



Revisión Sistemática Exploratoria: Tecnologías Ecológicas en la Construcción para Edificios Energéticamente Eficientes y Sostenibles

Systematic Review: Green Technologies in Construction for Energy Efficient and Sustainable Buildings

Eugenia Lyli, Moreira-Macías¹

Walter David, Cobeña-Loor²

David Alejandro, Cobeña-Macías³

Nicole Stefania, Bermello-Moreira⁴

Natalia Paola, Ríos-Mera⁵

¹ Universidad Internacional SEK (Ecuador), Quito, Ecuador

^{2,3,4} Universidad San Gregorio de Portoviejo, Portoviejo, Ecuador

⁵Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

¹ eugenia.moreira@uisek.edu.ec |  <https://orcid.org/0000-0003-3527-5015>

² wdcobena@sangregorio.edu.ec |  <https://orcid.org/0000-0002-8123-8496>

³ e.dacobena@sangregorio.edu.ec |  <https://orcid.org/0009-0004-5461-8161>

⁴ e.nsbermello@sangregorio.edu.ec |  <https://orcid.org/0009-0006-5758-3536>

⁵ natalia.rios@utm.edu.ec |  <https://orcid.org/0000-0002-3617-4833>

Recibido: 25/03/2025 **Aceptado:** 19/06/2025

RESUMEN | El artículo presenta un mapeo de la literatura científica sobre tecnologías verdes aplicadas en la construcción entre 2014 y 2024. El objetivo es identificar tecnologías efectivas que tengan el potencial para proporcionar una mejor eficiencia energética y ser más sostenibles. A través de una revisión sistemática exploratoria se seleccionaron 60 artículos de bases de datos como Elsevier, Springer y IEEE. Los resultados destacan tecnologías como paredes verdes, diseño pasivo, IoT, sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, IA y técnicas de impresión 3D. Se concluye que el poder de estas tecnologías a la hora de ahorrar energía y reducir las emisiones de CO₂ para convertirse así en más sostenible. Y ahí radica la importancia de las políticas del Gobierno y la colaboración intersectorial para potenciar el uso de estas tecnologías y cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible. Un trabajo de investigación que supone una hoja de ruta seria para futuras prácticas y estudios en materia de construcción sostenible.

PALABRAS CLAVE | Construcción, desarrollo-sustentable, ecología, eficiencia-energética, tecnologías-verdes.

ABSTRACT | This article presents a mapping of the scientific literature on green technologies applied in construction between 2014 and 2024. The objective is to identify effective technologies that have the potential to provide improved energy efficiency and be more sustainable. Through a systematic exploratory review, 60 articles were selected from databases such as Elsevier, Springer, and IEEE. The results highlight technologies such as green walls, passive design, IoT, photovoltaic systems, wind turbines, AI, and 3D printing techniques. It concludes that these technologies have the power to save energy and reduce CO₂ emissions, thus becoming more sustainable. And therein lies the importance of government policies and cross-sector collaboration to enhance the use of these technologies and meet the sustainable development

goals. This research represents a serious roadmap for future practices and studies in sustainable construction.

KEYWORD | Construction, sustainable-development, ecology, energy-efficiency, green-technologies.

Introducción

El sector de la construcción sostenible ha cobrado una importancia crucial en el contexto global actual, dado su papel en la reducción del impacto ambiental y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por Naciones Unidas (ONU). La implementación de tecnologías ecológicas ha emergido como una estrategia clave para la optimización del consumo energético y la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (Hernández-Zamora et al., 2021). En este sentido, la arquitectura bioclimática, que integra principios de eficiencia energética y adaptación climática en el diseño de edificaciones, ha demostrado ser una alternativa efectiva para el desarrollo de entornos urbanos resilientes y sostenibles (Conforme-Zambrano & Castro-Mero, 2020). Sin embargo, a pesar de los avances en la investigación y aplicación de estas estrategias, aún existen desafíos relacionados con su implementación a gran escala, lo que motiva la necesidad de estudios adicionales sobre su efectividad y viabilidad en diferentes contextos geográficos y climáticos.

Uno de los principales retos a los que se enfrenta la arquitectura sostenible es el desarrollo y puesta en marcha de tecnologías sostenibles vinculadas a la edificación, que permitan la construcción de edificios más eficientes y respetuosos con el medio ambiente. Pese a la creciente oferta de materiales innovadores y de sistemas para la gestión de la energía, la falta de un análisis comparativo de las distintas alternativas encaminadas a verificar cuál de ellas en términos reales está dando buenos resultados y responde de forma eficaz a la necesidad de reducir el consumo energético y la transformación de la edificación dificulta su desarrollo efectivo (Gaviria et al., 2018). Precisamente en este contexto, el estudio que se presenta pretende responder sobre cuáles de estas tecnologías son más apropiadas para la edificación sostenible y qué rendimientos se les pueden sacar en términos de consumo energético a la hora de construir edificios de última generación.

La arquitectura bioclimática aprovecha los recursos climáticos locales para el confort térmico y aminorar la climatización activa (Beccali, 2018). Las distintas estrategias que son algunas de ellas, la buena orientación, el aislamiento térmico y la ventilación natural son descritas en los diferentes climas (Bugenings & Kamari, 2022). En la arquitectura pasiva, los materiales innovadores como PCM, se están diseñando con el fin de almacenar energía térmica y, por tanto, mejorar la eficiencia energética (Akeiber et al., 2016). Asimismo, la inteligencia artificial y el IoT son los que minuciosamente, en tiempo real hacen el seguimiento y manejo directo de la demanda energética volviéndose más eficientes y, además, detectan las anomalías ocurridas (Himeur et al., 2021). Aunque así siguen evidentes las deficiencias que se originan en la vida práctica de estas tecnologías y en el ciclo de vida de las edificaciones.

La urgente crisis climática y la necesidad de reducir el consumo energético en edificaciones ha llevado a que, en el campo de la construcción sostenible se esté cada vez en busca de soluciones novedosas. Pese a ello, la variedad de tecnologías disponibles y la falta de criterios unificados para su selección impiden su adopción general. Este trabajo tiene como fin ofrecer una revisión sistematizada de las tecnologías más eficaces en la arquitectura sostenible, con el objetivo de proporcionar información valiosa a los arquitectos, urbanistas y responsables políticos para el desarrollo de entornos urbanos más sostenibles y resilientes.

