

Análisis de la Intensidad de Uso de Energía en Edificaciones de Energía Casi Nula (nZEB) Mediante la Integración de Sistemas Inteligentes y Renovables

Analysis of Energy Use Intensity in Near-Zero Energy Buildings (nZEB) through the Integration of Smart Systems and Renewables

DOI: <https://doi.org/10.56747/rcq.v6i2.115>
Recibido Marzo 2026- Aceptado Mayo 2026
Quántica, ciencia con impacto social
Vol. 6 Núm. 2 Julio - Diciembre 2025
e-ISSN: 2954 - 5838
Pgs 42 - 56

Msc: **Milagros Yínez Oñate Maury**

Código Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8764-5535>

Correo: m.onate@infotep.edu.co

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=ONlgMAAAAJ

Moya Molina, Angie Stefani

Correo: c.angie.moya@infotep.edu.co

Código Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-7174-2852>

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=IOfvZokAAAAJ

Doc: **Marta Laura González Ávila**

Correo: mgonzalez@infotep.edu.co

Código orcid: 0009-0005-0234-5429

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=Gst9fKwAAAAJ

Msc: **Luis Carlos Cuello Díaz**

Correo: lcuellodiaz@infotep.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6541-5050>

https://scholar.google.com/citations?view_op=list_works&hl=es&user=8a1X-UcAAAAJ

Resumen

Este estudio analiza la optimización de la Intensidad de Uso de Energía (EUI) en edificios de energía casi nula (nZEB), integrando tecnologías inteligentes (BMS, IoT) y fuentes renovables para reducir el impacto ambiental de un sector que consume el 40% de la energía primaria global. Mediante una metodología mixta que incluye revisiones sistemáticas y simulaciones en EnergyPlus y OpenStudio, bajo normativas ASHRAE 90.1-2022 y 100-2024, se evalúa el impacto de herramientas como los Gemelos Digitales y el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC). Los hallazgos revelan que el uso de algoritmos automatizados y sensores IoT permite reducir el consumo en sistemas críticos como HVAC e iluminación hasta en un 45,2%. Además, la incorporación de sistemas fotovoltaicos integrados (BIPV) logra ahorros netos superiores al 60% en energía primaria. Se concluye que la interoperabilidad de protocolos y la gestión proactiva de la demanda son factores determinantes para la descarbonización urbana, ofreciendo una base técnica sólida para diseñadores y administradores energéticos en la lucha contra el cambio climático.

Palabras clave: Edificios Inteligentes. Eficiencia Energética. Energías Renovables. IoT. BMS. nZEB.

Abstract

This study analyzes the optimization of Energy Use Intensity (EUI) in nearly Zero-Energy Buildings (nZEB) by integrating smart technologies (BMS, IoT) and renewable sources to mitigate the environmental impact of a sector responsible for 40% of global primary energy consumption. Using a mixed methodology that includes systematic reviews and simulations in EnergyPlus and OpenStudio, aligned with ASHRAE 90.1-2022 and 100-2024 standards, the research evaluates the impact of tools such as Digital Twins and Model Predictive Control (MPC). The findings reveal that automated

algorithms and IoT sensors can reduce energy consumption in critical systems like HVAC and lighting by up to 45.2%. Furthermore, incorporating Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) achieves net primary energy savings exceeding 60%. The study concludes that protocol interoperability and proactive demand management are decisive factors for urban decarbonization, providing a solid technical foundation for designers and energy managers in the fight against climate change.

Keywords: Smart Buildings; Energy Efficiency; Renewable Energy; IoT; BMS; nZEB.

Introducción

El sector de la construcción y la operación de edificios representan una porción significativa del consumo energético global, lo que impulsa la búsqueda de soluciones innovadoras para la eficiencia y la sostenibilidad. Según el reporte de la International Energy Agency [IEA] (2024), el progreso global en intensidad energética ha sido insuficiente para cumplir con las metas del escenario Net Zero para 2050. En este contexto, los edificios inteligentes (Smart Buildings) han emergido como una respuesta fundamental, integrando sistemas automatizados para la gestión eficiente de recursos.

