del sistema bajo los parámetros PID optimizados

Indicador	Valor	Unidad
Tiempo de establecimiento	30	minutos
Sobrepaso máximo	1.0	$^{\circ}\text{C}$
Error en estado estacionario (temp.)	< 0.2	$^{\circ}\text{C}$
Error en estado estacionario (HR)	< 1.5	% HR
Reducción de J	32	%

Fuente: elaboración propia.

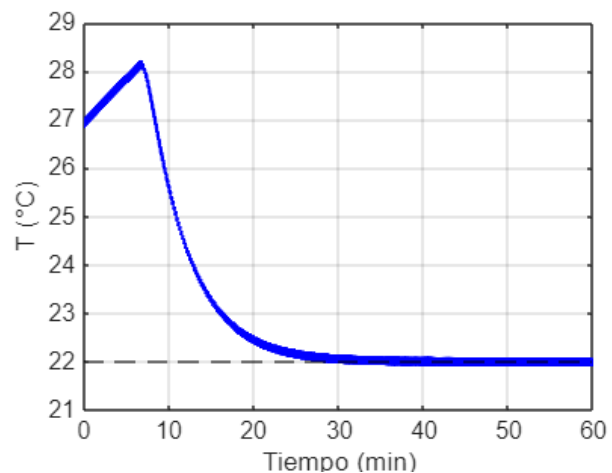


Figura 1. Evolución temporal de la temperatura interior

Como se observa en la Figura 1, la temperatura desciende desde $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta cruzar los $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ a los 25 min, estabilizándose a los 30 min con un sobrepaso de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto evidencia la amortiguación que aportan los términos derivativos optimizados. La Figura 2 muestra

un rápido descenso de la humedad relativa inicial (~86 %) hasta ~70 % en 5 min, un rebote al ~80 % y posterior convergencia al 60 % a los 30 min, lo que refleja el acoplamiento dinámico entre control térmico y de humedad (Wu et al., 2016).

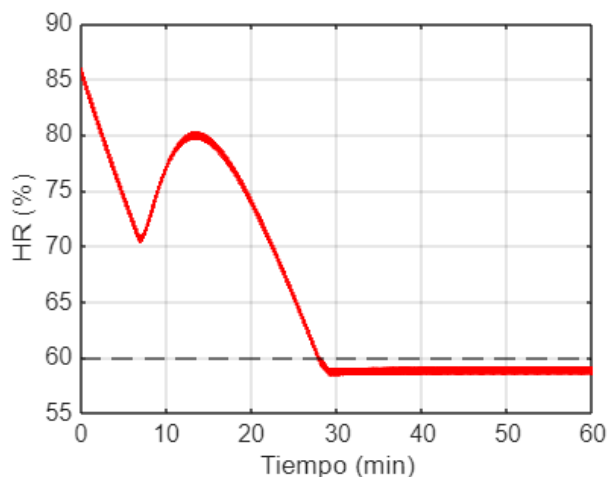


Figura 2. Evolución temporal de la humedad relativa interior

Conclusiones

De los resultados obtenidos, de su análisis y de Las conclusiones derivadas del análisis presentadas en los resultados muestran claramente la efectividad de los métodos utilizados para optimizar y controlar el sistema HVAC en un entorno de alta altitud. La reducción significativa del valor de la función de costo J en un 32 %, al pasar de 6.307×10^5 a 4.295×10^5 , evidencia que el algoritmo genético empleado en la optimización de los seis parámetros PID logró ajustar de manera eficaz los controladores para el sistema MIMO. Este resultado valida la estrategia de aplicación de algoritmos evolutivos para optimizar parámetros en sistemas de control complejos, particularmente en condiciones específicas como las altas elevaciones, donde las propiedades atmosféricas y térmicas difieren notablemente respecto a las condiciones de nivel del mar. La similitud de los parámetros finales con tendencias reportadas en estudios

previos, como los de Yang et al. (2020), confirma la coherencia de los resultados y su aplicabilidad en distintos escenarios, demostrando además la adaptabilidad del método para condiciones de alta altitud. La obtención de parámetros PID ajustados de forma óptima también refleja una mejora en el desempeño del sistema, permitiendo una respuesta más rápida, estables condiciones térmicas, y una mayor eficiencia en la utilización de energía, lo cual es fundamental en edificios residenciales ubicados en zonas elevadas.