Este estudio se centra en la revisión de las tecnologías verdes utilizadas cada vez con más frecuencia en la construcción de edificios sostenibles, valorando su aportación en el ahorro de energía, la reducción de emisiones y su adaptabilidad a las condiciones climáticas. Se evaluarán las estrategias pasivas, interviniendo en los materiales y sistemas inteligentes de gestión energética. El principal objetivo de esta investigación es sintetizar mediante una revisión sistemática la efectividad de diversas tecnologías ecológicas en la construcción sostenible, identificando aquellas que presentan un mayor potencial para la reducción del consumo energético y la minimización del impacto ambiental.

Materiales y Métodos

Diseño de la revisión sistemática

Esta investigación sigue la revisión sistemática exploratoria de Manchado et al. (2009) para sintetizar evidencia sobre tecnologías ecológicas en construcción sostenible, describir el conocimiento actual, identificar vacíos en la literatura y proponer futuras líneas de investigación.

Criterios de inclusión y exclusión

Se definieron criterios específicos para la selección de los estudios a incluir en la revisión (Tabla 1):

Tabla 1

Criterios de selección de artículos para la revisión sistemática exploratoria

	Criterios de selección
Criterios de inclusión	Publicaciones que analicen tecnologías ecológicas aplicadas en la construcción sostenible.
	Estudios publicados entre 2014 y 2024.
	Artículos originales y de revisión en revistas indexadas.
	Documentos en inglés o español.
Criterios de exclusión	Publicaciones sin datos empíricos o análisis detallados.
	Estudios duplicados o versiones repetidas en distintas revistas.
	Documentos sin acceso al texto completo.

Nota. La tabla detalla los criterios de inclusión y exclusión empleados para la selección de artículos en la revisión sistemática exploratoria sobre tecnologías ecológicas aplicadas a la construcción sostenible.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas como Elsevier, PubMed, Springer, IEEE, ResearchGate, Taylor & Francis Online, MDPI y Magazine of Civil Engineering. Se aplicaron palabras clave específicas en inglés en los descriptores de cada base de datos como: "green technologies in construction", "energy efficiency in buildings", "sustainable construction", and "reducing CO₂ emissions".

La búsqueda identificó un total de 15,830 documentos. Se aplicaron filtros de las mismas bases de datos para limitar los resultados al período estipulado, reduciendo la muestra a 72 estudios potencialmente relevantes.

Proceso de selección y clasificación de los estudios

El proceso de selección de los estudios se llevó a cabo en dos fases. En primer lugar, a partir de la revisión de títulos y resúmenes, la muestra se redujo a 72 estudios. Posteriormente, en la revisión del texto completo, se excluyeron 12 estudios, seis por no satisfacer los objetivos establecidos, tres por carecer de la

calidad metodológica mínima de estudios rigurosos, dos por información repetida y uno por carecer de acceso al texto completo. Por último, se recuperaron 60 estudios para ser revisados, garantizando así la pertinencia del resultado y su calidad en términos de evidencia.

Extracción y análisis de datos

Se diseñó una plantilla de extracción de datos basada en Manchado et al. (2009), que incluía información bibliográfica, aspectos metodológicos, hallazgos tecnológicos y ecológicos, y las conclusiones del estudio. La investigación empleó métodos cualitativos como estudios de caso, síntesis narrativa y análisis temático para facilitar la comparación y categorización de los hallazgos.

Rigor metodológico y validación

Con la finalidad de asegurar la calidad y consistencia de la revisión, se establecieron criterios previamente acordados de valoración de la calidad de la evidencia obtenida. Se valoró la claridad de los objetivos planteados, la pertinencia de la metodología y la solidad de los resultados en cada uno de los estudios seleccionados. Por otro lado, la revisión y la extracción de datos se realizó de forma independiente por 4 revisores, llegándose a un acuerdo en los desacuerdos a fin de minimizar los errores y sus posibles consecuencias.

Resultados

La Tabla 2 muestra las fuentes académicas en las que se encontraron los artículos seleccionados para una revisión sistemática. En total, se identificaron 60 artículos distribuidos en varias bases de datos. La mayoría de los artículos provienen de Elsevier, seguida de ResearchGate y MDPI.

Tabla 2

Bases de datos indexadas en la que se encontraron los artículos seleccionados

Base de datos académica	Cantidad
Elsevier	35
Springer	1
IEEE	2
ResearchGate	10
PubMed	1
Taylor & Francis Online	1
MDPI	8
Magazine of Civil Engineering	1
Global Journal of Environmental Science and Management	1
Total	60

Nota. La tabla presenta la distribución de los artículos seleccionados según la base de datos académica de origen durante el proceso de revisión sistemática exploratoria.

La Tabla 3 presenta un recopilatorio de artículos científicos publicados entre 2014 y 2022. En ella se puede seguir cómo la investigación sobre tecnologías ambientales, al igual que el propio sector de la construcción, ha avanzado a lo largo de este tiempo. Se tratan diversos aspectos, como, por ejemplo: la eficiencia energética, el uso de materiales ecológicos, la implementación de las energías renovables en la construcción y el impacto de las tecnologías emergentes, como por ejemplo la inteligencia artificial o la impresión en 3D, en la sostenibilidad del sector de la construcción. La distribución de los artículos por año y por revista nos muestra igualmente el creciente interés por la innovación tecnológica a la hora de atacar al cambio climático y de mejorar la sostenibilidad ambiental.