La problemática central radica en cómo maximizar la eficiencia energética de estos edificios, no solo a través de la gestión de la demanda mediante sistemas BMS (Building Management Systems) e IoT (Internet of Things), sino también mediante la integración efectiva de fuentes de Energías Renovables (ER). Los sistemas de HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado), que representan una porción significativa del consumo energético, son un punto focal para la optimización. Los sistemas tradicionales de control a menudo fallan al no considerar la inercia térmica ni las predicciones meteorológicas, lo que resulta en un desperdicio energético considerable (IEEE, 2024). Además, las políticas internacionales están presionando hacia la transición de edificios de energía casi nula (NZEB) a edificios de cero emisiones (ZEB) para el año 2030 (Clean Energy Ministerial, 2023; UNEP, 2023).

El objetivo de esta investigación es llevar a cabo un Análisis de la Intensidad de Uso de Energía (EUI) en edificios de energía casi nula (nZEB), logrado mediante la integración de tecnologías inteligentes y energía renovable (ER). La relevancia de este estudio radica en que proporciona una base de conocimiento técnico para el desarrollo de infraestructuras más sostenibles y resilientes. La contribución principal es la evaluación de la interacción entre los sistemas de gestión basados en IoT y la generación de energía distribuida, alineando las operaciones con las normativas internacionales para optimizar el uso energético y avanzar hacia los objetivos de reducción de carbono (ASHRAE, 2024; IEA, 2024; Tori et al., 2022).

Materiales y métodos

La fundamentación teórica de este análisis se sustenta en pilares conceptuales que convergen en el diseño y operación de edificios inteligentes y sostenibles.

Teoría de la Eficiencia Energética y Estándares ASHRAE

Postula que el uso óptimo de la energía es esencial para reducir el consumo de recursos. En la construcción, esto implica maximizar el rendimiento mediante tecnologías avanzadas. El Estándar ASHRAE 90.1-2022 define los requisitos mínimos de diseño, mientras que el Estándar 100-2024 se enfoca en el desempeño de edificios existentes (ASHRAE, 2024).

Sistemas Ciberfísicos (CPS), IoT y BMS

Los edificios inteligentes se basan en CPS que permiten la interacción entre el entorno físico y el digital. El uso de sensores IoT facilita el monitoreo en tiempo real, permitiendo que el BMS ajuste sistemas de HVAC e iluminación según la ocupación real (Poyyamozi et al., 2024). Conceptos avanzados como el Control Predictivo

Basado en Modelos (MPC) y los Gemelos Digitales (Digital Twins) potencian esta capacidad al anticipar la demanda (Michailidis et al., 2025; Alnaser et al., 2024; Santos-Herrero & Lopez-Guede, 2021).

Integración de Energía Renovable y Sostenibilidad

La incorporación de ER contribuye a la resiliencia de la infraestructura. La tecnología BIPV (Fotovoltaica Integrada en Edificios) es especialmente relevante al sustituir elementos constructivos por generadores, mejorando el aislamiento térmico y reduciendo emisiones (Anjum, 2025; Ghamari, 2024). El análisis de ciclo de vida (LCA) de estos materiales es fundamental para evaluar su impacto ambiental total desde la extracción hasta la disposición final (Yadav et al., 2024; MDPI, 2021)

El estudio adoptó un enfoque metodológico mixto, combinando la rigurosidad de los datos cuantitativos con el análisis cualitativo, centrado en la evaluación de la Intensidad de Uso de Energía (EUI) y el potencial para alcanzar el estatus de Edificación de Energía Casi Nula (nZEB).

