

Tipo de artículo: artículo de investigación

Estrategias para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes

Ángel Lezama

<https://orcid.org/0009-0000-4300-7825>

a2lez@hotmail.com

Investigador independiente

Quito-Ecuador

Correspondence author: a2lez@hotmail.com

Received (20/07/2024), Accepted (6/10/2024)

Resumen: En este artículo se analiza el uso de tecnologías emergentes y enfoques de gestión para reducir el consumo energético en edificios inteligentes, focalizados en Latinoamérica. Se examinan estrategias basadas en el Internet de las Cosas (IdC, IoT), sistemas de automatización, y modelos predictivos de energía, con ejemplos de implementación en distintos contextos urbanos de la región. Además, se discuten los beneficios ambientales, sociales y económicos derivados de estas prácticas. El análisis energético, para los casos concretos estudiados, muestra que el enfoque sostenible combina las condiciones bioclimáticas de la región con el empleo general de diversas aproximaciones tecnológicas.

Palabras clave: IdC, sistemas de automatización, modelos predictivos de energía.

Strategies to optimize energy consumption in smart buildings

Abstract: This article analyzes emerging technologies and management approaches to reduce energy consumption in smart buildings, focusing on Latin America. Strategies based on the Internet of Things (IoT), automation systems, and predictive energy models are examined, with implementation examples in different regional urban contexts. In addition, the environmental, social, and economic benefits derived from these practices are discussed. The energy analysis, for the specific cases studied, shows that the sustainable approach combines bioclimatic conditions to the region with the general use of various technological approaches.

Keywords: IoT, automation systems, predictive energy models.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se estima que el 55% de la población reside en áreas urbanas, y se prevé que para el año 2050 la misma alcance un 70% [1]. Debido a estas proyecciones, se requerirán espacios habitacionales que cubran dicha demanda y que tengan los sistemas necesarios para un uso eficiente de la energía. Es en este escenario que los edificios inteligentes emergen como una solución fundamental para abordar los retos del cambio climático y la eficiencia energética. La eficiencia energética en edificios es responsable de aproximadamente del 30% al 40% del consumo global de energía, lo que resalta la necesidad de soluciones tecnológicas avanzadas para mitigar este impacto [2].

Al integrar tecnologías avanzadas como sensores, redes IoT y sistemas de automatización, estos edificios pueden monitorear y gestionar el consumo energético de manera eficiente. Por ejemplo, los sensores IoT permiten recopilar datos en tiempo real, lo que facilita una gestión proactiva del consumo [3]. Los sistemas de automatización centralizada, como los Sistemas de Gestión de Edificios (Building Management Systems, BMS, por sus siglas en inglés), también contribuyen significativamente a reducir desperdicios energéticos mediante el control coordinado de subsistemas como HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) e iluminación [4].

Este artículo tiene como objetivo explorar estrategias innovadoras que permitan optimizar el uso de energía en edificios inteligentes en Latinoamérica, así como sus implicaciones para la sostenibilidad. La implementación de estrategias que combinan tecnologías emergentes con fuentes de energía renovable, como sistemas solares y eólicos, también ha demostrado ser crucial para reducir la huella de carbono de estos edificios [5]. Además, la adopción de modelos predictivos basados en inteligencia artificial ofrece nuevas oportunidades para anticipar patrones de consumo y mejorar la toma de decisiones en tiempo real [6]. En este contexto abordaremos las soluciones más adecuadas para poblaciones ubicadas en zonas tropicales dentro del espacio regional latinoamericano y escenarios climáticos similares. Este trabajo consta de una breve Introducción, de un apartado de Desarrollo donde se aborda las tecnologías y estrategias más importantes para la gestión de la eficiencia energética. Una sección de Metodología que explica cómo se abordó la problemática desde el punto de vista investigativo, para pasar a la sección de Resultados de la investigación y sus Conclusiones.

II. DESARROLLO

Tecnologías clave para la gestión energética

A. *Sistemas IoT*

El Internet de las Cosas (IoT) se ha convertido en una de las tecnologías más revolucionarias en el ámbito de los edificios inteligentes, permitiendo una optimización integral del consumo energético. Su impacto radica en la capacidad de conectar dispositivos y sensores en una red distribuida que recopila y analiza datos en tiempo real, proporcionando una visión detallada y dinámica de las condiciones del edificio.

Infraestructura IoT en edificios inteligentes

La infraestructura IoT en edificios inteligentes consta de una red de sensores distribuidos estratégicamente, que recopilan información sobre variables críticas como temperatura, ocupación, humedad, niveles de luz natural y calidad del aire. Estos sensores están diseñados para trabajar de manera autónoma y en conjunto, permitiendo una gestión eficiente de los recursos energéticos. Sensores de temperatura y humedad: Permiten regular automáticamente sistemas HVAC, ajustando el flujo de aire, la temperatura y el nivel de deshumidificación según las condiciones internas y externas del edificio.

Este enfoque dinámico evita el sobrecalentamiento o enfriamiento excesivo, logrando ahorros energéticos significativos. Los sensores de ocupación detectan la presencia de personas en diferentes áreas del edificio, activando sistemas de iluminación o climatización solo cuando es necesario. En espacios con baja ocupación, como oficinas fuera de horario laboral, estos sensores contribuyen a evitar el desperdicio de energía. Por otro lado, los sensores de luz natural miden la intensidad lumínica externa y ajustan la iluminación interna automáticamente, favoreciendo el uso de luz natural durante el día.