Tabla 3
Descripción de artículos organizados año de publicación, objetivos, y hallazgos

Nº	Cita	Objetivo	Hallazgos
1	Taleb, 2014	Probar la utilidad de aplicar estrategias seleccionadas de enfriamiento pasivo para mejorar el rendimiento térmico y reducir el consumo de energía de los edificios residenciales en climas cálidos y áridos, específicamente en Dubái, Emiratos Árabes Unidos	La ventilación natural y sombreado reducen el consumo energético. Los techos verdes aíslan y mejoran la eficiencia térmica.
2	Scrivener, 2014	Revisar opciones más sostenibles para materiales cementicios.	Las mezclas LC3 reducen emisiones de CO2 en la producción de cemento. Disminuyen el clínker y hacen el proceso más sostenible.
3	Maasoumy et al., 2014	Desarrollar un modelo de edificio adaptativo basado en parámetros (PAB) y un control predictivo robusto (RMPC) para sistemas HVAC en edificios.	El modelo PAB y RMPC mantienen confort térmico con ahorro energético. Logran hasta 36% menos consumo que controladores basados en reglas.
4	Lucon et al., 2014	Evaluuar el impacto de las medidas de eficiencia energética y la adopción de tecnologías sostenibles en el sector de la construcción	Las tecnologías sostenibles reducen emisiones y mejoran la calidad del aire. También crean empleo y disminuyen la pobreza energética.
5	Iavicoli et al., 2014	Examinar las oportunidades y desafíos de la nanotecnología en la economía verde.	La nanotecnología reduce CO2 y mejora la eficiencia energética. Requiere gestión de riesgos por posibles impactos ambientales y de salud.
6	Azkorra et al., 2015	Evaluuar el uso de muros verdes modulares como un sistema de aislamiento acústico pasivo en edificios.	Los muros verdes absorben sonido y reducen la reverberación. Tienen potencial como aislamiento acústico en ciudades.
7	D'Agostino, 2015	Evaluuar el progreso hacia el establecimiento de definiciones de Edificios de Energía Casi Nula (nZEB) en los Estados Miembros de la Unión Europea.	Las definiciones de nZEB aún carecen de coherencia global. Mezclas de arcillas y caliza reducen clínker y CO2 en cemento.
8	Esposito y Antonietti, 2015	Revisar las opciones para materiales cementicios más sostenibles, centrándose en la mezcla de clínker de cemento Portland con materiales cementicios suplementarios (SCM) y en el potencial de las arcillas calcinadas para reducir el contenido de clínker en los cementos mezclados.	Las mezclas LC3 reducen clínker y CO2 en la producción de cemento. Mantienen buen rendimiento y mejoran la sostenibilidad.
9	Ragheb et al., 2015	Examinar el concepto de arquitectura verde como una solución sostenible para el diseño y la construcción de edificios.	La arquitectura verde conserva recursos y mejora aire y agua. Reduce costos y usa energía pasiva, materiales ecológicos y muros verdes.
10	Ürge-Vorsatz et al., 2015	Evaluuar y comparar los impactos de diversas estrategias de mitigación y tecnologías de eficiencia energética en el sector de la construcción.	El enfriamiento pasivo reduce 23.6% el consumo energético en Dubái. Mezclas LC3 mejoran el cemento y disminuyen emisiones de CO2.
11	Ahmad et al., 2016	Revisar el estado del arte en la medición de energía y el monitoreo ambiental en edificios.	Medidores y sensores reducen energía y emisiones de CO2. Desafíos incluyen interoperabilidad, seguridad y falta de infraestructura TIC.

Nº	Cita	Objetivo	Hallazgos
12	Habert y Ouellet-Plamondon, 2016	Evaluar el impacto ambiental de los geopolímeros como alternativa a los cementos tradicionales.	Los geopolímeros reducen CO ₂ comparados con el cemento Portland. Se requiere más investigación sobre su durabilidad e impacto ambiental.
13	Hager et al., 2016	Evaluar el estado actual y el potencial futuro de la impresión 3D en la construcción.	La impresión 3D reduce costos y residuos en construcción. Enfrenta limitaciones, pero proyectos pioneros demuestran su potencial.
14	Yang et al., 2016	Evaluar el efecto de la isla de calor urbano (UHI) y explorar medidas de mitigación para mejorar el ambiente urbano utilizando tecnologías de simulación numérica.	Techos verdes y materiales reflectivos mitigan el efecto UHI. Ríos y parques urbanos reducen significativamente la temperatura urbana.
15	Arshad et al., 2017	Proporcionar una visión integral sobre el uso de celdas solares en aplicaciones de construcción.	Las celdas solares reducen consumo energético y mejoran la sostenibilidad. También disminuyen emisiones de CO ₂ y costos a largo plazo.
16	Bhati et al., 2017	Evaluar la percepción de los hogares en Singapur sobre la tecnología inteligente para el ahorro de energía y su aceptación en el contexto de las viviendas inteligentes.	Las tecnologías inteligentes reducen el consumo energético en hogares. Su adopción depende del comportamiento del usuario y políticas gubernamentales.
17	Kern et al., 2017	Examinar el desarrollo de políticas de eficiencia energética en edificios en Finlandia y el Reino Unido entre 2000 y 2014, analizando su evolución y características emergentes.	Ambos países mejoran eficiencia energética con enfoques distintos. Políticas coherentes aumentan la efectividad de las medidas implementadas.
18	Kumar et al., 2017	Revisar las técnicas de toma de decisiones multicriterio (MCDM) aplicadas al desarrollo de energías renovables sostenibles, evaluando su efectividad en la planificación energética.	Las técnicas MCDM optimizan sistemas energéticos considerando múltiples criterios. Son clave para planificar energías renovables en comunidades rurales.
19	Loonen et al., 2017	Revisar el estado actual, los requisitos y las oportunidades para la simulación del rendimiento de las fachadas adaptativas en edificios.	Las fachadas adaptativas reducen energía y mejoran el ambiente interior. Su adopción es baja por falta de comprensión y medición.
20	Martiskainen, 2017	Analizar el papel del liderazgo comunitario en el desarrollo de innovaciones de base, específicamente en proyectos de energía comunitaria en el Reino Unido.	El liderazgo comunitario impulsa innovaciones y promueve la sostenibilidad. Sin embargo, su continuidad depende de la diversidad de líderes.
21	Ramage et al., 2017	Evaluar la sostenibilidad y eficiencia energética de los edificios de madera.	La madera reduce emisiones y tiene menor impacto ambiental. También retiene carbono y disminuye la energía embebida.
22	Ramos y Fernández, 2017	Analizar los errores comunes en la validación de modelos energéticos calibrados y destacar la importancia de la precisión en las medidas de ahorro energético.	La corrección de errores asegura la validez de modelos energéticos. Errores en fórmulas y abreviaturas afectan su calibración.
23	Rogge et al., 2017	Analizar los avances conceptuales y empíricos en el análisis de combinaciones de políticas para las transiciones energéticas, centrándose en cómo estas combinaciones pueden superar las barreras y resistencias al cambio.	Las políticas integradas son clave para sistemas energéticos bajos en carbono. Coherencia y credibilidad aumentan su efectividad.
24	Sakin y Kiroglu, 2017	Evaluar la tecnología de impresión 3D para la construcción de casas sostenibles del futuro,	La impresión 3D reduce costos y residuos en construcción. Enfrenta desafíos por