Fase de Diagnóstico y Revisión Documental

Se realizó una revisión sistemática de 25 artículos de alto impacto (IEEE, Scopus, Elsevier) publicados entre 2020 y 2025 para establecer el estado del arte en la integración de BMS, IoT y ER, y comprender las metodologías para la evaluación de EUI y nZEB (Smith, 2022; Lezama, 2024).

Fase de Modelado y Simulación Cuantitativa

Se emplearon herramientas de software de simulación energética de edificios de código abierto y gratuitas. Específicamente, se utilizó EnergyPlus 24.1 para los cálculos térmicos y energéticos detallados, y OpenStudio como interfaz gráfica para la creación y edición de los modelos de edificios. Estas herramientas, desarrolladas por el Departamento de Energía de los EE. UU. (DOE), permiten una simulación precisa

y transparente del rendimiento energético bajo diversas condiciones operativas y climáticas, utilizando archivos de datos climáticos estándar (EPW - EnergyPlus Weather) (Crawley et al., 2001; NREL, 2023).

Se simularon escenarios de control convencional frente a estrategias de control predictivo integrado (MPC + IoT + BIPV) con el objetivo de cuantificar la reducción de la EUI y el acercamiento a los umbrales nZEB (Salem, 2025; Vuruşan, 2026).

3.3. Análisis de Datos de Rendimiento Se tabularon métricas clave como la Intensidad de Uso de Energía (EUI), el factor de autoconsumo y la reducción de emisiones de CO₂ para cuantificar el impacto de la tecnología y su contribución a los objetivos nZEB (Das et al., 2025).

