ISSN: 2806-5697
Vol. 7 – Núm. E2 / 2026

Eficiencia energética en sistemas de climatización de edificaciones comerciales

Energy Efficiency in HVAC Systems for Commercial Buildings

Eficiência energética em sistemas de climatização de edifícios comerciais

Simbaña-Aveiga, Edison Homero
Investigador Independiente
edison.simbana10@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-6773-3178

Herrera-Toscano, Marcos Alfredo
Investigador Independiente
marcos_herrera10@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0008-8309-2639

Gruezo-Realpe, Mariela Stephany
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas
mariela.gruezo.realpe@utelvt.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-5929-4336

Chamorro-Quiñónez, Joshelyn Germania
Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas
joshelin.chamorro.quinonez@utelvt.edu.ec
https://orcid.org/0000-0001-9015-035X

DOI / URL: https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/nE2/1729

Como citar:

Simbaña-Aveiga, E. H., Herrera-Toscano, M. A., Gruezo-Realpe, M. S., & Chamorro-Quiñónez, J. G. (2026). Eficiencia energética en sistemas de climatización de edificaciones comerciales. *Código Científico Revista De Investigación*, *7*(E2), 1969–1986.

Recibido: 17/08/2026 **Aceptado**: 13/09/2026 **Publicado**: 30/09/2026

Resumen
La climatización de edificaciones comerciales plantea el desafío de reducir el consumo energético y los costos sin comprometer el confort térmico ni la calidad del aire interior. El objetivo del estudio fue analizar los factores que condicionan su eficiencia energética y las estrategias empleadas para mejorarla. Se desarrolló una revisión bibliográfica con enfoque cualitativo, alcance exploratorio y diseño documental, mediante consultas en portales editoriales, repositorios institucionales y publicaciones especializadas. La información se examinó mediante lectura crítica, comparación temática y síntesis narrativa, diferenciando mediciones de campo y estimaciones simuladas. Los hallazgos indican que las mejoras de la envolvente y el dimensionamiento adecuado deben evaluarse conjuntamente, mientras que el mantenimiento y el diagnóstico de fallas permiten corregir desviaciones operativas. La automatización según ocupación y condiciones ambientales ofrece oportunidades de ahorro, condicionadas por la confiabilidad de los sensores y la integración tecnológica. Asimismo, la reducción de costos depende del consumo evitado y del desplazamiento de cargas, y una mayor ventilación puede incrementar la demanda energética. Se concluye que la eficiencia requiere intervenciones contextualizadas y evaluación conjunta de energía, costos y condiciones interiores. La heterogeneidad de los estudios limita la generalización de los ahorros y justifica evaluaciones longitudinales.

Palabras clave: eficiencia energética; climatización; edificaciones comerciales; control de ocupación; calidad del aire interior.

Abstract
Climate control in commercial buildings poses the challenge of reducing energy consumption and costs without compromising thermal comfort or indoor air quality. This study aimed to analyze the factors influencing energy efficiency and the strategies used to improve it. A qualitative, exploratory literature review with a documentary design was conducted through searches of publisher platforms, institutional repositories, and specialized publications. Information was examined through critical reading, thematic comparison, and narrative synthesis, distinguishing field measurements from simulation estimates. The findings indicate that building envelope improvements and appropriate equipment sizing should be assessed jointly, while maintenance and fault diagnosis help correct operational deviations. Automation based on occupancy and environmental conditions offers energy-saving opportunities, depending on sensor reliability and technological integration. Furthermore, cost reductions depend on avoided consumption and load shifting, while increased ventilation may raise energy demand. The study concludes that efficiency requires context-specific interventions and a combined assessment of energy use, costs, and indoor conditions. The heterogeneity of the studies limits the generalizability of energy savings and warrants longitudinal evaluations.
Keywords: energy efficiency; climate control; commercial buildings; occupancy-based control; indoor air quality.

