

Machine Learning en la Optimización del Consumo de Energía en Edificios Inteligentes: Tendencias y Desafíos

Autor 1: Jorge Luis Veloz Zambrano
Universidad Nacional Mayor San Marcos, **UNMSM**
Jorge.veloz@unmsm.edu.pe

Autor 2: Túpac Valdivia Yván Jesús
Universidad Católica San Pablo
ytupac@ucsp.edu.pe

Autor 3: Bernuy Alva Augusto
Universidad de San Martín de Porres
abernuya@usmp.pe
Lima, Perú

DOI: <https://doi.org/10.56124/encriptar.v8i15.011>

Resumen

A la vanguardia de la revolución tecnológica y sostenible, los edificios inteligentes destacan como modelos de eficiencia y confort, con un crecimiento previsto de 45 millones en 2022 a 115 millones en 2026. Estos edificios utilizan tecnología avanzada para optimizar los recursos, mejorando la seguridad y el bienestar de sus ocupantes. Sin embargo, enfrentan desafíos en infraestructura urbana, equilibrando precisión, escalabilidad y adaptabilidad en el campo de Internet de las cosas. Se enfatiza la importancia de los datos y el aprendizaje automático para predecir y mejorar el consumo de energía, abordando la necesidad de modelos predictivos eficientes y prácticos que manejen datos complejos y capturen patrones espaciotemporales. Se identifican lagunas en la comparación estandarizada de modelos, la eficiencia de los algoritmos predictivos y la transformación de la investigación en aplicaciones prácticas. Este estudio plantea preguntas clave sobre la gestión de recursos y la optimización del consumo de energía a través del aprendizaje automático, proponiendo objetivos específicos como la recopilación de datos y la evaluación de modelos para validar la efectividad y mejorar la vida de los ocupantes, así como contribuir al desarrollo económico, ambiental y social. Se sigue una metodología sistemática para la revisión de la literatura, empleando la declaración PRISMA, y se plantean preguntas de investigación para guiar la identificación de tendencias y respuestas al uso del aprendizaje automático para predecir el consumo de energía en edificios inteligentes.

Palabras clave: energía eléctrica; consumo; previsión; optimización.

Machine Learning in Optimizing Energy Consumption in Smart Buildings: Trends and Challenges

ABSTRACT

At the forefront of the technological and sustainable revolution, smart buildings stand out as models of efficiency and comfort, with a projected growth of 45 million in 2022 to 115 million by 2026. These buildings use advanced technology to optimize resources, improving the safety and well-being of their occupants. However, they face challenges in urban infrastructure, balancing accuracy, scalability, and adaptability in the field of the Internet of Things. The importance of data and machine learning to predict and improve energy consumption is emphasized, addressing the need for efficient and practical predictive models that handle complex data and capture spatiotemporal patterns. Gaps are identified in the standardized comparison of models, the efficiency of predictive algorithms, and the transformation of research into practical applications. This study asks key questions about resource management and optimizing energy consumption through machine learning, proposing specific objectives such as data collection and evaluation of models to validate the effectiveness and improve the lives of occupants, as well as contribute to the economic, environmental, and social impact. A systematic methodology for the literature review is followed, employing the PRISMA statement, and research questions are posed to guide the identification of trends and responses to the use of machine learning to predict energy consumption in smart buildings.

Keywords: electrical energy; consumption; forecast; optimization.

1. Introducción

Los edificios inteligentes se destacan como modelos de eficiencia y confort, con una proyección de crecimiento global de 45 millones en 2022 a 115 millones en 2026 (Juniper Research, 2024). Estos espacios optimizan recursos y mejoran la seguridad y bienestar de sus ocupantes. Sin embargo, la expansión de estas construcciones y la variabilidad en su uso presentan desafíos en la infraestructura de ciudades inteligentes, como la calibración de sensores y el manejo de grandes volúmenes de datos, lo que exige equilibrio entre precisión, escalabilidad y adaptabilidad (Rico et al., 2022)

Los enfoques centrados en datos, como el análisis y el aprendizaje automático, ofrecen técnicas para estimar el consumo energético en edificios, mejorando la eficiencia y respondiendo a las crecientes demandas de confort y urbanización (Bourdeau et al., 2019; Z. Wang & Srinivasan, 2017). La investigación en este campo enfrenta tres desafíos principales: la falta de comparación estandarizada entre modelos debido a diferentes bases de datos (Chou & Tran, 2018), la necesidad de modelos predictivos más precisos para manejar datos complejos (Khaoula et al., 2023) y la dificultad de aplicar el aprendizaje automático en la práctica para optimizar la eficiencia energética.

Los edificios inteligentes son clave para la eficiencia energética, la seguridad y el confort en entornos urbanos, utilizando tecnología de comunicación y sensores para optimizar operaciones (Barker, 2020; Khanna et al., 2019). Son fundamentales en el desarrollo de ciudades inteligentes, ajustando iluminación, calefacción y refrigeración para maximizar la eficiencia (Hoy, 2016; Kumar et al., 2021). Además, mejoran la toma de decisiones mediante informes detallados y requieren colaboración interdisciplinaria (Pašek & Sojková, 2018). El Internet de las Cosas (IoT) conecta dispositivos físicos para interactuar y transmitir datos, impactando sectores como salud, hogares inteligentes y transporte (Ahmad et al., 2021; Rajamohan et al., 2023). El IoT se combina con IA para análisis de datos, conocido como AIoT (Kuo et al., 2022). El aprendizaje automático (ML), parte de la inteligencia artificial, optimiza el rendimiento a partir de datos históricos y tiene aplicaciones en detección de spam, diagnóstico médico y conducción autónoma (Louridas & Ebert, 2016; Yan, 2022). Es un campo emergente con gran potencial de innovación (Abaimov & Martellini, 2022).