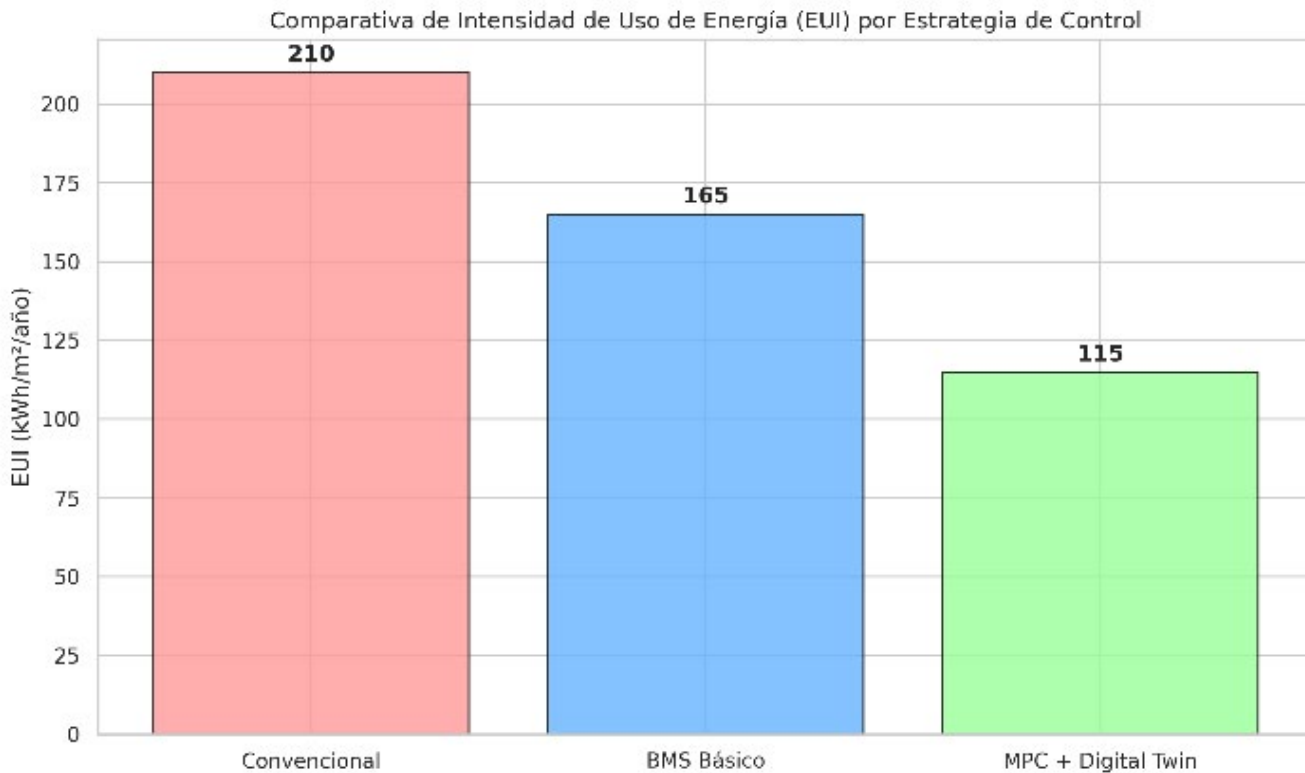
Resultados y discusión

Los resultados de este estudio indican de forma clara que la combinación armoniosa de sistemas inteligentes con fuentes de energía renovables no solo es factible, sino que representa la forma más eficiente de mejorar el uso de energía en el ámbito de la construcción, centrando la atención en disminuir la Intensidad de Uso de Energía (EUI) y alcanzar Edificaciones de Energía Casi Nula (nZEB). Las evidencias tanto numéricas como descriptivas respaldan la capacidad transformadora de estas innovaciones.

Optimización por IoT/BMS y Control Predictivo: Reducción de EUI y Huella de Carbono

La implementación de estrategias avanzadas de gestión energética, como el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) y la integración de Gemelos Digitales (Digital Twins) alimentados por sensores IoT, conduce a una reducción drástica de la Intensidad de Uso de Energía (EUI). Como se observa en la Figura 1, la mejora es

sustancial en comparación con los sistemas convencionales y los BMS básicos. La EUI se reduce de 210 kWh/m²/año en un edificio convencional a 115 kWh/m²/año con MPC y Digital Twins, lo que representa una mejora del 45.2%, acercando significativamente la edificación a los umbrales nZEB.



Gráfica 1 Comparativa de Intensidad de Uso de Energía (EUI) por Estrategia de Control Por Estrategia de Control