Resumo
A climatização de edifícios comerciais apresenta o desafio de reduzir o consumo energético e os custos sem comprometer o conforto térmico nem a qualidade do ar interior. O objetivo do estudo foi analisar os fatores que condicionam sua eficiência energética e as estratégias empregadas para melhorá-la. Desenvolveu-se uma revisão bibliográfica com abordagem qualitativa, caráter exploratório e delineamento documental, mediante consultas a plataformas editoriais, repositórios institucionais e publicações especializadas. As informações foram

examinadas por meio de leitura crítica, comparação temática e síntese narrativa, diferenciando medições de campo e estimativas simuladas. Os resultados indicam que as melhorias da envoltória e o dimensionamento adequado devem ser avaliados conjuntamente, enquanto a manutenção e o diagnóstico de falhas permitem corrigir desvios operacionais. A automação conforme a ocupação e as condições ambientais oferece oportunidades de economia, condicionadas pela confiabilidade dos sensores e pela integração tecnológica. Além disso, a redução dos custos depende do consumo evitado e do deslocamento de cargas, e uma maior ventilação pode aumentar a demanda energética. Conclui-se que a eficiência exige intervenções contextualizadas e avaliação conjunta de energia, custos e condições interiores. A heterogeneidade dos estudos limita a generalização das economias e justifica avaliações longitudinais.
Palavras-chave: eficiência energética; climatização; edifícios comerciais; controle baseado na ocupação; qualidade do ar interior.

Introducción

La eficiencia energética en sistemas de climatización de edificaciones comerciales constituye un desafío para reducir el consumo energético sin deteriorar las condiciones ambientales interiores. Oficinas, establecimientos comerciales y hoteles requieren servicios de calefacción, ventilación y aire acondicionado, cuyos perfiles de funcionamiento dependen de sus actividades y ocupantes. La International Energy Agency (2025) señala que los edificios representan aproximadamente el 30 % de la demanda energética mundial. Este panorama plantea la necesidad de comprender cómo disminuir el gasto asociado a la climatización mediante decisiones que articulen diseño, tecnología y operación.

El problema responde a la interacción entre características constructivas y decisiones técnicas. El aislamiento, la protección solar y las propiedades de la envolvente condicionan las necesidades de climatización, por lo que las intervenciones sobre los equipos deben relacionarse con el comportamiento térmico del edificio (Simpeh et al., 2022). Asimismo, el dimensionamiento requiere atención: Woradechjumroen et al. (2014), mediante mediciones en doce establecimientos comerciales, analizaron el sobredimensionamiento de unidades de climatización y sus penalizaciones energéticas. Estos antecedentes muestran que instalar mayor

capacidad no garantiza un funcionamiento eficiente ni una correspondencia adecuada entre las cargas térmicas y la respuesta del sistema.

Durante la operación, las fallas mecánicas, los sensores descalibrados y las secuencias de control inadecuadas introducen consumos evitables. Crowe et al. (2023) analizaron información de más de 60.000 equipos y encontraron que, en un día determinado, el 40 % de las unidades de tratamiento de aire y el 30 % de las unidades terminales presentaban alguna falla reportada. Estas proporciones corresponden a su conjunto de datos, pero evidencian la relevancia del diagnóstico continuo. Por tanto, la eficiencia también depende de identificar anomalías, priorizar correcciones y comprobar que los ajustes produzcan mejoras sostenidas en condiciones reales.

Otro factor determinante es la variabilidad de la ocupación. Los horarios fijos y las consignas uniformes pueden mantener servicios de climatización cuando las necesidades de los usuarios han cambiado. Huang et al. (2024), en una revisión de 209 estudios, identificaron diferencias entre tipos de edificaciones comerciales según el número y la predictibilidad de sus ocupantes. Sus hallazgos respaldan estrategias de control centradas en las personas, capaces de ajustar el funcionamiento a demandas específicas. Sin embargo, su implementación enfrenta dificultades relacionadas con la selección de sensores, la disponibilidad de datos y la evaluación del desempeño.

Las afectaciones del problema comprenden dimensiones energéticas, económicas y ambientales interiores. Una intervención centrada exclusivamente en reducir consumos puede desatender la ventilación o el confort, mientras que aumentar indiscriminadamente el aire exterior puede elevar las necesidades de acondicionamiento. D'Agostino et al. (2024), mediante simulación dinámica validada con facturas energéticas de un edificio de oficinas, observaron incrementos de consumo y costos al ampliar la renovación de aire. También identificaron que las mejoras de la envolvente podían moderarlos. En consecuencia, evaluar la

eficiencia exige considerar conjuntamente energía, condiciones interiores y características del inmueble.

La revisión bibliográfica se justifica por la necesidad de integrar evidencias que orienten la selección de medidas aplicables a edificaciones comerciales. Las alternativas abarcan ajustes operativos, diagnóstico de fallas, mejoras constructivas y control avanzado, con exigencias técnicas y económicas diferentes. Zanetti et al. (2025) mostraron, en un edificio de oficinas, el potencial del control predictivo para desplazar demanda y reducir costos bajo distintos escenarios tarifarios. No obstante, señalaron dificultades para justificar su implementación en cada edificio. Esta evidencia permite distinguir entre ahorro energético, reducción de demanda máxima y ahorro económico, evitando interpretarlos como resultados equivalentes.