Para enfrentar la creciente demanda energética, el modelo kCNN-LSTM combina k-medias, redes neuronales convolucionales (CNN) y LSTM para predecir con precisión el consumo energético en edificios. Validado en IIT-

Bombay, demostró ser superior a otros modelos al capturar dependencias espaciotemporales (Somu et al., 2021). A diferencia de métodos basados en ecuaciones termodinámicas, este enfoque utiliza datos históricos, siendo ideal para la eficiencia energética. Se evaluaron modelos como regresión lineal, bosque aleatorio y redes neuronales con métricas como RMSE y R^2 (Khaoula et al., 2023). Por otro lado, el modelo IoT-EP de (Balaji & Karthik, 2023). IoT y CNN para predecir el consumo energético con un 90% de precisión y alta eficiencia en edificios inteligentes, destacando su rapidez y fiabilidad en un entorno de prueba.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar una revisión de literatura sobre las tendencias del Uso de ML en la predicción del consumo de energía en Smart Building mediante el empleo de la técnica de enfoque PRISMA y se estructura en cuatro secciones: Introducción, Metodología, Resultados y Conclusiones.

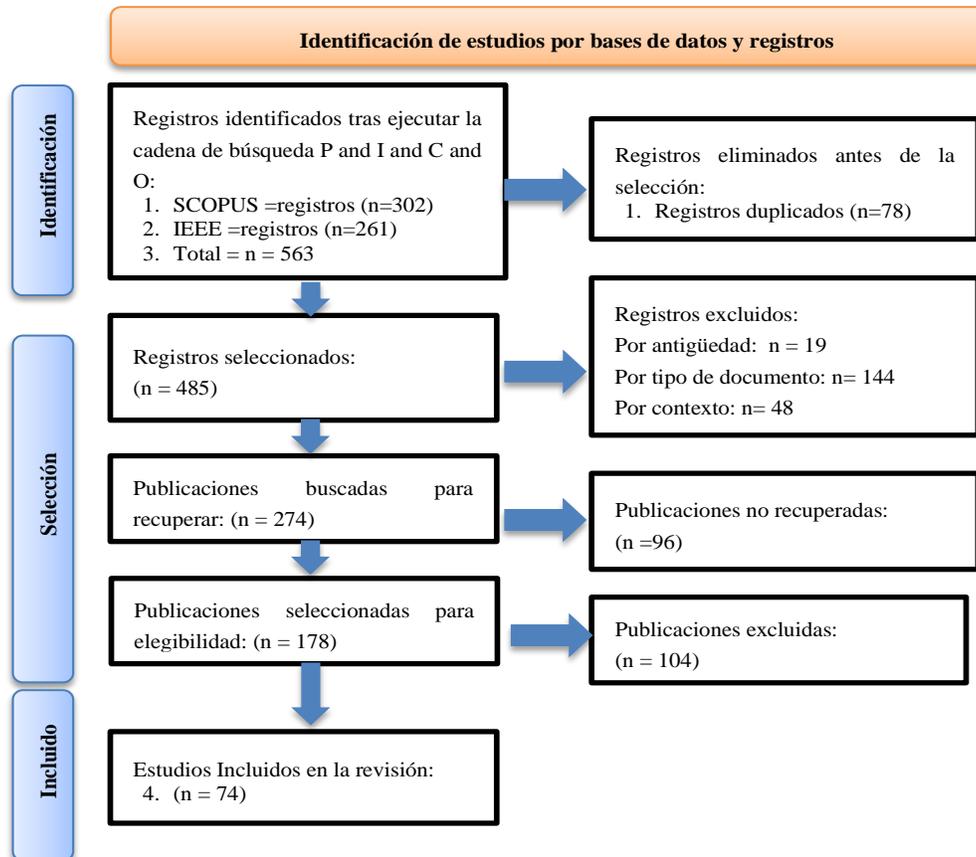
2. Metodología

Este artículo presenta una descripción de los estudios recientes reportados en la literatura académica sobre el uso de ML respecto a la predicción del consumo de energía en Smart Building, con la finalidad de conocer las tendencias existentes. Se formulan las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué características clave deben considerarse para una gestión anticipada y eficiente de recursos en construcciones avanzadas? y ¿De qué manera pueden los algoritmos de aprendizaje automático optimizar el consumo de energía en edificios inteligentes?

Se aplicó un enfoque de revisión sistemática de la literatura para identificar y analizar artículos relacionados con las preguntas planteadas. Para ello, se adoptó el enfoque PRISMA, que incluye cuatro fases principales, como se ilustra en la Figura 1. La investigación se llevó a cabo mediante una

búsqueda en línea en la base de datos SCOPUS e IEEE, limitada a artículos de revistas y de conferencias revisadas por pares publicados entre 2019 y 2023, con el fin de capturar estudios recientes.