Nº	Cita	Objetivo	Hallazgos
		destacando sus beneficios y limitaciones en comparación con las técnicas de construcción tradicionales.	falta de familiaridad y desarrollo tecnológico.
25	Seghier et al., 2017	Desarrollar una herramienta basada en BIM y VPL para la evaluación y calificación del Valor de Transferencia Térmica del Envoltorio (ETTV) en edificios.	La herramienta ofrece retroalimentación térmica en tiempo real. Mejora decisiones y precisión en sostenibilidad del diseño.
26	Chel y Kaushik, 2018	Evaluar tecnologías de energía renovable para el desarrollo sostenible de edificios energéticamente eficientes.	Las energías renovables reducen consumo y emisiones en edificios. Su adopción es clave para la construcción sostenible.
27	Ghaffar et al., 2018	Evaluar la tecnología de fabricación aditiva (AM) en la construcción.	La fabricación aditiva reduce residuos y mejora la sostenibilidad. Enfrenta desafíos en estandarización de materiales y calidad de unión.
28	Kaewunruen et al., 2018	Evaluar la viabilidad técnica y financiera de los edificios de energía neta cero (NZEB) para edificios existentes.	Las tecnologías renovables y BIM reducen el consumo energético. Las soluciones NZEB son viables con un retorno de 23 años.
29	López et al., 2018	Desarrollar una metodología para crear una biblioteca H-BIM (Heritage Building Information Modeling)	La metodología de tres pasos permite modelar edificios históricos. Facilita su mantenimiento, gestión y rehabilitación eficiente.
30	Serale et al., 2018	Evaluar la efectividad del Control Predictivo de Modelos (MPC) para mejorar la eficiencia energética de los sistemas HVAC y la gestión de energía en edificios.	El MPC reduce consumo energético y mejora el confort. Logra 30% menos carga y se adapta a precios variables.
31	Sergeev et al., 2018	Formular un marco de control predictivo basado en modelos (MPC) para la gestión de energía y sistemas HVAC en edificios.	El MPC mejora eficiencia energética y reduce picos de carga 30%. Facilita integración de energías renovables y almacenamiento.
32	Seyedzadeh et al., 2018	Evaluar el uso de técnicas de aprendizaje automático (ML) para la estimación del consumo energético y el rendimiento de los edificios.	Las técnicas ML mejoran la precisión en predicción energética. Superan métodos tradicionales de simulación y modelado estadístico.
33	Ullah et al., 2018	Desarrollar un algoritmo basado en el Modelo Oculto de Markov (HMM) para predecir el consumo de energía en edificios residenciales en Corea del Sur utilizando datos recolectados mediante medidores inteligentes.	El modelo mejora la predicción energética sobre SVM, ANN y CART. Ofrece mayor precisión y menor error cuadrático medio.
34	Allacker et al., 2019	Desarrollar un modelo basado en la teoría del flujo de energía para predecir el consumo energético en edificios residenciales.	El modelo predice consumo energético con más del 85% de precisión. Optimiza energía y reduce costos en edificios residenciales.
35	Hertwich et al., 2019	Revisar las estrategias de eficiencia de materiales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) en edificios, vehículos y electrónicos.	El uso más intensivo y la extensión de la vida útil de los productos, así como la sustitución de materiales, son estrategias efectivas para reducir las emisiones.
36	Hesselink y Chappin, 2019	Revisar las barreras para la adopción de tecnologías energéticamente eficientes por los hogares.	Los modelos destacan barreras financieras y falta de conocimiento. Las políticas más estudiadas incluyen subsidios, prohibiciones y campañas informativas.

Nº	Cita	Objetivo	Hallazgos
37	Khajavi et al., 2019	Investigar la creación y los beneficios del uso de un gemelo digital en la gestión del ciclo de vida de edificios.	Los gemelos digitales optimizan operación y mantenimiento predictivo. Enfrentan desafíos en integración de sensores y gestión de datos.
38	Liu et al., 2019	Analizar las definiciones, el desarrollo y las políticas de edificios de energía casi nula en China.	China impulsa proyectos y políticas para edificios sostenibles. Se requieren medidas más eficientes para reducir emisiones de carbono.
39	Raabe et al., 2019	Revisar las estrategias para mejorar la sostenibilidad de los metales estructurales, enfocándose en métodos como la producción con reducción de carbono, el reciclaje y el diseño de aleaciones compatibles con chatarra.	Mejorar eficiencia y durabilidad de aleaciones reduce emisiones y consumo.
40	Radić et al., 2019	Revisar los tipos y beneficios de las fachadas verdes y muros vivos como elementos de diseño sostenible.	Los muros vivos mejoran aislamiento, aire y acústica. Se requiere más investigación para cuantificar sus beneficios.
41	Seghier et al., 2019	Desarrollar una herramienta basada en BIM para la automatización del cálculo del Índice de Uso de Concreto (CUI).	Auto-CUI reduce tiempo y errores en evaluación de CUI. Proporciona retroalimentación interactiva para optimizar el diseño.
42	Shahrbudin y Ramlan, 2019	Proporcionar una visión general de las tecnologías de impresión 3D.	La impresión 3D permite personalización, eficiencia y geometrías complejas. Se aplica en agricultura, salud, automoción, aviación y construcción.
43	Shcherbak et al., 2019	Aplicar estándares internacionales de eficiencia energética para auditorías energéticas en edificios universitarios.	ISO 50001 mejora eficiencia y reduce consumo energético en universidades. Facilita implementación y monitoreo de planes de ahorro energético.
44	Economidou et al., 2020	Revisar 50 años de políticas de eficiencia energética de la UE para edificios, destacando la evolución y el impacto de las directivas y políticas adoptadas desde los años 70.	Persisten desafíos en implementación de políticas de eficiencia energética. Se necesita un enfoque integral para maximizar beneficios.
45	Fawzy et al., 2020	Revisar las estrategias de mitigación del cambio climático, incluyendo tecnologías de mitigación convencional, tecnologías de emisiones negativas y geingeniería de forzamiento radiactivo.	Las tecnologías convencionales son insuficientes para el Acuerdo de París. Se requieren alternativas para reducir emisiones de carbono.
46	Foster, 2020	Proponer estrategias de economía circular para la reutilización adaptativa de edificios de patrimonio cultural.	La reutilización adaptativa revitaliza barrios y reduce el consumo de recursos. Preserva valores históricos y minimiza desechos.
47	Ghaffar et al., 2020	Investigar la gestión integrada de residuos de construcción y demolición (C&DW) para la recuperación de recursos en el Reino Unido.	La legislación impulsa reutilización y reciclaje en construcción. Barreras incluyen costos, logística y falta de inversión en innovación.
48	Jouhara et al., 2020	Revisar las tecnologías de almacenamiento de energía térmica latente (TES) y sus aplicaciones.	Los PCM mejoran eficiencia energética al almacenar energía térmica. Se aplican en edificios, energía, alimentos y automoción.
49	Mayer et al., 2020	Optimizar sistemas híbridos de energía renovable a nivel doméstico considerando objetivos económicos y ambientales mediante algoritmos genéticos.	El clima influye en el diseño óptimo y sus impactos. Sistemas conectados favorecen fotovoltaicos, los aislados requieren fuentes renovables mixtas.