La viabilidad del estudio se sustenta en la disponibilidad de investigaciones verificables mediante DOI, publicaciones editoriales y repositorios institucionales. Su análisis permite comparar intervenciones sin requerir instalaciones experimentales propias, aunque exige examinar las condiciones y limitaciones de cada investigación. Abuimara et al. (2022) proponen una secuencia que integra mejora de metadatos, corrección de fallas, control centrado en ocupantes y seguimiento de indicadores. Esta perspectiva facilita organizar la evidencia y relacionar los beneficios reportados con los recursos necesarios. Así, la revisión puede aportar criterios para priorizar acciones y reconocer oportunidades de mejora en edificios existentes.

Por ello, el objetivo de este artículo es analizar, mediante una revisión bibliográfica, los factores que condicionan la eficiencia energética de los sistemas de climatización en edificaciones comerciales y las estrategias empleadas para mejorarla. Se examinarán las relaciones entre envolvente, dimensionamiento, mantenimiento, ocupación y control, considerando sus efectos sobre el consumo, los costos y las condiciones ambientales interiores. La comparación considerará el clima, la tipología comercial y la duración de las evaluaciones

disponibles. La síntesis permitirá identificar coincidencias, limitaciones y criterios de aplicación que apoyen decisiones técnicas fundamentadas y señalen necesidades de investigación.

Metodología

El estudio se desarrolló con un enfoque cualitativo, alcance exploratorio y diseño documental, mediante una revisión bibliográfica sobre la eficiencia energética de los sistemas de climatización en edificaciones comerciales. Este abordaje permitió examinar conocimientos, factores condicionantes y estrategias de mejora a partir de investigaciones publicadas y documentos técnicos especializados. La revisión se orientó a comprender las relaciones entre las características de los edificios, el funcionamiento de los equipos y las decisiones operativas, considerando sus implicaciones sobre el consumo energético, los costos y las condiciones ambientales interiores.

La búsqueda de información se realizó en internet mediante la consulta de portales editoriales, repositorios institucionales y publicaciones de organismos especializados en energía y edificaciones. Se emplearon términos como “commercial buildings”, “HVAC energy efficiency”, “occupant-centric control”, “model predictive control” y “HVAC faults”, combinados según los componentes examinados. Se priorizaron publicaciones recientes, sin excluir estudios anteriores que aportaran evidencia relevante para comprender problemas de diseño y operación. Para verificar las fuentes, se revisaron los datos de autoría, año de publicación, procedencia editorial y disponibilidad de DOI o enlaces institucionales.

La selección consideró artículos científicos, revisiones bibliográficas e informes técnicos relacionados directamente con la climatización de oficinas, establecimientos comerciales y otras edificaciones con usos comparables. Se valoraron la pertinencia temática, la claridad de los procedimientos descritos y la identificación de las condiciones en las que se

obtuvieron los resultados. Se excluyeron contenidos comerciales sin respaldo técnico, documentos con información insuficiente para verificar su procedencia y publicaciones cuya relación con el objeto de estudio fuera marginal. Las fuentes localizadas en diferentes plataformas se reconocieron como un mismo documento para evitar duplicidades.

El análisis se efectuó mediante lectura crítica y comparación temática de la información disponible. Se consideraron cinco ejes: envolvente y cargas térmicas, dimensionamiento de equipos, mantenimiento y diagnóstico de fallas, ocupación y condiciones interiores, y estrategias de control. Los resultados se interpretaron atendiendo al tipo de edificio, contexto climático, características del sistema y modalidad de evaluación, diferenciando las mediciones de campo de las estimaciones obtenidas mediante simulación. Finalmente, se realizó una síntesis narrativa para identificar coincidencias, limitaciones y criterios de aplicación, procurando que los beneficios reportados conservaran su relación con las condiciones específicas de cada investigación.