Figura 1. Diagrama Prisma



La primera fase de identificación en la planificación involucró desarrollar el objetivo de la investigación, la pregunta de investigación, una lista de palabras clave y los criterios para la inclusión y exclusión de artículos. El objetivo de la investigación se formula con base en las preguntas de investigación definidas. Los criterios de inclusión incluyeron artículos de revistas y presentados en conferencias que cuentan con proceso de revisión por pares en inglés y español, disponibles en línea y relevantes para el objetivo de la investigación. La búsqueda se realizó utilizando la cadena de consulta

(P) and (I) and (C) and (O) ("smart building" or "Iot") AND "machine learning use") and ("Prediction or forecasting") and ("energy consumption") para buscar en los títulos y resúmenes de los artículos disponibles. La primera etapa de la búsqueda recopiló 563 artículos de revistas. Se aplicaron más exclusiones en áreas temáticas relevantes, estado de revisión por pares y disponibilidad de texto completo en línea, lo que resultó en la selección de 485 artículos.

La segunda fase de selección involucró una evaluación del resumen y las sinopsis de los artículos, donde se eliminaron 211 artículos, dejando 274 artículos. La exclusión se centró en la relevancia de los artículos para el objetivo del documento. La tercera fase de elegibilidad evaluó los textos completos de los artículos, donde se excluyeron los artículos irrelevantes, y se retuvieron 178 artículos. Finalmente, la cuarta etapa de inclusión se centró en la lectura del texto completo de los 74 artículos, que cumplieron con los objetivos de la investigación. Estos artículos proporcionaron una base suficiente sobre las tendencias del ML en la gestión eficiencias de los recursos en edificios inteligentes.

Preguntas de Investigación. Para esta revisión de literatura se plantean las siguientes preguntas claves: RQ1. ¿Cuáles son las características clave que deben considerarse para tener una gestión de manera anticipada y eficiente de los recursos en edificios inteligentes? Y, RQ2. ¿Cómo pueden los algoritmos de aprendizaje automático emplearse para optimizar el consumo energético?

Estrategia de Búsqueda (PICOC). Se ha realizado la búsqueda en las bases de datos académicas y científicas: IEEE Xplorer y Scopus. Los criterios de inclusión para la selección de publicaciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de Inclusión y Exclusión.

Criterio	Descripción
	Artículos originales y publicaciones en conferencias con revisión por pares.
Inclusión	Artículos que aborden el uso de ML en la predicción o gestión eficiente de energía en edificios inteligentes.
	5 años para asegurar la relevancia y actualidad de la tecnología (2019-2023)
	Artículos en inglés o español
Exclusión	Estudios Incompletos o Preliminares como: Documentos de trabajo, resúmenes de conferencias o investigaciones sin resultados concluyentes.
	Artículos o documentos que no tengan relación con uso de algoritmos de predicción en edificios inteligentes

Así, también se ha definido el método PICOC (Población, Intervención, Comparación, Resultados y Contexto) de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Este método se utiliza para describir los cinco componentes de una pregunta de búsqueda. Para nuestro caso, se ha utilizado solo Población, Intervención, Comparación, Resultados, como se describe en la Tabla 2. Es importante destacar que solo se presentan resultados finales para dar respuesta a cada pregunta de investigación.

P - Población: Smart Building, IoT.

I - Intervención: Uso de ML.

C - Comparación: Predicción.

O - Resultados: Optimización del consumo de energía

Tabla 2. PICO

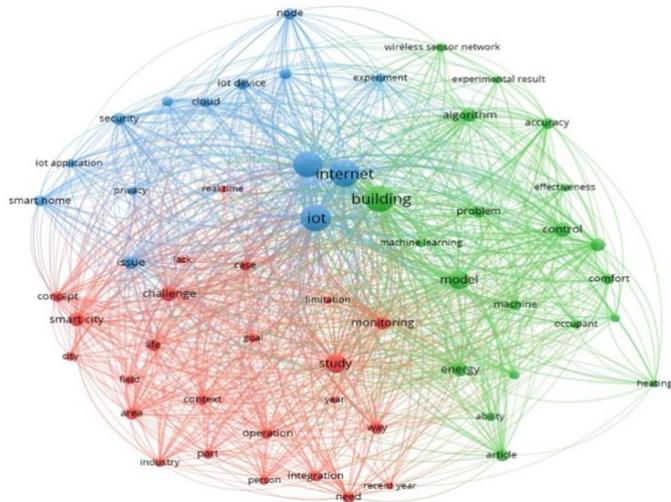
PICO	Keywords	Search String
P (Población)	Smart building, lot	(P) and (I) and (C) and (O)
I (Intervención)	Machine learning use	("smart building" or "lot")
C (Comparación)	Prediction or forecasting	AND "machine learning use")
O (Resultados)	Energy consumption.	and ("Prediction or forecasting")
		and ("energy consumption")

Análisis Bibliométrico. El análisis bibliométrico se realizó sobre los 563 artículos encontrados, este análisis uso como herramienta el software VOSviewer, versión 1.6.20.

Visualización de Red. El software de análisis nos presenta una visualización de red en la que nos presenta las agrupaciones de nodos más importantes graficándolos con colores, cuanto mayor es el tamaño del nodo, más grande será el tamaño del nodo principal, como se muestra en la figura 2. La interpretación de los nodos con los respectivos colores se presenta a continuación:

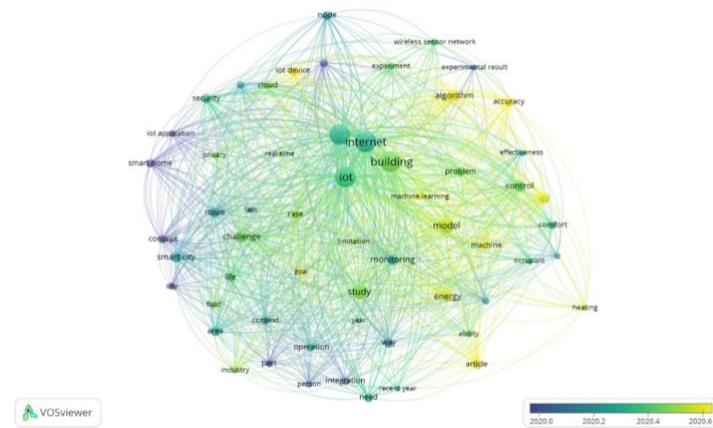
- **Nodo Azul:** Tiene su pico más alto de frecuencia en la palabra "internet" e IoT".
- **Nodo verde:** Tiene su pico más alto de frecuencia en "building" y está estrechamente relacionado con "model", "algorithm", "energy", "machine learning", "model".
- **Nodo Rojo:** Tiene su mayor frecuencia en los puntos "study", "Smart city", "monitoring" e "integration".

Figura 2. Visualización de la red



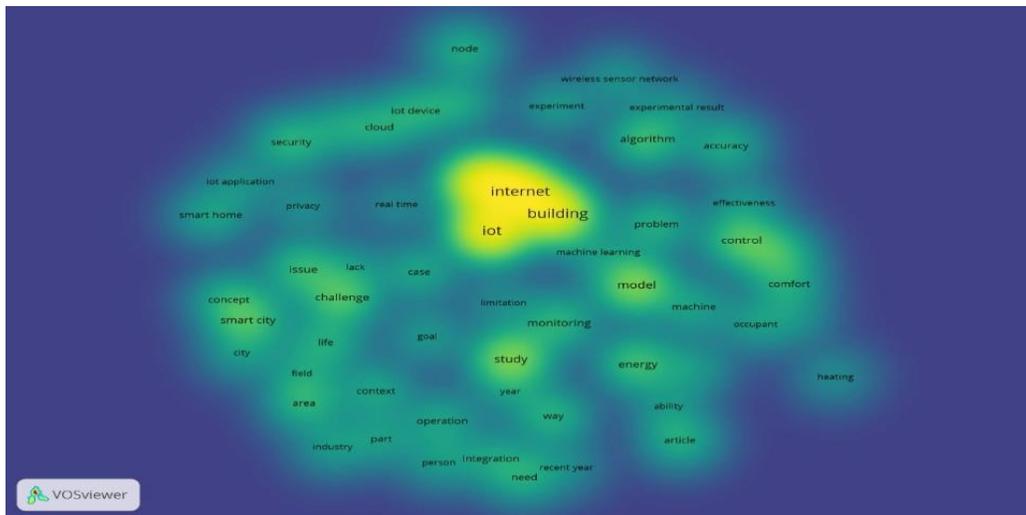
Visualización Superpuesta. En la figura 3, se puede apreciar la evolución de los términos en los últimos años representados gráficamente en colores que van desde un color azul oscuro, en los años 2020 hasta un amarillo intenso en el 2023, pasando por los colores verde oscuro y verde claro. La mayor concentración en los años 2020 se dio en el término “Smart home”, seguido por “IoT application”, “integration” a inicios del 2021 se destacan los términos “internet”, “internet de las cosas” a finales del 2021; ya en los años 2022 predomina los términos, “machine learning”, “model” “energy”, “algorithms”.

Figura 3. Visualización Superpuesta



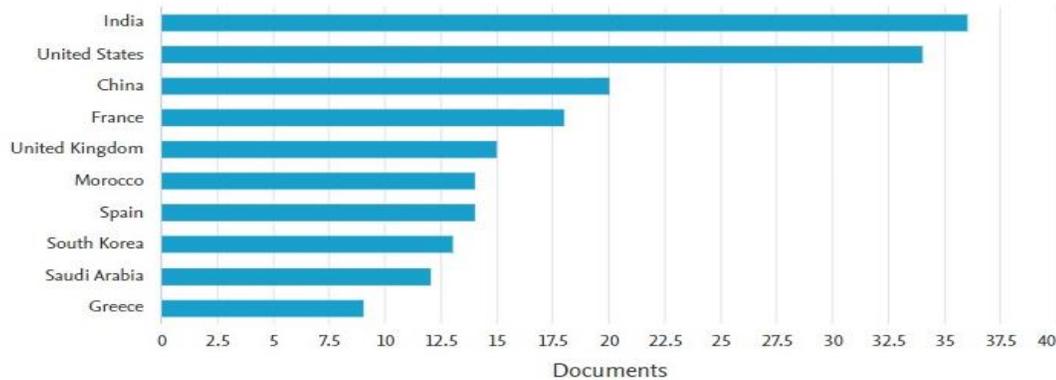
Visualización de Densidad. La figura 4 permite visualizar la densidad de los elementos junto a la densidad de grupos. Al respecto se puede observar la densidad de las palabras clave obtenidas del análisis bibliométrico, en donde se puede observar que las áreas amarillas representan la importancia y concurrencia de investigaciones relacionadas con el “IoT”, “Internet”, “Building”; y en las zonas de menor densidad con un color verde hacia un color azul, se ubican los términos referentes a “control”, “smart city”, “model”, “energy”, “algorithm” y “Machine learning” dentro de los más predominantes.