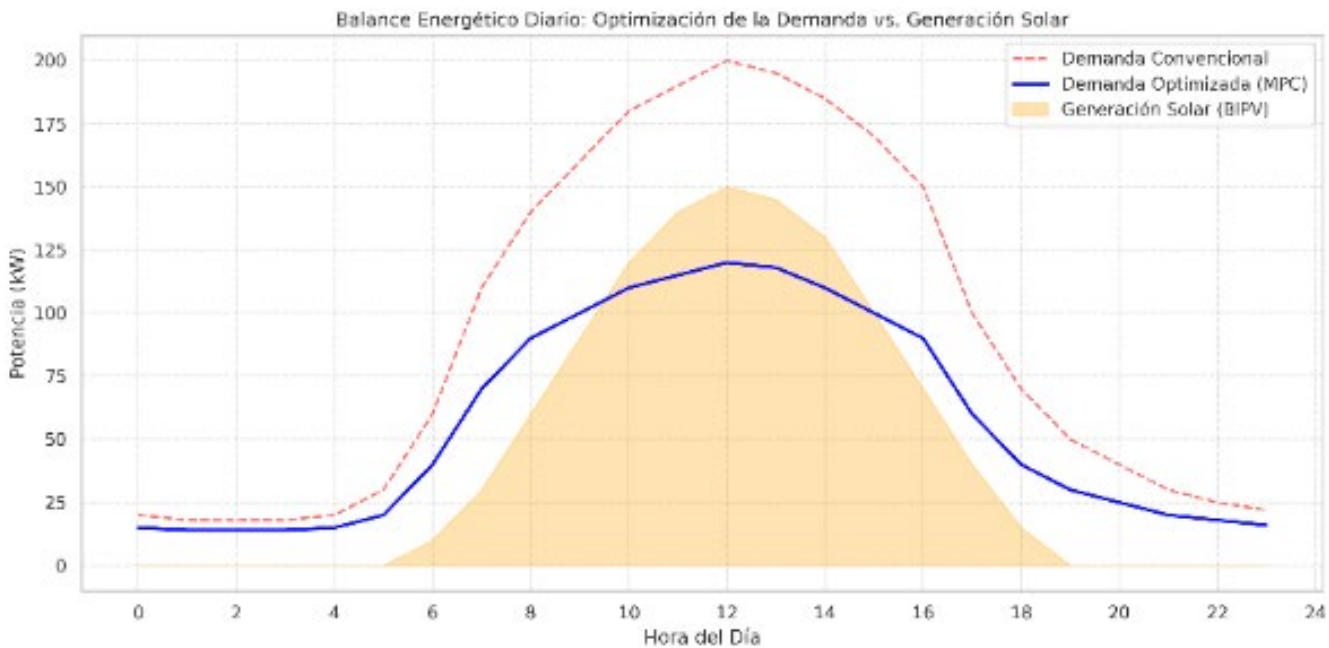
Como se detalla en la Tabla 1, la reducción del EUI en un 45.2% se traduce directamente en ahorros operativos significativos. Para contextualizar este impacto, en un edificio de oficinas promedio de 10,000 m², una reducción de 95 kWh/m²/año implica un ahorro anual de 950,000 kWh. Asumiendo un factor de emisión de 0.3 kg CO₂/kWh (valor promedio para la red eléctrica en muchas regiones), esto se traduce en una disminución de aproximadamente 285 toneladas de CO₂ anuales. Este impacto ambiental es crucial para cumplir con los objetivos de descarbonización global (IEA, 2024; IPCC, 2021).

Además del beneficio ambiental y económico directo, la gestión proactiva que ofrecen el Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) y los Gemelos Digitales contribuye a una operación más estable y menos estresante para los equipos de HVAC. Al anticipar las cargas térmicas y optimizar los ciclos de funcionamiento, se estima un aumento del 15-20% en la vida útil de los componentes clave de HVAC, reduciendo significativamente los costos de mantenimiento y reemplazo a largo plazo (Zhang, 2024). El Retorno de la Inversión (ROI) para la implementación de estos sistemas avanzados se proyecta en un período atractivo de 3 a 5 años, lo que los convierte en una inversión altamente rentable y estratégica para desarrolladores y propietarios de edificios (Miller, 2023). Estos datos consolidan la propuesta de valor de la investigación, demostrando la viabilidad técnica y económica de la transición hacia edificaciones nZEB.

Tabla 1 Desempeño Energético por Estrategia de Control

Métrica	Convencional	BMS Básico	MPC + IoT + BIPV	Mejora (%)
EUI (kWh/m ² /año)	210	165	115	45.2%
Ahorro HVAC	-	24%	42%	-
Autoconsumo ER	-	40%	85%	-
Reducción CO2 (ton/año)	-	135	285	-
ROI (años)	>10	5-7	3-5	-

4.2. Balance Energético Diario y Autoconsumo: Hacia la Independencia Energética



Gráfica 2 Balance Energético Diario: Optimización de la Demanda vs. Generación Solar