Resultados

Factores y estrategias para mejorar la eficiencia energética de la climatización en edificaciones comerciales

Envolvente térmica y dimensionamiento de los sistemas de climatización

La envolvente térmica determina el intercambio de calor entre el edificio y su entorno, condicionando las cargas que debe compensar la climatización. Las propiedades de muros, cubiertas y acristalamientos, junto con la proporción de superficie vidriada, intervienen en la demanda y en la selección de equipos. Cui et al. (2024) integraron simulaciones en EnergyPlus y optimización multiobjetivo para evaluar conjuntamente envolvente y sistemas de climatización en una oficina de Chongqing. Obtuvieron reducciones anuales simuladas del consumo del 17,30 %, 23,05 % y 21,10 %, correspondientes, respectivamente, al modelo de

cargas ideales, a fan coils de cuatro tubos y a flujo variable de refrigerante. Estos resultados respaldan la evaluación de paquetes de rehabilitación que articulen consumo, inversión e incomodidad térmica, dado que el desempeño de una medida depende de su interacción con los demás componentes del edificio.

El dimensionamiento constituye otro determinante del desempeño energético. La acumulación de márgenes de seguridad en el cálculo de cargas puede producir capacidades instaladas superiores a las necesidades efectivas, especialmente en equipos con regulación por encendido y apagado. Woradechjumroen et al. (2014) examinaron unidades instaladas en doce establecimientos comerciales y desarrollaron un procedimiento para identificar niveles de sobredimensionamiento y penalizaciones energéticas mediante registros de funcionamiento. Su investigación muestra la utilidad de contrastar las estimaciones de diseño con el comportamiento operacional. Por ello, la selección debe considerar la carga de diseño, la frecuencia de operación a carga parcial y las posibilidades de regulación del equipo.

La optimización conjunta permite incorporar esa interdependencia al proceso de rehabilitación. Delač et al. (2022), al estudiar un hotel mediterráneo, vincularon las mejoras de la envolvente con el dimensionamiento de componentes y la selección de productos comerciales, considerando consumo de energía primaria y costo global. Encontraron que las soluciones óptimas dependían de la correspondencia entre capacidad y carga de diseño, así como del régimen de funcionamiento del establecimiento. De esta evidencia se desprende que, cuando una intervención modifica las necesidades térmicas, resulta pertinente recalcular la capacidad requerida antes de renovar la climatización. La solución técnicamente adecuada debe conciliar demanda, eficiencia a carga parcial y costos durante el horizonte de evaluación.

Mantenimiento y diagnóstico de fallas para reducir consumos energéticos

La degradación operacional puede comprometer la eficiencia incluso cuando el sistema fue diseñado correctamente. Las desviaciones de calibración, los actuadores defectuosos y las

secuencias de control inconsistentes alteran la respuesta de los equipos. Crowe et al. (2023) analizaron registros correspondientes a más de 60.000 componentes de climatización y más de noventa tipos de fallas. En su conjunto de datos, aproximadamente el 40 % de las unidades de tratamiento de aire y el 30 % de las unidades terminales registraban alguna falla en un día determinado. Estas cifras describen fallas reportadas por herramientas de diagnóstico y evidencian oportunidades de intervención; no cuantifican, por sí solas, la energía desperdiciada por cada anomalía.

Las herramientas de detección y diagnóstico de fallas, conocidas como FDD, permiten identificar desviaciones y orientar acciones correctivas. Lin et al. (2020) documentaron una mediana de ahorro energético del 8 % en veintiséis organizaciones que utilizaban estas herramientas en 550 edificios. Entre las medidas identificadas figuraban ajustes de horarios, correcciones de consignas y reducción de calefacción y refrigeración simultáneas. Sin embargo, los autores precisaron que los ahorros correspondían a programas de gestión con múltiples intervenciones y no podían atribuirse exclusivamente al software. Este hallazgo indica que el valor del diagnóstico depende de su incorporación a un proceso de mantenimiento que asigne responsables, ejecute correcciones y verifique sus efectos sobre la operación.

La calidad de los datos constituye una condición para sostener ese proceso. Abuimara et al. (2022) identificaron dependencias entre los metadatos, el diagnóstico de fallas, los controles centrados en ocupantes y el seguimiento de indicadores. Propusieron mejorar primero la información que describe los puntos de medición, corregir después las anomalías y posteriormente implementar controles adaptativos. Esta secuencia favorece la trazabilidad de las intervenciones y reduce el riesgo de interpretar registros erróneos como cambios reales del desempeño. Como resultado de la síntesis, el mantenimiento puede entenderse como una gestión continua de la integridad funcional del sistema, articulada con la supervisión de sensores, actuadores y programas de control.