Figura 4. Mapa de calor



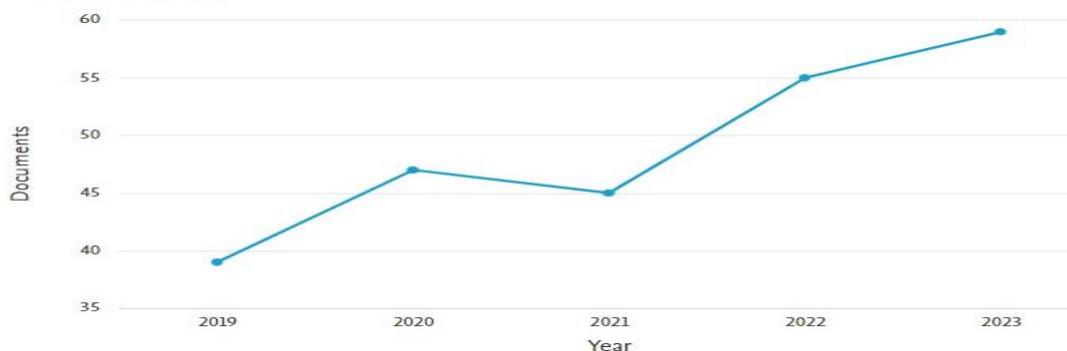
De manera adicional, se incluye un análisis estadístico de las publicaciones relacionadas con el uso de ML para optimizar el consumo de energía en edificios inteligentes, obteniéndose que los países con mayor número de publicaciones son India y Estados Unidos. Sin embargo, se muestran creciente número de publicaciones en países como China, Francia, Reino Unido, Morocco y España. No se aprecian publicaciones relacionadas en países de Latinoamérica.

Figura 5. *Publicaciones por países*



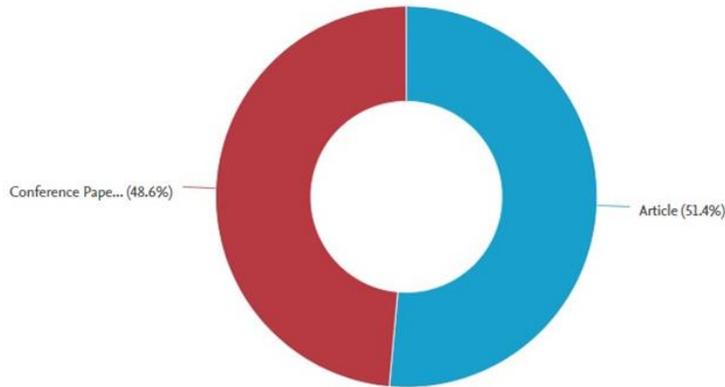
De igual manera, se pueden apreciar un incremento significativo en el número de publicaciones analizadas históricamente, es así como al 2019 existían menos de 40 publicaciones y en el 2023 se identificaron cerca de 60 publicaciones. Es importante, destacar que existen ya publicaciones en esta línea aceptados para publicarse en el 2024 pero que por su estado no son incluidas en este análisis.

Figura 6. *Publicaciones por año*



En la figura 7 se incluyen porcentualmente el número de publicaciones por tipo de documento luego de la selección y depuración, observándose valores similares entre artículos y documentos presentados en conferencias que hayan pasado por un proceso de revisión por pares y se encuentren en documento extenso.

Figura 7. Publicaciones por tipo de documento



3. Resultados

A continuación, se agrupan por preguntas de investigación, las publicaciones que permiten identificar las características y algoritmos empleados en la predicción del consumo de energía en edificios inteligentes.

Respecto a RQ1. ¿Cuáles son las características clave que deben considerarse para tener una gestión de manera anticipada y eficiente de los recursos en edificios inteligentes?

Para gestionar eficientemente los recursos en edificios inteligentes, se destacan varias características clave:

La integración de IoT y Sensores mejora la eficiencia operativa y la gestión de datos en tiempo real, optimizando el consumo energético y sistemas HVAC (Choi & Rhee, 2014). Así, los sistemas de Gestión Energética (EMS) facilitan el monitoreo y control energético, permitiendo la identificación de ineficiencias y promoviendo prácticas de construcción sostenible (Kumar et al., 2021; W. Li et al., 2021; Maatoug et al., 2023). El uso de controladores y IoT para ajustar el consumo según necesidades, mejorando la precisión en predicciones de demanda (Ahmed et al., 2022; Jiang et al., 2022). Las tecnologías inteligentes optimizan rutinas y mejoran la eficiencia energética

con modelos predictivos y algoritmos en tiempo real (González-Vidal et al., 2019; Kim et al., 2018). Se logra sostenibilidad y Eficiencia Energética a través de la detección de anomalías y ajuste automático de condiciones internas para maximizar eficiencia y confort (Annadurai et al., 2022; Lee et al., 2022; Z. Wang et al., 2021). El monitoreo remoto y uso de aprendizaje automático para mejorar la eficiencia energética (Al-Shargabi et al., 2022). La automatización y diseño de espacios inteligentes para optimizar recursos (Dylan et al., 2021; K. Li et al., 2022). Y, la gestión Integral y mantenimiento Predictivo previenen fallos y mejoran el rendimiento con un enfoque en la recopilación de datos y mantenimiento predictivo (Carli et al., 2020; Z. Wang & Srinivasan, 2017; Zekić-Sušac et al., 2021). Por último, las tecnologías emergentes como la IA e IoT están revolucionando la eficiencia energética, mejorando la precisión en la gestión (Hernández-Callejo et al., n.d.; Metallidou et al., 2020; Z. Wang et al., 2021).

Respecto a RQ2. ¿Cómo pueden los algoritmos de aprendizaje automático emplearse para optimizar el consumo energético?