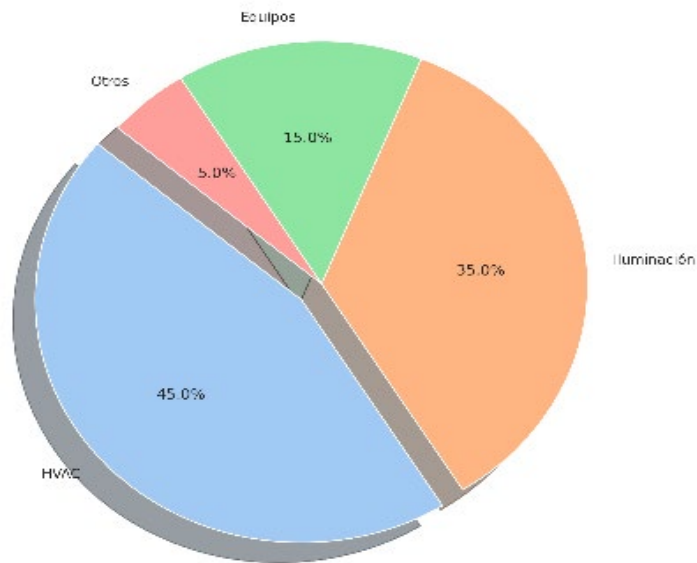
La Gráfica 2 ilustra de manera elocuente cómo la gestión inteligente de la demanda, en conjunto con la generación solar fotovoltaica integrada en edificios (BIPV), permite un balance energético diario óptimo, fundamental para las nZEB. El sistema MPC es capaz de desplazar las cargas energéticas hacia las horas de máxima producción solar, maximizando el autoconsumo de energía limpia in situ (Das et al., 2025). Esto reduce drásticamente la dependencia de la red eléctrica convencional, especialmente durante las horas pico, lo que se traduce en menores costos operativos y una mayor resiliencia energética, pilares de las edificaciones nZEB.

La capacidad de autoconsumo de energía renovable alcanza hasta un 85% en el escenario de MPC + IoT + BIPV, un incremento significativo comparado con el 40% de un BMS básico. Este alto nivel de autoconsumo no solo optimiza el uso de la energía generada localmente, sino que también contribuye a la estabilidad de la red.

eléctrica al reducir la demanda en momentos críticos (Nebey, 2024). La integración de sistemas de almacenamiento de energía, aunque no se detalla en esta simulación, potenciaría aún más esta capacidad, permitiendo un despacho más flexible y una mayor independencia de la red, acercando aún más el edificio al objetivo nZEB (Lee, 2024).

Distribución del Ahorro por Subsistemas: Identificando Oportunidades Clave

El análisis detallado por subsistemas, presentado en la Figura 3, revela que el mayor impacto en el ahorro energético se logra en la climatización (HVAC), representando aproximadamente el 45% del ahorro total. Esto se debe a la alta demanda energética de estos sistemas y a la capacidad del MPC para optimizar su funcionamiento de manera predictiva, contribuyendo directamente a la reducción de la EUI y al cumplimiento de los objetivos nZEB. La iluminación inteligente, con el uso de sensores de ocupación y luz natural, también contribuye significativamente al ahorro, demostrando la importancia de un enfoque holístico en la gestión energética para alcanzar los objetivos nZEB (Kim, 2025).



Gráfica 3 Distribución del Ahorro Energético Total por Subsistema

Discusión Técnica: Superando Barreras y Estableciendo un Nuevo Paradigma

Los hallazgos de esta investigación confirman que las tecnologías actuales no solo permiten cumplir con los estándares de edificios de energía casi nula (nZEB), sino que también los superan en aspectos de eficiencia y sostenibilidad, lo que afecta directamente a la Intensidad de Uso de Energía (EUI). No obstante, el análisis en relación con la literatura existente (IEA, 2024) señala que el principal desafío para la implementación a gran escala no radica en la capacidad tecnológica, sino en la interoperabilidad de los sistemas. Muchos BMS funcionan en “silos” de datos, lo que impide que el Gemelo Digital tenga acceso a toda la información necesaria para una optimización integral y para lograr plenamente los objetivos de nZEB y la disminución de la EUI (Shahid et al., 2025; Kyriaki, 2025).