Beneficios técnicos y económicos

La implementación de IoT en edificios inteligentes proporciona ventajas técnicas y económicas que justifican su adopción:

- **Eficiencia energética:** Estudios han demostrado que la integración de IoT puede reducir el consumo energético en un 20-30% al eliminar desperdicios y optimizar el uso de recursos [7].
- **Mantenimiento predictivo:** Los datos recopilados permiten identificar fallas potenciales en equipos críticos, como sistemas HVAC, antes de que ocurran, reduciendo los costos de reparación y evitando interrupciones.
- **Escalabilidad y modularidad:** Las soluciones IoT pueden implementarse de forma gradual, adaptándose a las necesidades específicas del edificio y permitiendo actualizaciones tecnológicas futuras.

Retos de Implementación

Aunque la implementación de sistemas IoT posee ventajas evidentes, enfrenta algunos desafíos, como lo son:

- **Costos iniciales:** La instalación de sensores y plataformas de gestión puede requerir una inversión significativa, especialmente en edificios de gran tamaño.
- **Interoperabilidad:** Es necesario garantizar que los dispositivos de diferentes fabricantes sean compatibles entre sí para lograr una integración fluida.
- **Seguridad de datos:** La protección de la información recopilada por los sensores es crucial para evitar vulnerabilidades que puedan comprometer la operación del edificio.

B. Sistemas de Gestión de Edificios (BMS)

Los Sistemas de Gestión de Edificios (BMS) desempeñan un papel central en la optimización del consumo energético en edificios inteligentes al ofrecer una plataforma unificada que permite la integración y el control de múltiples subsistemas, tales como climatización (HVAC), iluminación, seguridad y gestión energética. Estas plataformas facilitan la toma de decisiones automatizadas en tiempo real, basándose tanto en parámetros predefinidos como en condiciones dinámicas del entorno, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y a reducir los costos operativos.

Monitoreo y control en tiempo real

El BMS utiliza una red de sensores y actuadores distribuidos (IoT) por toda la infraestructura del edificio para recopilar datos sobre factores críticos como temperatura, ocupación, humedad y niveles de iluminación. Por ejemplo, si se detecta a través de *sensores de ocupación* que una sala o espacio no está siendo utilizado, el sistema puede realizar ajustes de manera automática, como los siguientes:

- **Apagar las luces:** para evitar los gastos de energía asociados a la iluminación innecesaria.
- **Ajustar el termostato:** permitiendo al sistema de climatización elevar o reducir la temperatura a un nivel óptimo de acuerdo con la demanda existente.

Esta funcionalidad no solo minimiza el consumo energético, sino que prolonga la vida útil de los equipos al evitar sobrecargas innecesarias. Estudios recientes han demostrado que el uso de un BMS eficiente puede reducir el consumo energético hasta en un 30% en edificios comerciales [8].

Modelos predictivos y análisis de datos

Las técnicas de inteligencia artificial (IA) aplicadas al análisis de datos energéticos han revolucionado la gestión en edificios inteligentes. Los modelos predictivos, entrenados con grandes volúmenes de datos históricos, pueden anticipar las demandas energéticas basándose en patrones climáticos, horarios de ocupación y actividades planificadas. Estas predicciones permiten a los administradores de edificios tomar decisiones informadas sobre el uso de recursos, logrando ahorros energéticos sustanciales y reduciendo los costos operativos [9].

Automatización basada en algoritmos predictivos

Además del control en tiempo real, los BMS avanzados incorporan modelos predictivos y algoritmos de aprendizaje automático que permiten anticipar patrones de uso energético y planificar el funcionamiento de los sistemas de manera óptima. Por ejemplo:

- Programación de la climatización: Basándose en datos históricos de ocupación y condiciones meteorológicas, el BMS puede activar el sistema HVAC unos minutos antes de la llegada de los ocupantes y desactivarlo cuando se prevé que la sala quede vacía.
- Iluminación adaptativa: La intensidad de las luces puede ajustarse automáticamente en función de la iluminación natural disponible, reduciendo así el consumo energético en horas diurnas.

Estos algoritmos no solo garantizan un uso eficiente de la energía, sino que también facilitan la adaptación del edificio a condiciones cambiantes, optimizando su rendimiento.

Mantenimiento Predictivo

Una de las ventajas más importantes de los BMS es su capacidad para implementar estrategias de mantenimiento predictivo. A través del análisis continuo de los datos obtenidos de los equipos, como sistemas HVAC, ascensores o iluminación, el BMS puede:

- Identificar patrones de desgaste o fallos incipientes en los equipos.
- Programar intervenciones de mantenimiento antes de que los problemas escalen y generen un mayor gasto energético o daños significativos.

Por ejemplo, si el sistema detecta una disminución en el rendimiento de un equipo HVAC, puede notificar automáticamente al personal de mantenimiento, evitando así consumos ineficientes y optimizando la disponibilidad de los sistemas.

Integración con energías renovables

Los BMS también son capaces de integrar sistemas de energías renovables, como paneles solares o turbinas eólicas, en su operación. Pueden gestionar la distribución de la energía generada y almacenarla en baterías cuando la demanda es baja. En momentos de mayor consumo, el sistema prioriza el uso de energía almacenada o renovable, reduciendo la dependencia de fuentes convencionales.