Los algoritmos de aprendizaje automático (ML) pueden optimizar el consumo energético en edificios inteligentes mediante diversas estrategias. Así, los modelos predictivos mejoran la eficiencia energética y el bienestar al anticipar patrones de consumo (Balaji & Karthik, 2023). Incorporan IoT para una gestión proactiva (Bedi et al., 2020; Medhat et al., 2020). Optimizan el consumo gracias a datos recopilados por sensores en tiempo real (M. Wang et al., 2018). Permiten identificar patrones inusuales para corregir ineficiencias rápidamente (Chou & Tran, 2018; Do & Cetin, 2018). Permite reducir costos operativos y optimizar recursos (Shi et al., 2022). Mejora del Confort a través del ajuste de condiciones internas para el confort de ocupantes en tiempo real (K. Li et al., 2022; J. Sun et al., 2022; Y. Sun et al., 2017). Por ello, se resalta la eficiencia y aplicabilidad de algoritmos de ML en la gestión energética,

destacando el Random Forest para obtener predicciones precisas (Khaoula et al., 2023; Somu et al., 2021). Algunas aplicaciones prácticas de ML muestran reducciones significativas en consumo energético (Khaoula et al., 2023; Somu et al., 2021; W.-C. Wang et al., 2023). El uso de diversas plataformas facilita la gestión energética en edificios inteligentes (Blechmann et al., 2023; Moura et al., 2021; Silva et al., 2018); con ello se logra optimizar la eficiencia energética contribuyendo a la sostenibilidad y reducción de emisiones (Hernández-Callejo et al., n.d.; Moura et al., 2021; W.-C. Wang et al., 2023). Otro aspecto que destacar es la Integración optimizada mediante ML y el uso de redes inalámbricas para maximizar y mejorar la gestión energética (M. Wang et al., 2018). Lograr eficiencia en predicciones energéticas con ML (Casado-Vara et al., 2020) y la implementación de sistemas avanzados para la gestión de sistemas activos y pasivos (Rajaoarisoa et al., 2023) generan un impacto positivo de sistemas inteligentes en eficiencia energética (Broday & da Silva, 2023).

4. Conclusiones

Las conclusiones del estudio resaltan el papel fundamental de edificios inteligentes y tecnologías emergentes como Internet de las Cosas (IoT) y aprendizaje automático (ML) en la optimización del consumo energético. A través de una revisión sistemática basada en el enfoque PRISMA, se identificaron brechas en la comparación de modelos predictivos y su aplicación práctica para mejorar la eficiencia energética. Se destaca la necesidad de desarrollar modelos más precisos y adaptables que capten dependencias espaciotemporales para una gestión eficiente de los recursos.

Los algoritmos de ML, como Random Forest y kCNN-LSTM, demostraron alta eficacia en la predicción del consumo energético, destacando la importancia de ajustar los modelos según las características específicas de cada edificio.

La integración de IoT con estos algoritmos ha mostrado mejoras significativas en la precisión y rapidez de las predicciones. Esto sugiere un impacto positivo no solo en la eficiencia energética, sino también en la calidad de vida de los ocupantes, además de contribuir a los objetivos ambientales y económicos de construcciones sostenibles.

En la búsqueda de modelos predictivos para la gestión eficiente de recursos, estudios recientes (Khaoula et al., 2023; Somu et al., 2021) destacan que kCNN-LSTM es especialmente efectivo en aprender dependencias espaciotemporales, mientras que Random Forest sobresale en precisión y minimización de errores. Estos hallazgos subrayan la importancia de seleccionar y ajustar cuidadosamente los algoritmos de ML de acuerdo con los datos específicos y objetivos de eficiencia.

Adicionalmente, (Balaji & Karthik, 2023) presentan el sistema IoT-EP, que ofrece alto rendimiento en la predicción del consumo energético. La recolección de datos mediante dispositivos IoT permite una gestión energética más informada y proactiva. La baja varianza y alta correlación del modelo IoT-EP, junto con su eficiente tiempo de entrenamiento y velocidad de predicción, lo convierten en una solución altamente eficaz para la optimización energética. Estos estudios colectivamente enfatizan la importancia de algoritmos precisos y eficientes, la recolección y análisis de datos relevantes, el uso de tecnologías avanzadas para una gestión energética optimizada y la elección del modelo adecuado depende de las características específicas del edificio y sus patrones de consumo, lo que resalta la necesidad de un enfoque personalizado. Una continua evaluación y comparación de modelos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones en la optimización del consumo energético, contribuyendo positivamente al impacto económico, ambiental y social.

Finalmente, se sugiere la inclusión de recopilación de datos de consumo

mediante IoT, selección de variables clave para predecir patrones de consumo, evaluación y validación de modelos de ML para mejorar la toma de decisiones y la calidad de vida en entornos construidos. Esto contribuirá al impacto positivo en los aspectos económicos, ambientales y sociales de los edificios inteligentes.