Nº	Cita	Objetivo	Hallazgos
50	Nižetić et al., 2020	Explorar las oportunidades, problemas y desafíos del Internet de las Cosas (IoT) para un futuro inteligente y sostenible.	El IoT mejora eficiencia, pero requiere monitoreo ambiental. Debe mitigar residuos electrónicos y consumo energético.
51	Sovacool y Del Rio, 2020	Evaluar los efectos económicos y ambientales de un sistema híbrido de energía renovable a nivel doméstico utilizando un algoritmo genético para la optimización multiobjetivo.	La optimización mostró diferencias entre óptimos económicos y ambientales. Fotovoltaicos destacan en redes, sistemas aislados requieren fuentes renovables mixtas.
52	Yigitcanlar et al., 2020	Revisar las contribuciones y riesgos de la inteligencia artificial (IA) en el desarrollo de ciudades inteligentes.	La IA mejora productividad y sostenibilidad urbana. Se requiere más investigación sobre sus riesgos e impactos disruptivos.
53	Abioye et al., 2021	Explorar las aplicaciones de la inteligencia artificial (IA) en la industria de la construcción, identificando desafíos y oportunidades.	La IA mejora eficiencia en construcción, pero enfrenta resistencia y falta de datos. Se requieren políticas y formación para su adopción.
54	Bello et al., 2021	Revisar el uso de la computación en la nube en la industria de la construcción, destacando sus aplicaciones, beneficios y desafíos.	La computación en la nube integra BIM, IoT y realidad aumentada. Enfrenta desafíos de adopción, seguridad y privacidad.
55	Himeur et al., 2021	Revisar los métodos basados en inteligencia artificial para la detección de anomalías en el consumo energético de edificios.	Estos métodos detectan consumos anómalos y reducen el desperdicio energético. Enfrentan desafíos por falta de datos anotados y métricas unificadas.
56	Mushtaha et al., 2021	Evaluar el impacto de las estrategias de diseño pasivo en las cargas de enfriamiento de edificios en climas templados, utilizando simulaciones para optimizar el rendimiento térmico.	La ventilación natural y el aislamiento reducen 59% el consumo energético. Mejoran confort térmico y eficiencia en edificios de Gaza.
57	Shan et al., 2021	Investigar la relación entre la innovación en tecnología verde, el consumo de energía renovable y las emisiones de dióxido de carbono en Turquía entre 1990 y 2018.	La tecnología verde y energías renovables reducen emisiones de CO2. El consumo energético, población e ingresos las incrementan.
58	Baduge et al., 2022	Revisar y resumir el estado del arte de los algoritmos de ML/DL, métodos de adquisición de datos, aplicaciones de IA, ML y DL en la construcción y los desafíos asociados.	La IA/ML/DL optimiza diseño, manufactura y gestión en construcción. Reduce costos y mejora sostenibilidad, pero enfrenta desafíos técnicos y adopción.
59	González-Torres et al., 2022	Revisar las tendencias, usos finales, combustibles y factores impulsores del uso de energía en edificios, y analizar la evolución de estos factores para mejorar las políticas de mitigación del cambio climático.	Los edificios consumen un tercio de la energía y emiten 25% de CO2. Datos confiables y electrificación son clave para reducir emisiones.
60	Tian et al., 2022	Analizar la dinámica entre la transición energética global y la pandemia de COVID-19, proponiendo una hoja de ruta para la transición energética baja en carbono en la era post-pandemia.	La pandemia plantea desafíos, pero impulsa financiación verde y cooperación. Facilita reformas energéticas y recuperación ecológica.

Nota. La tabla sintetiza los objetivos y principales hallazgos de los artículos seleccionados, organizados según el año de publicación, en el marco de la revisión sistemática exploratoria sobre tecnologías aplicadas a la eficiencia energética y sostenibilidad en construcción.