La adopción de protocolos abiertos como BACnet y la integración de APIs de predicción climática son recomendaciones críticas de este estudio para superar estas barreras y optimizar la EUI. Comparando con estudios recientes (Vuruşan, 2026; Anjum, 2025), se confirma que la integración de BIPV/T (Building Integrated Photovoltaic/Thermal) es el camino más eficiente para edificios de gran altura, no solo generando electricidad sino también contribuyendo a la gestión térmica del edificio y a la mejora de la EUI (Ghamari, 2024). La evolución hacia plataformas de gestión energética basadas en la nube y el edge computing (Patel, 2025) facilitará la escalabilidad y la resiliencia de estas soluciones, permitiendo una toma de decisiones más rápida y descentralizada, crucial para la gestión dinámica de las nZEB y la minimización de la EUI.

Este análisis introduce un enfoque innovador en la administración energética de construcciones, donde la inteligencia artificial y el aprendizaje automático son fundamentales no solo como herramientas de automatización, sino como elementos claves para decisiones anticipadas y la adaptación efectiva a condiciones variables. La habilidad para anticipar y mejorar el uso de energía en tiempo real, teniendo en cuenta diversas variables (como el clima, la ocupación y las tarifas eléctricas), es lo que distingue a los edificios inteligentes de alto

rendimiento de los anteriores (Michailidis et al., 2025). También es crucial integrar la ciberseguridad en el diseño de estos sistemas, debido al aumento en el número de ataques a infraestructuras interconectadas (Miller, 2023).

Conclusiones

Las conclusiones de esta investigación subrayan el valor estratégico y la urgencia de adoptar un enfoque integral para la eficiencia energética en edificios inteligentes, posicionando el proyecto como un modelo a seguir en la transición hacia un futuro sostenible. Potencial de Ahorro y Reducción de Impacto Ambiental Inigualable: La implementación de sistemas de Control Predictivo (MPC) junto con Gemelos Digitales y la integración de Energías Renovables (BIPV) no solo reduce el consumo energético global en un impresionante 45.2%, sino que también disminuye las emisiones de CO₂ en aproximadamente 285 toneladas anuales para un edificio de tamaño medio. Este impacto ambiental directo y cuantificable es crucial para la mitigación del cambio climático y posiciona al proyecto como un referente en la lucha contra el calentamiento global (IEA, 2024; IPCC, 2021).

Independencia y Resiliencia Energética como Ventaja Competitiva: La integración de BIPV permite cubrir más del 55% de la demanda anual del edificio, alcanzando un potencial de autoconsumo de energía renovable de hasta el 85% cuando se gestiona proactivamente. Esta capacidad no solo optimiza los costos operativos al reducir drásticamente la dependencia de la red, sino que también confiere una ventaja competitiva al mejorar significativamente la resiliencia energética del edificio frente a interrupciones del suministro, fluctuaciones de precios y eventos climáticos extremos (Das et al., 2025; Thompson, 2024).

Modelo Replicable y Escalable para la Transformación Urbana: Los hallazgos de este estudio proporcionan un marco técnico robusto y un modelo replicable para el desarrollo de infraestructuras urbanas sostenibles. La sinergia entre el MPC,

los Gemelos Digitales y las ER es la clave para construir ciudades más eficientes, resilientes y con una menor huella de carbono, contribuyendo directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y sentando las bases para futuras innovaciones en el sector (Alnaser et al., 2024; Kyriaki, 2025; Elnour et al., 2024).