5. Referencias

- Abaimov, S., & Martellini, M. (2022). Understanding Machine Learning. In *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications* (pp. 15–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91585-8_2
- Ahmad, I., Shahabuddin, S., Sauter, T., Harjula, E., Kumar, T., Meisel, M., Juntti, M., & Ylianttila, M. (2021). The Challenges of Artificial Intelligence in Wireless Networks for the Internet of Things: Exploring Opportunities for Growth. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15(1), 16–29. <https://doi.org/10.1109/MIE.2020.2979272>
- Ahmed, M. A., Chavez, S. A., Eltamaly, A. M., Garces, H. O., Rojas, A. J., & Kim, Y.-C. (2022). Toward an Intelligent Campus: IoT Platform for Remote Monitoring and Control of Smart Buildings. *Sensors*, 22(23). <https://doi.org/10.3390/s22239045>
- Al-Shargabi, A. A., Almhafdy, A., Ibrahim, D. M., Alghieth, M., & Chiclana, F. (2022). Buildings' energy consumption prediction models based on buildings' characteristics: Research trends, taxonomy, and performance measures. *Journal of Building Engineering*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104577>
- Annadurai, C., Nelson, I., Devi, K. N., Manikandan, R., Jhanjhi, N. Z., Masud, M., & Sheikh, A. (2022). Biometric Authentication-Based Intrusion Detection Using Artificial Intelligence Internet of Things in Smart City. *Energies*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/en15197430>
- Balaji, S., & Karthik, S. (2023). Energy Prediction in IoT Systems Using Machine Learning Models. *Computers, Materials and Continua*, 75(1), 443–459. <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.035275>
- Barker, O. (2020). Realizing the Promise of the Internet of Things in Smart Buildings. *Computer*, 53(2), 76–79. <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2952419>

- Bedi, G., Venayagamoorthy, G. K., & Singh, R. (2020). Development of an IoT-driven building environment for prediction of electric energy consumption. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(6), 4912–4921. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2975847>
- Blechmann, S., Sowa, I., Schraven, M. H., Streblov, R., Müller, D., & Monti, A. (2023). Open source platform application for smart building and smart grid controls. *Automation in Construction*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104622>
- Bourdeau, M., qiang Zhai, X., Nefzaoui, E., Guo, X., & Chatellier, P. (2019). Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 48). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101533>
- Brodav, E. E., & da Silva, M. C. G. (2023). The role of internet of things (IoT) in the assessment and communication of indoor environmental quality (IEQ) in buildings: a review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(3), 584–606. <https://doi.org/10.1108/SASBE-10-2021-0185>
- Carli, R., Cavone, G., Othman, S. B., & Dotoli, M. (2020). IoT based architecture for model predictive control of HVAC systems in smart buildings. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030781>
- Casado-Vara, R., Rey, A. M., Affes, S., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2020). IoT network slicing on virtual layers of homogeneous data for improved algorithm operation in smart buildings. *Future Generation Computer Systems*, 102, 965–977. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.09.042>
- Choi, H.-S., & Rhee, W.-S. (2014). IoT-based user-driven service modeling environment for a smart space management system. *Sensors (Switzerland)*, 14(11), 22039–22064. <https://doi.org/10.3390/s141122039>
- Chou, J.-S., & Tran, D.-S. (2018). Forecasting energy consumption time series using machine learning techniques based on usage patterns of residential householders. *Energy*, 165, 709–726. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.144>
- Do, H., & Cetin, K. S. (2018). Residential Building Energy Consumption: a Review of Energy Data Availability, Characteristics, and Energy Performance Prediction Methods. *Current Sustainable/Renewable*

- Energy Reports*, 5(1), 76 – 85. <https://doi.org/10.1007/s40518-018-0099-3>
- Dylan, T., Durrant, A. C., & Cerci, S. (2021). Lanterns configuring a digital resource to inspire preschool children’s free play outdoors. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. <https://doi.org/10.1145/3411764.3445745>
- González-Vidal, A., Jiménez, F., & Gómez-Skarmeta, A. F. (2019). A methodology for energy multivariate time series forecasting in smart buildings based on feature selection. *Energy and Buildings*, 196, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.021>
- Hernández-Callejo, L., Gómez, A., Nesmachnow, S., Leite, V., Prieto, J., & Ferreira, Â. (n.d.). *CITIES Energetic Efficiency, Sustainability; Infrastructures, Energy and the Environment; Mobility and IoT; Governance and Citizenship*. www.mdpi.com/journal/applsci
- Hoy, M. B. (2016). Smart Buildings: An Introduction to the Library of the Future. *Medical Reference Services Quarterly*, 35(3), 326–331. <https://doi.org/10.1080/02763869.2016.1189787>
- Jiang, J., Liu, F., Ng, W. W. Y., Tang, Q., Wang, W., & Pham, Q.-V. (2022). Dynamic Incremental Ensemble Fuzzy Classifier for Data Streams in Green Internet of Things. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 6(3), 1316–1329. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2022.3151716>
- Juniper Research. (2024, November 10). *Smart Buildings Market Trends, Size, Strategies 2024-29*.
- Khanna, A., Arora, S., Chhabra, A., Bhardwaj, K. K., & Sharma, D. K. (2019). IoT architecture for preventive energy conservation of smart buildings. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 206, pp. 179–208). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7399-2_8
- Khaoula, E., Amine, B., & Mostafa, B. (2023). Evaluation and Comparison of Energy Consumption Prediction Models Case Study: Smart Home. In *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (Vol. 164, pp. 179–187). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27762-7_17