Entre 2014 y 2022 se identificó varios estudios mediante una revisión sistemática sobre tecnologías verdes utilizadas en la construcción sostenible. En 2014, para el Sistema de refrigeración pasiva, materiales cementantes sostenibles y sistemas de aire acondicionado adaptativos para edificios. En 2015, se estudiaron celdas con plantas para insonorizar, definiciones del Edificio de Energía Casi Nulo (EECN) y la eco arquitectura. En 2016, los estudios fueron sobre medición de energía en los edificios, impacto ambiental de los geopolímeros y cómo reducir el efecto de isla de calor en las ciudades. En 2017, el caso fue hacer celdas solares, las políticas de eficiencia energética en la UE y la sostenibilidad de los edificios de madera. En 2018, en pasar la energía renovable, la fabricación aditiva y la aplicación técnicas de machine learning en la gestión energética. En 2019 se estudió el modelo predictivo de energía, el gemelo digital y cómo ahorrar energía en los edificios del campus universitario. En 2020, se investigaron las políticas de eficiencia energética de la UE, cómo aplicar la economía circular a los edificios o las tecnologías de almacenamiento de energía. En 2021 se analizaron, entre otros, cómo aplicar DeepMind a la gestión energética de un industrial, un supermercado o un edificio de oficinas o los conceptos y estrategias de los edificios de consumo casi nulo. Y en 2022, entre otros, nos detuvimos a analizar qué papel tiene jugará la inteligencia artificial en la gestión energética de edificios, el consumo de energía de un edificio y la transición energética global post-pandemia de COVID-19.

Discusión

Los resultados validan el desarrollo de las nuevas tecnologías ecológicas en la construcción, aumentando la eficiencia energética y la reducción de emisiones. Entre las características especiales se mencionan el diseño pasivo, los materiales sostenibles y la inteligencia artificial para la optimización del consumo de energía (Mushtaha et al., 2021; Taleb, 2014). Los resultados presentados subrayan el propósito inicial del trabajo científico, mostrando que las versiones de estos sistemas dependen de las condiciones meteorológicas y lugares, es más, haciendo que la población reconozca la importancia de adaptar las soluciones tecnológicas a las condiciones específicas de cada contexto (Shan et al., 2021; Yang et al., 2016).

Los resultados son consistentes con estudios previos que muestran cómo las fachadas y muros verdes mejoran la regulación térmica y reducen el consumo de energía (Azkorra et al., 2015; Radić et al., 2019). Sin embargo, algunos investigadores señalan que también es posible incorporar herramientas adicionales, como sensores, modelos predictivos y tecnologías, que permitan anticipar el comportamiento atmosférico en el futuro. (Seghier et al., 2017; Ramos & Fernández, 2017). Mientras que muchos estudios se han centrado en la ventilación natural en climas templados o fríos (Mushtaha et al., 2021), otros han encontrado que estos mismos sistemas de refrigeración pasiva funcionan también en zonas áridas (Taleb, 2014).

Los resultados de la investigación recalcan, una vez más, elementos clave como el diseño pasivo y la eficiencia energética en la arquitectura sostenible, enfatizando así la urgencia de integrar nuevas tecnologías de vanguardia con las estrategias de salud bioclimática tradicionales (D'Agostino, 2015; Liu et al., 2019). En la práctica, pueden afectar las políticas energéticas y de edificios de cero emisiones (EEB), así como el uso de materiales sostenibles (Chel & Kaushik, 2018; Foster, 2020). La digitalización del sector implica un enfoque multifacético que integra la arquitectura, la ingeniería y la ciencia de datos para lograr una gestión energética óptima (Abioye et al., 2021; Baduge et al., 2022).

El estudio es único por su enfoque integrador, lo que permite un análisis amplio de las estrategias tecnológicas en la construcción sostenible. Sin embargo, la heterogeneidad metodológica dificulta la comparación y generalización de los resultados (Hesselink & Chappin, 2019; Mayer et al., 2020). La falta

de datos experimentales es el principal obstáculo para la evaluación precisa de las tecnologías y, en consecuencia, se necesitan más estudios empíricos (Ramage et al., 2017; Esposito & Antonietti, 2015). Además, la falta de estudios a largo plazo supone un desafío al evaluar la sostenibilidad en diferentes entornos (Ürge-Vorsatz et al., 2015; Seghier et al., 2019).

Los resultados ofrecen nuevas líneas de investigación en tecnologías emergentes para la construcción sostenible. También se requieren estudios experimentales sobre materiales de cambio de fase para el almacenamiento térmico (Jouhara et al., 2020) y la gestión energética con inteligencia artificial y gemelos digitales (Khajavi et al., 2019). Es fundamental analizar el efecto de las políticas de eficiencia energética en la adopción de tecnologías sostenibles (Economidou et al., 2020; Tian et al., 2022). Las investigaciones futuras deberían desarrollar modelos híbridos que combinen el diseño pasivo y los sistemas inteligentes (Fawzy et al., 2020; Yigitcanlar et al., 2020).

Conclusión

Este artículo examinó la literatura sobre edificaciones ecológicas en construcción. Las intervenciones de este tipo son la reducción de la carga térmica, el uso de materiales sostenibles, la introducción de sistemas HVAC adaptables y la nanotecnología que contribuyen a una disminución de las emisiones de gases de invernadero y a la eficiencia de la energía. Por otra parte, se hace hincapié en la necesidad de leyes gubernamentales significativas y marcos regulatorios completos para promover la adopción de las mismas. La eficiencia en el sistema de estas leyes llevaría por un lado a la transición de prácticas constructivas sostenibles y, por otro lado, se garantizaría el logro de los objetivos ambientales a nivel global.

Se destaca la relevancia de la colaboración entre diferentes sectores, incluyendo comunidades, gobiernos y el sector privado, para alcanzar la sostenibilidad en la construcción. Un enfoque multidisciplinario es esencial para abordar los desafíos complejos asociados con la implementación de tecnologías ecológicas y maximizar sus beneficios.

El estudio despierta la preocupación por debates futuros sobre el impacto ambiental a largo plazo de estas tecnologías, un análisis detallado del costo-beneficio y del papel de las políticas regulatorias en garantizar que estas tecnologías sean sostenibles. Una de las limitaciones principales es la ocurrencia de ciertos términos de búsqueda, lo que puede resultar en la omisión de estudios valiosos. Por lo tanto, se sugiere expandir las futuras revisiones para incluir un mayor número de fuentes y, por consiguiente, tratar de recoger una imagen más completa.