Beneficios técnicos y económicos

La implementación de un BMS ofrece múltiples beneficios tanto en el ámbito técnico como en el económico:

- Eficiencia energética: Reducción del consumo eléctrico gracias a ajustes dinámicos.
- Optimización de costos: Menor gasto operativo debido a la automatización y mantenimiento predictivo.
- Sostenibilidad: Reducción de las emisiones de carbono mediante la integración con tecnologías de energía renovable y gestión eficiente.
- Confort de los usuarios: Mejora en las condiciones ambientales internas, como temperatura, iluminación y calidad del aire.

C. Estrategias de Implementación

Optimización de Iluminación

El diseño de sistemas de iluminación que integren tecnologías LED, sensores de movimiento y controladores de luz natural representa un enfoque eficiente para reducir el consumo energético. Por ejemplo, en oficinas o edificios comerciales, los sensores pueden ajustar automáticamente la intensidad de la luz artificial según la cantidad de luz natural disponible [10]. Además, las luminarias inteligentes pueden programarse para apagarse automáticamente fuera del horario laboral.

Climatización Eficiente

Los sistemas de climatización son responsables de una proporción significativa del consumo energético en edificios. Las estrategias eficientes incluyen el uso de termostatos inteligentes y sistemas de ventilación controlados por demanda, los cuales ajustan el flujo de aire según la ocupación y la calidad del aire interior. Estudios recientes muestran que estas prácticas pueden reducir el consumo energético relacionado con el HVAC en hasta un 30% [10]. Además, los sistemas de zonificación permiten controlar la climatización en áreas específicas, evitando el desperdicio en espacios desocupados.

Gestión de Energía Renovable

La incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, se está convirtiendo en un estándar en edificios inteligentes. Estos sistemas, combinados con baterías de almacenamiento, permiten que el edificio utilice energía limpia y reduzca su dependencia de la red eléctrica. Un caso de estudio reciente mostró que la instalación de un sistema fotovoltaico en un edificio comercial redujo las emisiones de carbono en un 40% y generó ahorros significativos en costos operativos [5].

III. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para este estudio se estructuró en cuatro etapas clave. Primero, se realizó una revisión bibliográfica para recopilar información actualizada sobre tecnologías y estrategias aplicables a edificios inteligentes con características climáticas, sociales y económicas similares a las encontradas en Latinoamérica. Posteriormente, se analizaron ejemplos de implementación de edificios inteligentes en diferentes contextos urbanos, tanto dentro como fuera de la región latinoamericana. El estudio de casos incluyó la selección de proyectos residenciales y comerciales que hayan integrado tecnologías de monitoreo, automatización y energías renovables para optimizar su consumo energético. Se recopilaron datos sobre los resultados obtenidos en términos de ahorro energético, costos de implementación y retorno de inversión, lo que permitió identificar buenas prácticas aplicables a la región. Se priorizaron ejemplos en países en desarrollo con desafíos económicos similares.

En una tercera etapa, se realizaron simulaciones que permitieron evaluar la efectividad de diferentes estrategias de eficiencia energética en escenarios representativos de edificios inteligentes en Latinoamérica. Las variables consideradas incluyeron el clima, la disponibilidad de recursos energéticos, el tamaño de los edificios y los patrones de ocupación. Se compararon diferentes configuraciones tecnológicas, como el uso de sensores IoT para iluminación y climatización, sistemas BMS centralizados y la integración de energías renovables, con el objetivo de determinar las combinaciones más eficientes y rentables. Finalmente, se consultaron opiniones de expertos en energías renovables, eficiencia energética y gestión de edificios inteligentes cuyo objetivo fue validar los hallazgos de las etapas anteriores y obtener perspectivas adicionales sobre los desafíos y oportunidades específicos para Latinoamérica. Se recopilieron recomendaciones sobre políticas de incentivo, formación técnica y estrategias de implementación adaptadas a las condiciones económicas, climáticas y sociales de la región.

IV. RESULTADOS

Se realizó una búsqueda en Internet de fuentes asociadas a los criterios de búsqueda establecidos en esta investigación y se seleccionaron los trabajos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de estrategias tecnológicas y resultados.