- Kim, J., Jeon, Y., & Kim, H. (2018). The intelligent IoT common service platform architecture and service implementation. *Journal of Supercomputing*, 74(9), 4242–4260. <https://doi.org/10.1007/s11227-016-1845-1>
- Kumar, A., Sharma, S., Goyal, N., Singh, A., Cheng, X., & Singh, P. (2021). Secure and energy-efficient smart building architecture with emerging technology IoT. *Computer Communications*, 176, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.06.003>
- Kuo, S.-Y., Huang, X.-R., & Chen, L.-B. (2022). Smart ports: Sustainable smart business port operation schemes based on the Artificial Intelligence of Things and blockchain technologies. *IEEE Potentials*, 41(6), 32–37. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2022.3198808>
- Lee, C.-T., Chen, L.-B., Chu, H.-M., & Hsieh, C.-J. (2022). Design and Implementation of a Leader-Follower Smart Office Lighting Control System Based on IoT Technology. *IEEE Access*, 10, 28066–28079. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3158494>
- Li, K., Zhao, J., Hu, J., & Chen, Y. (2022). Dynamic energy efficient task offloading and resource allocation for NOMA-enabled IoT in smart buildings and environment. *Building and Environment*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109513>
- Li, W., Li, H., & Wang, S. (2021). An event-driven multi-agent based distributed optimal control strategy for HVAC systems in IoT-enabled smart buildings. *Automation in Construction*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103919>
- Louridas, P., & Ebert, C. (2016). Machine Learning. *IEEE Software*, 33(5), 110–115. <https://doi.org/10.1109/MS.2016.114>
- Maatoug, A., Belalem, G., & Mahmoudi, S. (2023). A location-based fog computing optimization of energy management in smart buildings: DEVS modeling and design of connected objects. *Frontiers of Computer Science*, 17(2). <https://doi.org/10.1007/s11704-021-0375-z>
- Medhat, M., El-Shafey, K., & Rashed, A. (2020). IoT-fog based smart-building security system design and performance evaluation. *Journal of Computer Science*, 16(9), 1325–1333. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2020.1325.1333>

- Metallidou, C. K., Psannis, K. E., & Egyptiadou, E. A. (2020). Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches. *IEEE Access*, 8, 63679–63699. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984461>
- Moura, P., Moreno, J. I., López, G. L., & Alvarez-Campana, M. (2021). IoT platform for energy sustainability in university campuses. *Sensors (Switzerland)*, 21(2), 1–22. <https://doi.org/10.3390/s21020357>
- Pašek, J., & Sojková, V. (2018). Facility management of smart buildings. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(2), 181–187. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.2.15>
- Rajamohan, K., Rangasamy, S., Pinto, N. A., Manoj, B. E., Mukherjee, D., & Shukla, J. (2023). IoVST: Internet of vehicles and smart traffic - Architecture, applications, and challenges. In *Handbook of Research on Machine Learning-Enabled IoT for Smart Applications Across Industries* (pp. 292–315). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8785-3.ch015>
- Rajaoarisoa, L., M’Sirdi, N. K., Sayed-Mouchaweh, M., & Clavier, L. (2023). Decentralized fault-tolerant controller based on cooperative smart-wireless sensors in large-scale buildings. *Journal of Network and Computer Applications*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103605>
- Rico, A., Smuts, C., & Larson, K. (2022). Chameleon: Adaptive Sensor Intelligence for Smart Buildings. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(19), 19362–19372. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3165349>
- Shi, C., Liu, P., Chen, Y., Zhou, Z., Yang, J., Zhao, C., Chen, B., Yang, S., & Mumtaz, S. (2022). Adversarial learning-based multi-timescale network resource management in multi-mode green IoT network for smart building. *IET Communications*, 16(14), 1739–1751. <https://doi.org/10.1049/cmu2.12441>
- Silva, C., Costa, N., Grilo, C., & Veloz, J. (2018). JavaScript middleware for mobile agents support on desktop and mobile platforms. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 721). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_70
- Somu, N., R, G. R. M., & Ramamritham, K. (2021). A deep learning framework for building energy consumption forecast. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 137.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110591>
- Sun, J., Kuruganti, T., Fricke, B., Xuan, S., Li, Y., Wilkerson, W., & Cunningham, C. (2022). Automated fault detection and diagnosis deployment Internet of Things solution for building energy system. *Journal of Building Engineering*, 61.
<https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105291>
- Sun, Y., Wu, T.-Y., Li, X., & Guizani, M. (2017). A Rule Verification System for Smart Buildings. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 5(3), 367–379. <https://doi.org/10.1109/TETC.2016.2531288>
- Wang, M., Yeh, W.-C., Chu, T.-C., Zhang, X., Huang, C.-L., & Yang, J. (2018). Solving multi-objective fuzzy optimization in wireless smart sensor networks under uncertainty using a hybrid of IFR and SSO algorithm. *Energies*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/en11092385>
- Wang, W.-C., Dwijendra, N. K. A., Sayed, B. T., Alvarez, J. R. N., Al-Bahrani, M., Alviz-Meza, A., & Cárdenas-Escrocía, Y. (2023). Internet of Things Energy Consumption Optimization in Buildings: A Step toward Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8).
<https://doi.org/10.3390/su15086475>
- Wang, Z., Liu, J., Zhang, Y., Yuan, H., Zhang, R., & Srinivasan, R. S. (2021). Practical issues in implementing machine-learning models for building energy efficiency: Moving beyond obstacles. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 143). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110929>
- Wang, Z., & Srinivasan, R. S. (2017). A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 75, pp. 796–808). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.079>
- Yan, Y. (2022). Machine Learning Fundamentals. In *Machine Learning in Chemical Safety and Health: Fundamentals with Applications* (pp. 19–46). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119817512.ch2>
- Zekić-Sušac, M., Has, A., & Knežević, M. (2021). Predicting energy cost of public buildings by artificial neural networks, CART, and random forest.



Neurocomputing, 439, 223–233.
<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.01.124>