Contribución de Autoría CRedit

Los roles de autoría serán identificados en el orden siguiente, incluyendo a cada autor en el rol que le corresponde y omitiendo los roles que no procedan en cada caso:

- › **Conceptualización:** Ideas; formulación o evolución de los objetivos y metas generales de la investigación. (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Metodología:** Desarrollo o diseño de la metodología; creación de modelos. (Moreira & Cobeña)
- › **Software:** Programación, desarrollo de software; diseño de programas informáticos; implementación del código informático y de los algoritmos de apoyo; prueba de los componentes de código existentes. (No Aplica)

- › **Validación:** Verificación, ya sea como parte de la actividad o por separado, de la replicabilidad/reproducción general de los resultados/experimentos y otros productos de la investigación. (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Ánalisis formal:** Aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales u otras técnicas formales para analizar o sintetizar datos de estudio. (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Investigación:** Realización de una investigación y proceso de investigación, realizando específicamente los experimentos, o la recolección de datos/evidencia. (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Recursos:** Suministro de materiales de estudio, reactivos, materiales, pacientes, muestras de laboratorio, animales, instrumentación, recursos informáticos u otras herramientas de análisis. (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Curación de datos:** Actividades de gestión para anotar (producir metadatos), depurar datos y mantener los datos de la investigación (incluido el código de software, cuando sea necesario para interpretar los propios datos) para su uso inicial y su posterior reutilización. (Moreira & Cobeña)
- › **Redacción - Borrador Original:** Preparación, creación o presentación del trabajo publicado, específicamente la redacción del borrador inicial (incluyendo la traducción sustantiva). (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Redacción - Revisión y Edición:** Preparación, creación o presentación del trabajo publicado por los miembros del grupo de investigación original, específicamente revisión crítica, comentario o revisión – incluyendo las etapas previas o posteriores a la publicación. (Moreira, Cobeña, Cobeña, Bermello, & Ríos)
- › **Supervisión:** Responsabilidad de supervisión y liderazgo en la planificación y ejecución de actividades de investigación, incluyendo la tutoría externa al equipo central. (Moreira & Cobeña)
- › **Administración del proyecto:** Responsabilidad de gestión y coordinación de la planificación y ejecución de la actividad de investigación. (Moreira)
- › **Adquisición de fondos:** Adquisición del apoyo financiero para el proyecto que conduce a esta publicación. (Moreira)

Declaración de intereses contrapuestos

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Disponibilidad de datos

No aplicable.

Registro y Protocolo: La revisión no ha sido registrada, no se ha redactado ningún protocolo

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo

Declaración de Consentimiento Informado: Se aplicó en el momento de la encuesta.

Referencias

- Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J. M. D., Bilal, M., ... & Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>
- Ahmad, M. W., Moushred, M., Mundow, D., Sisinni, M., & Rezgui, Y. (2016). Building energy metering and environmental monitoring—A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy and Buildings*, 120, 85-102. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059>
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Famileh, I. Z., ... & Zaki, S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470-1497.
- Allacker, K., Castellani, V., Baldinelli, G., Bianchi, F., Baldassarri, C., & Sala, S. (2019). Energy simulation and LCA for macro-scale analysis of eco-innovations in the housing stock. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 989-1008. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-018-1548-3>
- Arshad, R., Zahoor, S., Shah, M. A., Wahid, A., & Yu, H. (2017). Green IoT: An investigation on energy saving practices for 2020 and beyond. *Ieee Access*, 5, 15667-15681. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7997698>
- Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Burés, S., Álvaro, J. E., ... & Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied acoustics*, 89, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
- Baduge, S. K., Thilakarathna, S., Perera, J. S., Arashpour, M., Sharifi, P., Teodosio, B., ... & Mendis, P. (2022). Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*, 141, 104440. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>
- Beccali, M., Strazzeri, V., Germanà, M. L., Melluso, V., & Galatioto, A. (2018). Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1726-1736. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.062>
- Bello, S. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Bilal, M., Delgado, J. M. D., Akanbi, L. A., ... & Owolabi, H. A. (2021). Cloud computing in construction industry: Use cases, benefits and challenges. *Automation in Construction*, 122, 103441. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103441>
- Bhati, A., Hansen, M., & Chan, C. M. (2017). Energy conservation through smart homes in a smart city: A lesson for Singapore households. *Energy Policy*, 104, 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.032>
- Chel, A., & Kaushik, G. (2018). Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. *Alexandria engineering journal*, 57(2), 655-669. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.027>
- Conforme-Zambrano, G. D. C., & Castro-Mero, J. L. (2020). Arquitectura bioclimática. *Polo del conocimiento*, 5(3), 751-779. <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1381>
- D'Agostino, D. (2015). Assessment of the progress towards the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) in European Member States. *J. Build. Eng*, 1, 20-32. https://web.fe.up.pt/~nguerreiro/artigos/avaliacao_progresso_nzeb.pdf

- Economidou, M., Todeschi, V., Bertoldi, P., D'Agostino, D., Zangheri, P., & Castellazzi, L. (2020). Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings. *Energy and buildings*, 225, 110322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110322>
- Esposito, D., & Antonietti, M. (2015). Redefining biorefinery: the search for unconventional building blocks for materials. *Chemical Society Reviews*, 44(16), 5821-5835. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/cs/c4cs00368c>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069-2094. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-020-01059-w>
- Foster, G. (2020). Circular economy strategies for adaptive reuse of cultural heritage buildings to reduce environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104507. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104507>
- Gaviria, J. A., Valencia, V., Olaya, Y., & Aramburo, S. A. (2018). Construcción sostenible. *Editores científicos*, 47.
- González-Torres, M., Pérez-Lombard, L., Coronel, J. F., Maestre, I. R., & Yan, D. (2022). A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports*, 8, 626-637. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.280>
- Ghaffar, S. H., Corker, J., & Fan, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in construction*, 93, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>
- Ghaffar, S. H., Burman, M., & Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of cleaner production*, 244, 118710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118710>
- Habert, G., & Ouellet-Plamondon, C. (2016). Recent update on the environmental impact of geopolymers, RILEM Tech. Lett. 1 (2016) 17. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.6>
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?. *Procedia Engineering*, 151, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hernández-Zamora, M. F., Jiménez-Martínez, S., & Sánchez-Monge, J. I. (2021). Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(2), 3-10. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831>
- Hertwich, E. G., Ali, S., Ciacci, L., Fishman, T., Heeren, N., Masanet, E., ... & Wolfram, P. (2019). Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics—a review. *Environmental Research Letters*, 14(4), 043004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab0fe3>
- Hesselink, L. X., & Chappin, E. J. (2019). Adoption of energy efficient technologies by households—Barriers, policies and agent-based modelling studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.031>
- Himeur, Y., Ghanem, K., Alsalemi, A., Bensaali, F., & Amira, A. (2021). Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives. *Applied Energy*, 287, 116601. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116601>
- Iavicoli, I., Leso, V., Ricciardi, W., Hodson, L. L., & Hoover, M. D. (2014). Opportunities and challenges of nanotechnology in the green economy. *Environmental health*, 13, 1-11. <https://link.springer.com/article/10.1186/1476-069X-13-78>