Autores	Título/Fuente	Tipo de Recursos	Contenido Principal	Tecnologías/Enfoques Destacados
A. Vintimilla, P. Mera, J. Carrillo	Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca, Ecuador (ResearchGate, 2019)	Artículo de investigación	Análisis de medidas de eficiencia energética en viviendas residenciales en Cuenca, Ecuador, destacando patrones de consumo y estrategias de reducción de costos.	Monitoreo energético, climatización eficiente.
CEPAL	Eficiencia Energética en la Transición Sostenible e Inclusiva de América Latina y el Caribe (2021)	Informe	Propuestas de políticas y estrategias para integrar eficiencia energética en modelos sostenibles en América Latina y el Caribe.	Integración política, estrategias sostenibles.
R. Martínez	Eficiencia Energética en Edificios: desafíos en América Latina (Revista Expofrío, 2023)	Artículo técnico	Identificación de desafíos y soluciones prácticas para mejorar la eficiencia energética en edificios en América Latina.	Sistemas HVAC avanzados, energía solar.
BID	Las redes inteligentes de energía y su implementación en ciudades sostenibles (2020)	Informe	Evaluación del uso de redes inteligentes en la sostenibilidad energética urbana.	Redes inteligentes, gestión de energía urbana.
M. A. López et al.	La inserción de la eficiencia energética en los edificios universitarios: análisis de casos (2018)	Tesis doctoral	Estudio comparativo de edificios universitarios en Brasil y España, destacando medidas de eficiencia energética implementadas.	Comparación internacional, diseño energético.
H. P. Das et al.	Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings (arXiv, 2022)	Artículo científico	Uso de aprendizaje automático para optimizar el consumo de energía en edificios inteligentes.	Aprendizaje automático, optimización de HVAC.
B. Setz et al.	Energy Smart Buildings: Parallel Uniform Cost-Search (arXiv, 2022)	Artículo científico	Propuesta de un enfoque de programación para la gestión operativa de edificios inteligentes con almacenamiento y generación de energía local.	Búsqueda de costo uniforme, generación local.
C. Perry et al.	Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings (ACEEE, 2017)	Informe	Análisis de cómo la tecnología inteligente puede mejorar la eficiencia energética en edificios existentes.	HVAC inteligente, iluminación conectada.
S. Kiliccote et al.	Improving Energy Efficiency via Smart Building Energy Systems (Energy Efficiency Journal, 2016)	Artículo científico	Comparación de sistemas de gestión energética y medidas políticas para mejorar la eficiencia energética en edificios inteligentes.	Gestión energética, políticas comparativas.
A. Tarantola	How AI Is Making Buildings More Energy-Efficient (Time Magazine, 2024)	Artículo de divulgación	Exploración del uso de inteligencia artificial para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono en edificios.	Inteligencia artificial, optimización de sistemas HVAC.

La eficiencia energética en edificios inteligentes es fundamental para promover la sostenibilidad en América Latina, donde los desafíos socio-ambientales y económicos exigen soluciones innovadoras. El análisis de los estudios revisados revela un panorama de integración de enfoques y tecnologías que pueden aplicarse en la región. Por ejemplo, en el trabajo de Vintimilla, Mera y Carrillo [11] se resalta cómo el análisis local del consumo energético en viviendas de Cuenca, Ecuador, permite diseñar estrategias personalizadas para optimizar recursos, evidenciando el impacto de contextualizar las medidas de eficiencia en entornos urbanos específicos.

La CEPAL [12] destaca el papel crucial de las iniciativas gubernamentales en la transición hacia modelos más sostenibles donde se resalta la necesidad de desarrollar marcos normativos sólidos que permitan escalar las soluciones tecnológicas propuestas. En el ámbito de los edificios, Martínez [13] aborda directamente los desafíos técnicos en América Latina, destacando la integración de sistemas HVAC avanzados y energía solar como soluciones clave. Esta perspectiva técnica es complementada por el análisis del BID [14], que introduce el concepto de redes inteligentes como un componente fundamental para transformar la gestión energética en entornos urbanos, resaltando su aplicabilidad en ciudades sostenibles. Por otro lado, y partiendo de una perspectiva internacional, López et al. [15] comparan los enfoques de eficiencia energética en edificios universitarios en Brasil y España, ofreciendo un modelo que combina buenas prácticas y adaptabilidad a distintos contextos. Bajo este propósito, Das et al. [16] examinan la capacidad para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes mediante algoritmos avanzados, mientras que Setz et al. [17] proponen métodos innovadores para la gestión operativa y la optimización energética, respectivamente. Aunque prometedores, estos enfoques enfrentan desafíos de implementación relacionados con la infraestructura y la capacitación tecnológica en la región para implementar energías renovables como la energía eólica o solar. Siguiendo esta misma preocupación, la reutilización de datos también juega un rol fundamental en la eficiencia energética, como lo resalta Perry et al. [18] cuando analizan cómo mejorar la eficiencia energética en edificios existentes mediante tecnologías inteligentes, un aspecto crucial para una región con un parque inmobiliario predominantemente antiguo. Por último, la influencia de las políticas públicas queda claramente evidenciada en el estudio de Kiliccote et al. [19], que compara la efectividad de los sistemas de gestión energética con las medidas normativas. Este trabajo enfatiza la necesidad de un equilibrio entre regulación e innovación para maximizar los beneficios en términos de ahorro energético. Finalmente, Tarantola [20] explora el papel de la inteligencia artificial como catalizador de eficiencia energética, subrayando su capacidad para reducir tanto el consumo energético como las emisiones de carbono.

Casos de Estudio

Para entender mejor la aplicación práctica de los conceptos de eficiencia energética en edificios inteligentes en Latinoamérica, es crucial analizar casos reales que se hayan ejecutado en la región. Al hilvanar el razonamiento anterior con ejemplos concretos, se pueden evidenciar los aspectos clave que se toman en cuenta para su implementación, como el clima, el uso de materiales renovables y autóctonos, y la integración de energías renovables.

En la Ciudad de México, el edificio corporativo Torre Reforma se ha convertido en un modelo de eficiencia energética en América Latina. Este edificio combina tecnologías de monitoreo avanzado, como sensores IoT que miden el consumo energético en tiempo real, con sistemas de automatización centralizados para regular la climatización y la iluminación. Además, la estructura cuenta con un diseño arquitectónico que maximiza la entrada de luz natural, reduciendo la necesidad de iluminación artificial durante el día. Torre Reforma también aprovecha fuentes renovables al incorporar paneles solares en su sistema energético, logrando así una reducción del 25% en el consumo eléctrico general. Aunque los costos iniciales de implementación fueron elevados, estimados en aproximadamente un 15% más que una construcción tradicional, los beneficios económicos y ambientales, incluyendo un retorno de inversión en menos de cinco años, han establecido un referente para otros proyectos en contextos urbanos similares [21].