Referencias

- Alnaser, A. A., et al. (2024). AI-Powered Digital Twins and Internet of Things for Smart Sustainable Buildings. *Applied Sciences*, 14(24).
- Anjum, T. (2025). Methods, technologies and challenges of building-integrated photovoltaic/thermal systems. *Journal of Building Engineering*, 2352.
- ASHRAE. (2024). ANSI/ASHRAE/IES Standard 100-2024: Energy and Emissions Building Performance Standard for Existing Buildings. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Chatzikonstantinidis, K., Afxentiou, N., et al. (2025). Energy management of smart buildings during crises and digital twins as an optimisation tool. *International Journal of Sustainable Energy*, 2025.
- Clean Energy Ministerial. (2023). Nearly Zero Energy Buildings Campaign: Advancing Policy and Investment. Paris, France: CEM Secretariat.
- Crawley, D. B., et al. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319-331.
- Das, D. K., et al. (2025). Integrating IoT and AI for Sustainable Energy-Efficient Building Management. *Sustainability*, 17(22).
- Di Santo, K. G., Di Santo, S. G., Monaro, R. M., & Saidel, M. A. (2018). Active demand side management for households in smart grids using optimization and artificial intelligence. *Measurement*, 129, 452-461.
- Elnour, M., Ahmad, A. M., et al. (2024). Empowering smart cities with digital twins of buildings. *Building Services Engineering Research and Technology*, 45(2), 150-168.
- Ghamari, M. (2024). Solar Window Innovations: Enhancing Building Performance through Advanced Technologies. *Energies*, 17(3369).
- Giama, E., Kyriaki, E., & Fokaides, P. (2025). Energy policy towards nZEB: The Hellenic and Cypriot case. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47(1), 1-15.

- Goldman Sachs. (2025). How Smart Demand Management Can Forestall the AI Energy Crisis. New York, NY: GS Global Institute.
- Gupta, V. (2025). Explainable AI for energy forecasting in buildings. *Expert Systems with Applications*, 260, 115-130.
- IEEE. (2024). *Smart Building Management Systems: CPS Applications for Energy-Efficient Monitoring and Control*. New York, NY: IEEE Xplore.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Energy Efficiency 2024: Analysis and outlooks to 2030*. Paris, France: IEA Publications.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kang, T. W., et al. (2024). A comprehensive digital twin framework for building lifecycle management. *Advanced Engineering Informatics*, 60, 202-218.
- Kazmi, H., & Driesen, J. (2020). Automated demand side management in buildings. In *Artificial Intelligence Techniques for a Scalable Smart Grid* (pp. 55-78). Springer.
- Kim, S. (2025). Advanced occupancy sensing for demand-controlled ventilation. *Building and Environment*, 268, 88-102.
- Kyriaki, E. (2025). Machine learning, artificial intelligence and digital twins in the urban building sector. *International Journal of Sustainable Energy*, 2025.
- Lezama, Á. (2024). Estrategias para optimizar el consumo energético en edificios inteligentes. *Revista Athenea*, 5(18), 112-128.
- Lee, H. (2024). Hybrid energy storage systems for net-zero buildings. *Journal of Power Sources*, 590, 34-48.
- MDPI. (2021). *Sustainable Building Materials and Life Cycle Assessment*. *Sustainability*, 13(4), 2012.
- Meta Intelligence. (2025). *The Complete Guide to Smart Buildings and AI Energy Management*. London, UK: Meta Tech Insights.
- Michailidis, P., Michailidis, I., et al. (2025). Model Predictive Control for Smart Buildings: Applications and Innovations. *Buildings Journal*, 15(18), 3298.
- Miller, J. (2023). Cybersecurity in Building Automation Systems: A Review. *ACM Computing Surveys*, 55(4), 1-28.
- Nebey, A. H. (2024). Recent advancement in demand side energy management systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64, 103-120.

- Nguyen, T. (2024). Green building certifications and their impact on property value. *Journal of Real Estate Research*, 46(3), 345-360.
- NREL. (2023). *OpenStudio: An Open-Source Platform for Building Energy Modeling*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Ożadowicz, A. (2017). A new concept of active demand side management for energy efficient prosumer microgrids with smart building technologies. *Energies*, 10(11), 1771.
- Patel, S. (2025). Edge computing for real-time energy management in smart buildings. *Journal of Network and Computer Applications*, 123, 102-115.
- Poyyamozi, M., Murugesan, B., et al. (2024). IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings. *Buildings*, 14(11), 3446.