Automatización y control de la climatización según la ocupación y las condiciones ambientales

La automatización permite ajustar los servicios de climatización a necesidades que varían temporal y espacialmente. El control centrado en los ocupantes utiliza información sobre presencia, cantidad de personas o requerimientos ambientales para modificar la operación. Huang et al. (2024), mediante una revisión de 209 estudios, clasificaron las aplicaciones según el número y la predictibilidad de los ocupantes. Su análisis mostró que las estrategias debían diferenciarse entre espacios individuales, recintos con horarios previsibles y áreas de gran capacidad. Esto implica que la resolución de los sensores, la zonificación y la selección de variables de control deben guardar correspondencia con la dinámica de uso, evitando trasladar una misma configuración a tipologías comerciales heterogéneas.

La evidencia longitudinal aporta información sobre su desempeño en condiciones reales. Pang et al. (2026) desarrollaron un ensayo de trece meses en un edificio de oficinas del sur de Estados Unidos, integrando sensores de conteo y presencia con el sistema de automatización. El estudio reportó reducciones del consumo energético del 55,47 % durante fines de semana y feriados y del 43,48 % en días laborables, sin comprometer las condiciones interiores evaluadas. También observó mayores errores de conteo en situaciones de elevada ocupación. Estos resultados muestran que el beneficio operativo y la confiabilidad de la detección deben analizarse conjuntamente, especialmente cuando la información de ocupación determina los ajustes de temperatura y ventilación.

El control predictivo basado en modelos, o MPC, amplía esta capacidad mediante la anticipación del comportamiento del edificio y la optimización de decisiones futuras. Blum et al. (2022) implementaron esta estrategia en una oficina y obtuvieron aproximadamente un 40 % de ahorro de energía de climatización frente al control existente durante un ensayo de dos meses. La implementación también reveló que la recopilación de datos y el despliegue del

controlador podían exigir esfuerzos comparables a la construcción del modelo. Por tanto, su viabilidad depende de integrar predicción, instrumentación confiable y compatibilidad con la infraestructura de automatización. El porcentaje observado corresponde al periodo y sistema ensayados, por lo que su transferencia requiere validación en cada contexto.

Evaluación de las mejoras en consumo energético, costos, confort térmico y calidad del aire interior

La evaluación del ahorro requiere estimar el consumo que habría ocurrido sin la intervención bajo condiciones comparables. Granderson et al. (2015) examinaron modelos de línea base con datos de cuatrocientos edificios comerciales y analizaron la precisión de sus predicciones. Su trabajo respalda el uso de registros temporales y temperatura exterior para caracterizar el comportamiento energético y cuantificar la incertidumbre. En consecuencia, la comparación debe identificar el periodo de referencia, el ámbito medido y los cambios de funcionamiento que puedan afectar los resultados. Los indicadores de consumo absoluto, consumo por superficie y demanda máxima aportan información complementaria, siempre que se expliciten sus unidades, condiciones de cálculo y límites de medición.

La dimensión económica comprende la inversión y los recursos necesarios para mantener las mejoras. Crowe et al. (2020), en un metaanálisis de proyectos de puesta a punto funcional de edificios norteamericanos, encontraron medianas de ahorro de energía primaria del 5 %, 9 % y 14 %, según el mecanismo de ejecución. Para edificios existentes, el periodo simple de recuperación presentó una mediana de 1,7 años. Estos valores constituyen referencias empíricas condicionadas por las características de los proyectos. Su aplicación a otro establecimiento exige considerar las tarifas, los costos de intervención y seguimiento, y la persistencia de los ahorros, junto con beneficios operativos que no siempre quedan reflejados en la factura.

La calidad del aire introduce exigencias que deben incorporarse a la evaluación energética. D'Agostino et al. (2024), mediante simulación dinámica de un edificio de oficinas italiano validada con facturas, encontraron que aumentar la renovación de aire exterior podía incrementar sustancialmente el consumo y los costos. En las configuraciones estudiadas, el aumento alcanzó aproximadamente el 77 % respecto de la situación de referencia; al combinar la intervención con mejoras de aislamiento, se redujo al 25–30 %. El resultado evidencia una interacción entre ventilación y envolvente. Por ello, los beneficios de una estrategia deben examinarse conjuntamente con su capacidad de proporcionar condiciones interiores adecuadas, distinguiendo las estimaciones simuladas de las verificaciones posteriores en campo.