En Johannesburgo, Sudáfrica, el 82 Grayston Drive es un ejemplo sobresaliente de edificio comercial sostenible en un país en desarrollo. Este proyecto ha integrado sistemas de automatización avanzada que ajustan automáticamente el aire acondicionado y la iluminación según la ocupación de los espacios. Además, el edificio utiliza una combinación de tecnologías IoT para monitorear el consumo energético y paneles solares que generan hasta el 20% de su energía. Estas innovaciones, junto con sistemas de gestión de agua para reciclaje y reutilización, han reducido los costos operativos en un 30% anual. Aunque el costo inicial de instalación fue alto, el periodo de amortización de seis años y los incentivos fiscales ofrecidos por el gobierno sudafricano han contribuido a popularizar este enfoque en otras ciudades del país [22].

En Bangalore, India, el Sobha Habitat es un complejo residencial que demuestra cómo las tecnologías emergentes pueden integrarse eficazmente en contextos económicos desafiantes. Este proyecto incorpora un sistema IoT interconectado que regula el consumo de agua y energía en tiempo real. Asimismo, cuenta con sensores de ocupación para ajustar automáticamente la iluminación y la climatización, y utiliza una combinación de paneles solares y sistemas de almacenamiento de energía para garantizar un suministro sostenible. Gracias a estas tecnologías, el Sobha Habitat ha logrado una reducción del 22% en el consumo energético y un ahorro significativo en las facturas mensuales de servicios básicos para los residentes. A pesar de los desafíos iniciales de financiamiento, el proyecto ha demostrado que este tipo de iniciativas pueden ser viables y efectivas en regiones con características similares a las de América Latina [23]. En Latinoamérica, una de las principales consideraciones para el diseño de edificios inteligentes y eficientes es la amplia diversidad climática de la región, que abarca desde climas cálidos y húmedos, como en la Amazonía, hasta climas áridos, como el del norte de Chile. Esta variedad climática demanda estrategias adaptadas a las condiciones locales, donde el diseño bioclimático desempeña un papel crucial al aprovechar las condiciones climáticas naturales para reducir el consumo energético. Un ejemplo destacado es el edificio CONTREE "Las Palmas" en Medellín, Colombia, una ciudad con clima cálido y húmedo. Este edificio utiliza estrategias de ventilación cruzada natural, protecciones solares y cubiertas verdes para reducir la ganancia de calor, disminuyendo así la necesidad de aire acondicionado. Estas iniciativas se alinean con los estudios anteriormente citados [11], que explora la optimización de sistemas HVAC en climas tropicales, evidenciando el impacto positivo del diseño bioclimático.

Por otro lado, la implementación de Sistemas de Gestión Energética (BMS) y tecnologías de automatización en edificios permite un control eficiente en tiempo real de sistemas como iluminación y climatización, ajustándose automáticamente a las necesidades de los ocupantes y las condiciones ambientales. Un ejemplo sobresaliente es la "Torre Titanium" en Santiago de Chile, que integra un sistema BMS para optimizar su consumo energético y mejorar el confort de los usuarios. Este caso también destaca la importancia de la inteligencia artificial y los modelos predictivos, aspectos estudiados ampliamente por investigadores como Das et al. [16], quienes subrayan su rol en la optimización energética de edificios inteligentes.

Estos casos resaltan algunos aspectos clave para la implementación de edificios inteligentes en Latinoamérica. El diseño bioclimático es esencial para aprovechar las condiciones naturales y reducir el consumo energético. Además, el uso de materiales locales y renovables no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también mejora el confort térmico y reduce costos. La integración de energías renovables, especialmente la solar, presenta un gran potencial en la región. Asimismo, la incorporación de sistemas de gestión energética como los BMS permite optimizar recursos en tiempo real, mientras que las consideraciones económicas y la demostración de la viabilidad financiera de estas tecnologías son cruciales para su adopción. Por último, es necesario desarrollar marcos regulatorios y políticas públicas que incentiven la construcción sostenible en la región. Con estas estrategias y el aprendizaje derivado de ejemplos reales, Latinoamérica puede avanzar hacia la construcción de edificios más sostenibles, eficientes y adaptados a las necesidades de su entorno diverso.

Con los resultados obtenidos de la información bibliográfica y de los casos de estudio anteriormente vistos, se pueden aplicar simulaciones que tomen en consideración los bioclimas presentes en la Latinoamérica para modelar aspectos relacionados con la eficiencia energética, como la sostenibilidad del consumo eléctrico, los recursos destinados a ventilación y calefacción como aquellos relacionados con la iluminación eficiente de espacios.