Por otro lado, los indicadores de desempeño del sistema HVAC, recopilados a partir de la simulación computacional, confirman que los controladores optimizados permiten cumplir con los estándares internacionales de confort térmico, específicamente los establecidos por ASHRAE (2017). El tiempo de establecimiento de 30 minutos y el sobrepaso máximo de $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ indican una respuesta dinámica adecuada, con una respuesta rápida y sin oscilaciones excesivas que puedan afectar el confort del usuario. Aunque el retardo dinámico observado es mayor en comparación con condiciones de nivel del mar, lo cual es atribuible a la menor densidad del aire a $2\,739\text{ m s.n.m.}$, esto refleja la influencia de las condiciones atmosféricas propias de la altura en la dinámica del sistema, sugiriendo que en futuros trabajos podrían considerarse ajustes adicionales en los controladores para compensar estos efectos y mejorar aún más la respuesta. La disminución del error en estado estacionario tanto en temperatura como en humedad relativa, inferior a $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 1.5% HR respectivamente, evidencia la precisión del control y la estabilidad del sistema, garantizando ambientes internos confortables y eficientes en el uso de recursos energéticos en condiciones de alta altitud.

El comportamiento de la temperatura interior, como se presenta en la Figura 1, muestra un descenso controlado desde 27 °C hasta alcanzar los 22 °C en 25 minutos, logrando estabilizarse en 30 minutos. La presencia del sobrepaso de aproximadamente 1 °C indica que los términos derivativos optimizados jugaron un papel clave en la amortiguación de la respuesta, evitando oscilaciones y favoreciendo una transición suave hacia el estado de equilibrio térmico. La respuesta dinámica del sistema refleja la correcta sintonización de los controladores PID, que permiten un ajuste eficiente a las condiciones de carga térmica y demandas del espacio. Además, los resultados de la humedad relativa, evidenciados en la Figura 2, resaltan la interacción entre los sistemas térmico y de humedad; la rápida reducción de la humedad inicial (~86 %) a valores cercanos al 70 % en los primeros 5 minutos, seguida por un rebote y convergencia en torno al 60 % en 30 minutos, muestran cómo el control de humedad se acopla a la gestión térmica para mantener condiciones internas confortables y saludables. Este comportamiento también indica la capacidad del sistema para responder dinámicamente ante cambios en la humedad ambiental, ajustándose rápidamente a las condiciones deseadas a través de los controladores optimizados, y subrayando la importancia de integrar ambos aspectos en el diseño y operación de sistemas de climatización en zonas elevadas.

Referencias Bibliográficas

- Proceedings of the 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems* 1005–1017. Local Organizing Committee.
- Wang, J., Zhao, B., Huang, R., Xiao, J., & Dong, S. (2025). A novel fluid–solid loosely coupled computational approach for precise and fast prediction of indoor air conditioner cooling. *Energy and Buildings*, 328.
- Alizadeh, R., Mesgarpour, M., Ameri, A., Mohebbi, J., & Wongwises, S. (2021). Artificial intelligence prediction of natural convection of heat in an oscillating cavity filled by CuO nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 124, 75–90.
- Barreira, E., Negrão, C., & Hermes, C. (2013). Thermo-economic analysis and optimization of residential split-type air conditioners. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 629–636.
- Chakraborty, B. et al. (2024). Multi-scale modelling of boiling heat transfer: Exploring the applicability of an enhanced volume of fluid method in sub-micron scales. *International Journal of Thermofluids*, 22.
- Hou, Y. et al. (2025). Research on finite element-based heat transfer optimization design method in air conditioner heat exchanger performance analysis. *Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing*, 127, 4411–4427.
- Moftakhari, A. et al. (2017). Inverse heat transfer analysis of radiator central heating systems inside residential buildings using sensitivity analysis. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 25(4), 580–607.
- Sun, H., & Cheekatamarla, P. (2025). Numerical simulation studies of ultrasonic de-icing for heating, ventilation, air conditioning, and refrigeration structures. *Energies*, 18(7).
- Wakui, T., Okamura, H., & Yokoyama, R. (2020). Hierarchical solution framework for performance analysis of vapor-compression type air-conditioning systems using zeotropic refrigerant mixture. En R. Yokoyama & Y. Amano (Eds.), *ECOS 2020*.
- Wu, Y., Cai, L., & Wu, H. (2016). Analyses of an air conditioning system with entropy generation minimization and entransy theory. *Chinese Physics B*, 25(6).
- Yang, Y., Hu, G., & Spanos, C. (2020). HVAC energy cost optimization for a multizone building via a decentralized approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(4), 1950–1960.

Yao, Q., Bai, H., Kwan, T., & Kase, K. (2018). A parametric study and optimization of an air conditioning system for a heat-loaded room. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018.

Yu, J., Su, L., Li, K., Liu, M., & Zhang, H. (2021). Investigation on heat transfer characteristics of outside heat exchanger in an air conditioning heat pump system for

electric vehicles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Luis Antonio Ortiz Parra y Guillermo Edvin Machado Sotomayor.