La valoración del confort también requiere incorporar la experiencia de los usuarios. Kong et al. (2022) realizaron un experimento comparativo con tres tecnologías de detección de ocupación y observaron ahorros energéticos semanales medios del 17–24 %, junto con niveles de satisfacción superiores al 80 % respecto del confort térmico y la calidad del aire percibida. La percepción de los ocupantes constituye una dimensión complementaria de evaluación, cuyo alcance debe distinguirse del de las mediciones ambientales. Estos hallazgos respaldan el seguimiento simultáneo del consumo y de las condiciones de uso, considerando que los resultados variaron con la precisión de los sensores y el ambiente exterior.

Finalmente, el ahorro energético y el económico responden a mecanismos relacionados, pero diferentes. Zanetti et al. (2025) evaluaron control predictivo en una oficina de Berkeley y estimaron ahorros anuales de energía cercanos al 45 % y de costos próximos al 61 % bajo el escenario tarifario más dinámico analizado. Las estimaciones procedieron de modelos construidos a partir de pruebas de campo realizadas en distintas estaciones. La diferencia económica adicional se relacionó con el desplazamiento de cargas fuera de periodos de precios elevados. La síntesis de estos resultados permite establecer que una evaluación consistente debe

identificar cuánto se ahorra, cuándo se consume y qué condiciones interiores se mantienen, evitando comparar porcentajes con denominadores o escenarios distintos.

Discusión

Los hallazgos de la revisión permiten interpretar la eficiencia energética de la climatización comercial como una propiedad emergente del acoplamiento entre envolvente, equipos, operación y ocupación. Esta perspectiva concuerda con Cui et al. (2024) y Delač et al. (2022), quienes incorporaron la interacción entre soluciones constructivas y sistemas de climatización a procesos de optimización multiobjetivo. Su convergencia sugiere que la rehabilitación debe evaluarse mediante configuraciones integradas, pues una reducción de las cargas térmicas modifica las capacidades requeridas y las condiciones de funcionamiento a carga parcial. Sin embargo, la solución óptima depende de los objetivos adoptados: minimizar consumo, costo global o incomodidad térmica puede conducir a configuraciones diferentes. Por ello, la eficiencia debe valorarse junto con las restricciones funcionales del establecimiento y las características climáticas de su emplazamiento.

La evidencia sobre fallas revela que una parte del potencial de mejora reside en recuperar el desempeño operacional previsto. Crowe et al. (2023) documentaron una elevada frecuencia de anomalías reportadas, mientras que Lin et al. (2020) identificaron ahorros asociados a programas que incorporaban diagnóstico automatizado. Ambas investigaciones son complementarias: la primera caracteriza oportunidades de intervención y la segunda examina resultados de gestión, sin establecer una equivalencia directa entre prevalencia de fallas y ahorro alcanzable. Asimismo, la coexistencia de múltiples medidas limita la atribución exclusiva de beneficios al software de diagnóstico. La secuencia propuesta por Abuimara et al. (2022) refuerza esta interpretación, al situar la integridad de los datos y la corrección de anomalías como condiciones previas para implementar controles avanzados. En consecuencia,

el mantenimiento adquiere una función estratégica que trasciende la reparación eventual y comprende la preservación verificable del rendimiento energético.

La automatización ofrece beneficios relevantes, aunque sus magnitudes deben interpretarse según el alcance de cada evaluación. El ahorro aproximado del 40 % registrado por Blum et al. (2022) corresponde a energía de climatización durante dos meses, mientras que Pang et al. (2026) analizaron controles basados en ocupación durante trece meses y diferenciaron sus resultados entre días laborables y fines de semana. Estas diferencias temporales y operativas impiden comparar los porcentajes como indicadores homogéneos de superioridad tecnológica. Además, los esfuerzos de integración señalados por Blum et al. y los errores de detección observados por Pang et al. muestran que la robustez del control depende de la infraestructura de medición, la interoperabilidad y la confiabilidad de las señales utilizadas. Por tanto, la sofisticación algorítmica debe acompañarse de capacidades técnicas que permitan supervisar, ajustar y sostener su funcionamiento.

La relación entre consumo y condiciones interiores constituye una tensión central de la optimización. D'Agostino et al. (2024) mostraron que aumentar la renovación de aire podía elevar la demanda energética, aunque las mejoras de la envolvente moderaban ese incremento. Por su parte, Kong et al. (2022) observaron ahorro y satisfacción de los ocupantes mediante control basado en presencia. La lectura conjunta sugiere que la conservación de condiciones interiores adecuadas puede articularse con la eficiencia cuando las intervenciones se coordinan. No obstante, la satisfacción y la calidad del aire percibida deben distinguirse de la verificación instrumental de contaminantes. Una evaluación integral requiere considerar ambas dimensiones y explicitar las restricciones ambientales bajo las cuales se obtienen los ahorros, para evitar que una reducción del consumo encubra un deterioro de las condiciones de habitabilidad.