*Desarrollo de simulaciones con variables características de la región latinoamericana**A. Simulación para un clima tropical (Medellín, Colombia)*

En Medellín, Colombia, un edificio residencial fue modelado considerando un clima cálido y húmedo, caracterizado por temperaturas promedio que oscilan entre 18 y 28 °C. La configuración tecnológica incluye sensores IoT que gestionan la iluminación y la climatización, un sistema de gestión de energía (BMS) que optimiza estos recursos en función de la ocupación y las condiciones climáticas externas, y la integración de paneles solares para reducir la dependencia de la red eléctrica. El edificio, de tamaño medio y cinco pisos, tiene un patrón de ocupación moderado, con mayor presencia de sus ocupantes durante la noche. Los resultados de la simulación indicaron una reducción del consumo energético en iluminación y climatización de al menos un 25% en comparación con edificios convencionales, lo que se traduce en un ahorro financiero anual del 15% en la factura energética. El retorno de la inversión para la implementación de paneles solares se estima en seis años, convirtiendo esta estrategia en una solución rentable para el contexto tropical.

1) Simulación para un clima árido (Santiago de Chile)

En Santiago de Chile, se simuló un edificio comercial en un clima árido y extremo, con temperaturas que varían entre 0 y 35 °C dependiendo de la estación. El modelo tecnológico implementa un sistema BMS centralizado que controla la climatización, iluminación y los equipos de oficina. Además, combina ventilación mecánica con diseño bioclimático mediante protecciones solares pasivas, y utiliza paneles solares con acumuladores para la generación y almacenamiento de energía renovable.

El edificio, de gran tamaño con diez pisos, presenta un patrón de ocupación alto durante el día y actividad mínima en la noche. Los resultados de la simulación muestran una reducción del consumo energético total de al menos un 30%, mientras que la dependencia de la red eléctrica se reduce al 50% gracias al uso de energía solar. Aunque el costo inicial de los acumuladores de energía prolonga el retorno de inversión a ocho años, los beneficios en términos de sostenibilidad y reducción de costos energéticos a largo plazo son significativos.

2) Simulación para un clima subtropical (Ciudad de México, México)

En Ciudad de México, se evaluó un edificio de usos mixtos, combinando espacios comerciales y residenciales, bajo un clima subtropical con temperaturas promedio de 7 a 27 °C y una estacionalidad moderada. La configuración tecnológica incluye sensores IoT integrados para la iluminación en áreas comunes y climatización en oficinas, un sistema BMS descentralizado que adapta el consumo energético a patrones de ocupación por áreas específicas, y un sistema de energía solar e híbrida con almacenamiento para maximizar la eficiencia energética.

El edificio, de tamaño medio, tiene un patrón de ocupación mixto, con alta actividad diurna en oficinas y mayor ocupación residencial durante la noche. La simulación arrojó una reducción del consumo energético en un 20-25%, con una notable disminución de los costos operativos gracias a la automatización en áreas de baja ocupación. El retorno de inversión se estima en siete años, mientras que las mejoras en confort y productividad de los ocupantes destacan como beneficios adicionales de esta configuración.

La tabla 2 se realiza una comparativa entre el clima y las estrategias utilizadas en cada caso particular.

Tabla 2. Comparación de estrategias tecnológicas y resultados.

Estrategia	Clima tropical	Clima árido	Clima subtropical
Sensores IoT	25% de reducción	20% de reducción	20-25% de reducción
BMS	20% de optimización	30% de optimización	20% de optimización
Energía solar	40% de generación	50% de generación	30-40% de generación
Retorno de inversión (años)	6	8	7

Los resultados mostrados además en la figura 1, refuerzan el hecho que las configuraciones más rentables y eficientes combinan sensores IoT para control dinámico, BMS para gestión centralizada o descentralizada según el contexto, y generación de energía renovable como los paneles solares. Los resultados muestran que los climas tropicales y subtropicales pueden beneficiarse ampliamente de estrategias de ventilación natural y optimización del uso de iluminación, mientras que en climas áridos es clave la integración de energías renovables y acumuladores. En última instancia, y dado los resultados, se destaca la opinión de algunos entes regionales y expertos con respecto a los hallazgos encontrados en esta investigación.

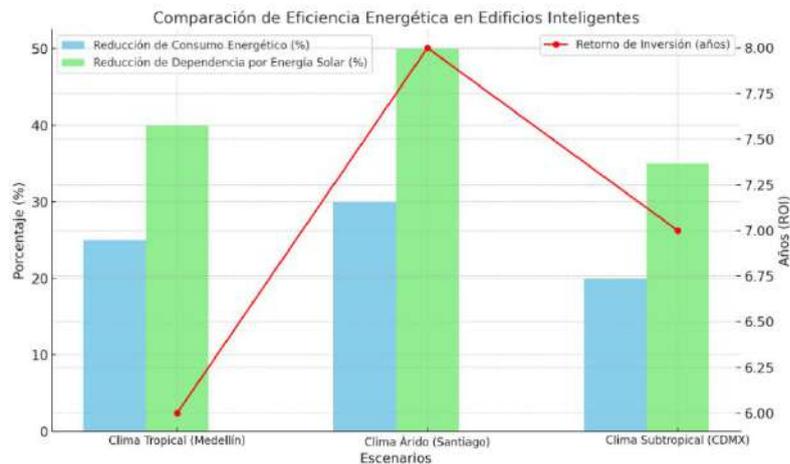


Fig. 1. Comparativa de la eficiencia energética según el escenario establecido.

Opiniones de expertos

La eficiencia energética en edificios inteligentes es una prioridad global, con organismos como el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE) [11] en Ecuador promoviendo el uso responsable de la energía mediante programas y guías prácticas que fomentan el consumo eficiente y el uso de fuentes renovables. En este sentido, el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) ha analizado la gestión energética en edificios públicos a través del proyecto "Sistema de Información Energética para Edificios en Ecuador", destacando la necesidad de mejorar la eficiencia en estos espacios. Además, estudios de la Universidad Técnica de Cotopaxi han identificado problemas eléctricos en edificios, lo que refuerza la importancia de integrar tecnologías para optimizar el consumo de energía en las infraestructuras públicas.

A nivel regional, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) [12] ha subrayado la importancia de fortalecer los marcos regulatorios y las políticas públicas para promover la eficiencia energética en América Latina. En su informe sobre la situación y perspectivas de la eficiencia energética en la región, la CEPAL resalta los avances y desafíos para implementar políticas que favorezcan el uso más eficiente de los recursos energéticos en los edificios. Estas iniciativas se alinean con las metas globales de sostenibilidad, en las que el sector de la construcción juega un papel fundamental en la reducción de emisiones.

En el ámbito internacional, organismos como la Agencia Internacional de Energía (IEA) [1] han destacado que los edificios representan una parte significativa del consumo mundial de energía, y su eficiencia energética es clave para mitigar el cambio climático. La IEA recomienda la adopción de normativas estrictas y el uso de tecnologías avanzadas, como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial, para mejorar la gestión energética en los edificios inteligentes. Estas tecnologías emergentes permiten optimizar el consumo energético de manera dinámica y eficiente, impulsando un futuro más sostenible.

CONCLUSIONES

Los casos analizados resaltan la importancia del diseño bioclimático como una herramienta esencial para reducir el consumo energético y maximizar los recursos naturales disponibles en Latinoamérica. Futuras investigaciones podrían enfocarse en el desarrollo de simulaciones avanzadas que consideren los diversos bioclimas de la región, permitiendo modelar el impacto de estrategias específicas en el consumo eléctrico, ventilación, calefacción e iluminación eficiente. Asimismo, la integración de materiales locales y renovables no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también promueve el desarrollo económico y social en las comunidades locales. En este sentido, se propone explorar nuevos materiales sostenibles disponibles en América Latina, evaluando su eficiencia térmica, costos y capacidad de adaptación a diferentes climas de la región.

La incorporación de fuentes de energía renovable, especialmente la solar, se presenta como una solución viable para cubrir la demanda energética de los edificios inteligentes. En este ámbito, estudios futuros podrían investigar cómo combinar energías renovables con sistemas de almacenamiento y gestión energética avanzada para aumentar la resiliencia y autonomía de los edificios en diferentes escenarios. Paralelamente, los sistemas de gestión energética como los Building Management Systems (BMS) ofrecen una oportunidad significativa para optimizar recursos en tiempo real. Investigaciones adicionales deberían enfocarse en cómo personalizar estas tecnologías para las necesidades específicas de los edificios en América Latina, incluyendo la capacitación de profesionales locales para maximizar su implementación efectiva.

Los avances destacados por organismos como la CEPAL subrayan la necesidad de políticas públicas robustas que incentiven la construcción sostenible. Una línea investigativa pertinente sería el análisis de los impactos a largo plazo de estas políticas en diferentes países de la región, proponiendo ajustes basados en resultados medibles. Además, tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la inteligencia artificial tienen un gran potencial para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes, como lo sugiere la Agencia Internacional de Energía (IEA). Investigaciones futuras podrían explorar cómo estas tecnologías pueden ser adaptadas y escaladas en contextos de bajos recursos, además de abordar desafíos relacionados con la conectividad y la seguridad de los datos.

Los proyectos impulsados por el MAATE y el IIGE en Ecuador demuestran que existe un amplio margen para mejorar la eficiencia energética en edificios públicos. En este contexto, se recomienda investigar estrategias específicas para modernizar infraestructuras antiguas, optimizando el uso de recursos y evaluando la viabilidad de modelos de financiación público-privada. A nivel global, las normativas promovidas por organismos como la IEA sirven como referencia para avanzar en eficiencia energética. Una propuesta investigativa sería analizar cómo las normativas internacionales pueden ser adaptadas al contexto latinoamericano, identificando buenas prácticas que puedan ser replicadas localmente.

Los avances tecnológicos permiten el uso de simulaciones para evaluar escenarios futuros en el consumo energético de edificios inteligentes. Nuevas investigaciones podrían centrarse en el desarrollo de modelos predictivos basados en inteligencia artificial que integren datos climáticos, económicos y sociales de la región. Finalmente, se destaca la necesidad de fomentar la colaboración regional e internacional para compartir conocimientos y recursos. Las redes colaborativas entre universidades, gobiernos y el sector privado podrían facilitar el desarrollo e implementación de soluciones más efectivas y sostenibles. Con estas conclusiones y propuestas, se establece un marco para continuar avanzando en el estudio y la práctica de la eficiencia energética en edificios inteligentes, promoviendo la sostenibilidad, la innovación y la equidad en América Latina.