La valoración económica también exige diferenciar los mecanismos que producen beneficios. Zanetti et al. (2025) estimaron ahorros energéticos cercanos al 45 % y económicos próximos al 61 % en el escenario tarifario más dinámico estudiado, evidenciando el efecto adicional del desplazamiento de cargas. Esta divergencia indica que la reducción de costos depende tanto del consumo evitado como del momento en que se utiliza la electricidad. En consecuencia, la flexibilidad de demanda constituye un componente de valor cuya pertinencia varía con la estructura tarifaria y las posibilidades de control. La adopción tecnológica exige ponderar esos beneficios frente a los recursos necesarios para su implementación, actualización y supervisión, evitando extrapolar rentabilidades entre establecimientos con condiciones económicas diferentes. Asimismo, los ahorros estimados mediante modelos deben distinguirse de los registrados directamente durante periodos completos de operación.

Desde el punto de vista metodológico, la heterogeneidad de tipologías, climas, periodos de observación y líneas base limita la generalización cuantitativa de esta revisión. Las simulaciones permiten explorar configuraciones, mientras que los ensayos de campo incorporan contingencias operativas; sus resultados deben interpretarse conforme a esos alcances. Granderson et al. (2015) destacan la relevancia de evaluar la precisión de los modelos de referencia y la incertidumbre de las estimaciones. Por ello, una disminución del consumo solo puede atribuirse razonablemente a una intervención cuando se consideran las condiciones de comparación y los cambios concomitantes, particularmente los relacionados con clima, horarios y ocupación. Adicionalmente, el carácter exploratorio de la selección documental impide asegurar exhaustividad y establecer un efecto agregado representativo de todas las edificaciones comerciales.

El aporte de la revisión consiste en articular criterios para seleccionar estrategias según las características del edificio y la capacidad de gestión disponible. De la evidencia examinada se desprende una ruta de intervención que vincula diagnóstico, adecuación de capacidades,

mejora del control y verificación del desempeño, cuya aplicación requiere evaluación contextual. Las diferencias entre patrones de ocupación identificadas por Huang et al. (2024) refuerzan la necesidad de evitar soluciones uniformes. La investigación futura debería ampliar las evaluaciones longitudinales en distintas tipologías y condiciones climáticas, documentar la persistencia del ahorro e incorporar costos de operación y mantenimiento, calidad ambiental y sensibilidad frente a errores de medición. Este enfoque permitiría fundamentar decisiones de rehabilitación y operación con mayor solidez empírica y pertinencia para el sector comercial.

Conclusión

La revisión bibliográfica permite concluir que la eficiencia energética de los sistemas de climatización en edificaciones comerciales depende de la articulación entre las características constructivas, el dimensionamiento de los equipos y las condiciones de operación. La intervención sobre la envolvente térmica puede reducir las cargas de climatización y favorecer una selección de capacidades acorde con las necesidades del inmueble. Por consiguiente, las decisiones de rehabilitación requieren considerar conjuntamente el comportamiento térmico del edificio y el desempeño de sus instalaciones, especialmente ante variaciones climáticas y patrones de uso.

El mantenimiento y el diagnóstico de fallas constituyen componentes determinantes para preservar el rendimiento energético durante la vida útil de los sistemas. La identificación oportuna de anomalías permite corregir desviaciones operativas que pueden incrementar el consumo y comprometer las condiciones interiores. A su vez, la automatización basada en ocupación y condiciones ambientales ofrece oportunidades para ajustar el funcionamiento a la demanda efectiva. Su aprovechamiento exige mediciones confiables, integración tecnológica y capacidad de supervisión, puesto que la disponibilidad de controles avanzados no garantiza, por sí sola, una operación eficiente.

La evaluación de las mejoras debe integrar consumo energético, costos, confort térmico y calidad del aire interior. Una disminución del gasto económico puede responder tanto al ahorro de electricidad como al desplazamiento de cargas hacia periodos tarifarios favorables; por ello, ambos efectos requieren valoración diferenciada. Asimismo, las estrategias de reducción del consumo deben mantener condiciones adecuadas de ventilación y habitabilidad. Esta perspectiva permite reconocer que el desempeño satisfactorio comprende beneficios energéticos y económicos compatibles con las necesidades de los ocupantes.