REFERENCIAS

- [1] United Nations, "Sustainable Cities and Communities," [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>. [Accessed: Oct. 17, 2024].
- [2] International Energy Agency (IEA), Tracking Buildings 2021, IEA, Paris, 2021. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9c30109f-38a7-4a0b-b159-47f00d65e5be/EnergyEfficiency2021.pdf021>. [Accessed: Oct. 18, 2024].
- [3] V. Marinakis and H. Doukas, "An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings," *Sensors*, vol. 18, no. 2, p. 610, 2018, doi: 10.3390/s18020610.
- [4] G. Hayduk, P. Kwasnowski, and Z. Mikoś, "Building management system architecture for large building automation systems," in 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), May 2016, pp. 232–235.
- [5] M. R. Abid, R. Lghoul and D. Benhaddou, "ICT for renewable energy integration into smart buildings: IoT and big data approach," 2017 IEEE AFRICON, Cape Town, South Africa, 2017, pp. 856–861, doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095594.
- [6] D. M. T. E. Ali, V. Motuzienė, and R. Džiugaitė-Tumėnienė, "AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings," *Energies*, vol. 17, no. 17, p. 4277, 2024, doi: 10.3390/en17174277.
- [7] A. W. Mahmoud, R. Abdulla, M. E. Rana and H. K. Tripathy, "IoT Based Energy Management Solution for Smart Green Buildings," 2022 International Conference on Advancements in Smart, Secure and Intelligent Computing (ASSIC), Bhubaneswar, India, 2022, pp. 1–7, doi: 10.1109/ASSIC55218.2022.10088306.
- [8] B. Mostafa, S. Ahmed, T. Ghoniemy, and A. Al-Sakkaf, "Towards the Enhancement of Buildings' Sustainability: IoT-Based Building Management Systems (IoT-BMS)," in IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 1396, Cairo, Egypt, May 21–23, 2024, Art. no. 012020, doi: 10.1088/1755-1315/1396/1/012020.
- [9] H. Farzaneh, L. Malehmirchegini, A. Bejan, T. Afolabi, A. Mulumba, and P. P. Daka, "Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, p. 763, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11020763>.
- [10] G. P. R. Filho, L. A. Villas, V. P. Gonçalves, G. Pessin, A. A. F. Loureiro, and J. Ueyama, "Energy-efficient smart home systems: Infrastructure and decision-making process," *Internet of Things*, 1 vol. 8, pp. 153–167, 2019, doi: 10.1016/j.iot.2018.12.004. [10] A. Rossi and G. Martelli, "HVAC efficiency in smart infrastructures," *Journal of Building Energy Research*, vol. 18, pp. 72–85, 2022.
- [11] A. Vintimilla, P. Mera y J. Carrillo, "Eficiencia energética en el sector residencial de la Ciudad de Cuenca, Ecuador," ResearchGate, 2019. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/332089223_Eficiencia_energetica_en_el_sector_residencial_de_la_Ciudad_de_Cuenca_Ecuador. [Accedido: 21-oct-2024].
- [12] CEPAL, "Eficiencia Energética en la Transición Sostenible e Inclusiva de América Latina y el Caribe," Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/estudio_eficiencia_energetica_alc_cepal.pdf. [Accedido: 13-ago-2024].
- [13] R. Martínez, "Eficiencia Energética en Edificios: desafíos en América Latina," *Revista Expofrío y Climatización*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://revistaexpofrio.com/eficiencia-energetica-en-edificios-desafios-en-america-latina/>. [Accedido: 16-sep-2024].
- [14] BID, "Las redes inteligentes de energía y su implementación en ciudades sostenibles," Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2020. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Las-redes-inteligentes-de-energ%C3%ADa-y-su-implementaci%C3%B3n-en-ciudades-sostenibles-RG-T2058.pdf>. [Accedido: 15-ago-2024].
- [15] M. A. López et al., "La inserción de la eficiencia energética en los edificios universitarios: análisis de casos en Brasil y España," Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis Doctoral, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113995/TMALE1de2.pdf>. [Accedido: 15-ago-2024].
- [16] H. P. Das et al., "Machine Learning for Smart and Energy-Efficient Buildings," arXiv preprint, arXiv:2211.14889, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2211.14889>.

-
- [17] B. Setz et al., "Energy Smart Buildings: Parallel Uniform Cost-Search with Energy Storage and Generation," arXiv preprint, arXiv:2211.08969, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2211.08969>.
- [18] C. Perry et al., "Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings," American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE), 2017. [Online]. Available: <https://www.aceee.org/research-report/a1701>.
- [19] S. Kiliccote et al., "Improving Energy Efficiency via Smart Building Energy Management Systems: A Comparison with Policy Measures," Energy Efficiency Journal, vol. 9, pp. 243-256, 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/273192528_Improving_energy_efficiency_via_smart_building_energy_management_systems_A_comparison_with_policy_measures.
- [20] A. Tarantola, "How AI Is Making Buildings More Energy-Efficient," Time Magazine, 2024. [Online]. Available: <https://time.com/7201501/ai-buildings-energy-efficiency/>.
- [21] Acero Verde, "Torre Reforma: Ciudad de México", [Online]. Available: <https://acero-verde.com/torre-reforma-ciudad-de-mexico>. [Accedido: 05-ago-2024].
- [22] Officespace Online, "82 Grayston Drive, Sandton," [Online]. Available: https://www.officespaceonline.co.za/Basket/Building/1542?utm_source=chatgpt.com, [Accedido: 18-sep-2024].
- [23] Sobha Habitat en Bangalore, India," Informe sobre proyectos sostenibles, [Online]. Available: <https://www.sobha.com>, [Accedido: 18-sep-2024].