El carácter exploratorio de la revisión y la heterogeneidad de los estudios impiden establecer porcentajes universales de ahorro o jerarquizar las estrategias de manera definitiva. No obstante, la evidencia examinada respalda una intervención contextualizada que combine diagnóstico, adecuación de capacidades, mantenimiento, control y verificación de resultados. Se requieren evaluaciones longitudinales en diversas tipologías comerciales y condiciones climáticas para determinar la persistencia de los beneficios, los costos de implementación y las exigencias de gestión necesarias para sostenerlos.

Referencias bibliográficas

Abuimara, T., Hobson, B. W., Gunay, B., & O'Brien, W. (2022). A data-driven workflow to improve energy efficient operation of commercial buildings: A review with real-world examples. *Building Services Engineering Research and Technology, 43*(4), 517–534. https://doi.org/10.1177/01436244211069655

Blum, D., Wang, Z., Weyandt, C., Kim, D., Wetter, M., Hong, T., & Piette, M. A. (2022). Field demonstration and implementation analysis of model predictive control in an office HVAC system. *Applied Energy, 318*, Article 119104. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119104

Crowe, E., Chen, Y., Reeve, H., Yuill, D., Ebrahimifakhar, A., Chen, Y., Troup, L., Smith, A., & Granderson, J. (2023). Empirical analysis of the prevalence of HVAC faults in commercial buildings. *Science and Technology for the Built Environment, 29*(10), 1027–1038. https://doi.org/10.1080/23744731.2023.2263324

Crowe, E., Mills, E., Poeling, T., Curtin, C., Bjørnskov, D., Fischer, L., & Granderson, J. (2020). Building commissioning costs and savings across three decades and 1500 North American buildings. *Energy and Buildings, 227*, Article 110408. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110408

Cui, W., Liu, G., Wang, Y., & Li, K. (2024). Integrated optimization of the building envelope and the HVAC system in office building retrofitting. *Case Studies in Thermal Engineering, 62*, Article 105185. https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105185

D'Agostino, D., Minelli, F., Minichiello, F., & Musella, M. (2024). Improving the indoor air quality of office buildings in the post-pandemic era—Impact on energy consumption and costs. *Energies, 17*(4), Article 855. https://doi.org/10.3390/en17040855

Delač, B., Pavković, B., Lenić, K., & Mađerić, D. (2022). Integrated optimization of the building envelope and the HVAC system in nZEB refurbishment. *Applied Thermal Engineering, 211*, Article 118442. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118442

Granderson, J., Price, P. N., Jump, D. A., Addy, N. J., & Sohn, M. D. (2015). Automated measurement and verification: Performance of public domain whole-building electric baseline models. *Applied Energy, 144*, 106–113. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.026

Huang, G., Ng, S. T., Li, D., & Zhang, Y. (2024). State of the art review on the HVAC occupant-centric control in different commercial buildings. *Journal of Building Engineering, 96*, Article 110445. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110445

International Energy Agency. (2025). *Energy efficiency 2025*. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025

Kong, M., Dong, B., Zhang, R., & O'Neill, Z. (2022). HVAC energy savings, thermal comfort and air quality for occupant-centric control through a side-by-side experimental study. *Applied Energy, 306*, Article 117987. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117987

Lin, G., Kramer, H., & Granderson, J. (2020). Building fault detection and diagnostics: Achieved savings, and methods to evaluate algorithm performance. *Building and Environment, 168*, Article 106505. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106505

Pang, Z., Guo, M., O'Neill, Z., Smith-Cortez, B., Yang, Z., & Dong, B. (2026). A longitudinal field study of sensor-driven occupancy-centric HVAC controls in an office building. *Energy and Buildings, 351*, Article 116693. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116693

Simpeh, E. K., Pillay, J.-P. G., Ndihokubwayo, R., & Nalumu, D. J. (2022). Improving energy efficiency of HVAC systems in buildings: A review of best practices. *International Journal of Building Pathology and Adaptation, 40*(2), 165–182. https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2021-0019

Woradechjumroen, D., Yu, Y., Li, H., Yu, D., & Yang, H. (2014). Analysis of HVAC system oversizing in commercial buildings through field measurements. *Energy and Buildings, 69*, 131–143. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.015

Zanetti, E., Blum, D., Fu, H., Weyandt, C., Pritoni, M., & Piette, M. A. (2025). Commercial building HVAC demand flexibility with model predictive control: Field demonstration and literature insights. *Energy and Buildings, 345*, Article 116097. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116097