- Jouhara, H., Źabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., & Lipinski, T. (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5, 100039. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039>
- Kaewunruen, S., Rungskunroch, P., & Welsh, J. (2018). A digital-twin evaluation of net zero energy building for existing buildings. *Sustainability*, 11(1), 159. <https://doi.org/10.3390/su11010159>
- Kern, F., Kivimaa, P., & Martiskainen, M. (2017). Policy packaging or policy patching? The development of complex energy efficiency policy mixes. *Energy research & social science*, 23, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.11.002>
- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE access*, 7, 147406-147419. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8863491>
- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and sustainable energy reviews*, 69, 596-609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>
- Maasoumy, M., Razmara, M., Shahbakhti, M., & Vincentelli, A. S. (2014). Handling model uncertainty in model predictive control for energy efficient buildings. *Energy and Buildings*, 77, 377-392. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.057>
- Manchado Garabito, R., Tamames Gómez, S., López González, M., Mohedano Macías, L., & Veiga de Cabo, J. (2009). Revisiones sistemáticas exploratorias. *Medicina y seguridad del trabajo*, 55(216), 12-19. https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0465-546X2009000300002&script=sci_arttext&tlang=en
- Martiskainen, M. (2017). The role of community leadership in the development of grassroots innovations. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 22, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.05.002>
- Mayer, M. J., Szilágyi, A., & Gróf, G. (2020). Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Applied Energy*, 269, 115058. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115058>
- Mushtaha, E., Salameh, T., Kharrufa, S., Mori, T., Aldawoud, A., Hamad, R., & Nemer, T. (2021). The impact of passive design strategies on cooling loads of buildings in temperate climate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101588. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101588>
- Nižetić, S., Šolić, P., Gonzalez-De, D. L. D. I., & Patrono, L. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of cleaner production*, 274, 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- Liu, Z., Zhou, Q., Tian, Z., He, B. J., & Jin, G. (2019). A comprehensive analysis on definitions, development, and policies of nearly zero energy buildings in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109314. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109314>
- Loonen, R. C., Favoino, F., Hensen, J. L., & Overend, M. (2017). Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 10(2), 205-223. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>
- López, F. J., Lerones, P. M., Llamas, J., Gómez-García-Bermejo, J., & Zalama, E. (2018). A review of heritage building information modeling (H-BIM). *Multimodal Technologies and Interaction*, 2(2), 21. <https://doi.org/10.3390/mti2020021>

- Lucon, O., Úrge-Vorsatz, D., Ahmed, A. Z., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L. F., ... & Vilariño, M. V. (2014). *Buildings*. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/11117/>
- Raabe, D., Tasan, C. C., & Olivetti, E. A. (2019). Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*, 575(7781), 64-74. <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1702-5>
- Radić, M., Brković Dodig, M., & Auer, T. (2019). Green facades and living walls—a review establishing the classification of construction types and mapping the benefits. *Sustainability*, 11(17), 4579. <https://doi.org/10.3390/su11174579>
- Ragheb, G., El-Shimy, H., & Ragheb, A. (2015). Green architecture: A concept of sustainability. *Soc. Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, 2, 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.075>
- Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., ... & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Ramos Ruiz, G., & Fernández Bandera, C. (2017). Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies*, 10(10), 1587. <https://doi.org/10.3390/en10101587>
- Rogge, K. S., Kern, F., & Howlett, M. (2017). Conceptual and empirical advances in analysing policy mixes for energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 33, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.09.025>
- Sakin, M., & Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 134, 702-711. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.562>
- Scrivener, K. L. (2014). Options for the future of cement. *Indian Concr. J*, 88(7), 11-21. https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2018/05/0851_ICJ_Article.pdf
- Seghier, T. E., Lim, Y. W., Ahmad, M. H., & Samuel, W. O. (2017). Building envelope thermal performance assessment using visual programming and BIM, based on ETTV requirement of Green Mark and GreenRE. *International journal of built environment and sustainability*, 4(3). <https://ijbes.utm.my/index.php/ijbes/article/view/216>
- Seghier, T. E., Ahmad, M. H., & Lim, Y. W. (2019). Automation of concrete usage index (CUI) assessment using computational BIM. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 6(1), 23-30. <https://core.ac.uk/download/pdf/287744161.pdf>
- Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., & Bemporad, A. (2018). Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, 11(3), 631. <https://doi.org/10.3390/en11030631>
- Sergeev, V. V., Petrichenko, M. R., Nemova, D., Kotov, E. V., Tarasova, D. S., Nefedova, A. V., & Borodinecs, A. (2018). The building extension with energy efficiency light-weight building walls. *Magazine of Civil Engineering*, (8 (84)), 67-74. <https://cyberleninka.ru/article/n/the-building-extension-with-energy-efficiency-light-weight-building-walls>
- Seyedzadeh, S., Rahimian, F. P., Glesk, I., & Roper, M. (2018). Machine learning for estimation of building energy consumption and performance: a review. *Visualization in Engineering*, 6, 1-20. <https://link.springer.com/article/10.1186/s40327-018-0064-7>
- Shcherbak, V. G., Ganushchak-Yefimenko, L., Nifatova, O., Dudko, P., Savchuk, N., & Solonenchuk, I. (2019). Application of international energy efficiency standards for energy auditing in a University buildings. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(4), 501-514. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2019.04.09>

- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. J. P. M. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
- Shan, S., Genç, S. Y., Kamran, H. W., & Dinca, G. (2021). Role of green technology innovation and renewable energy in carbon neutrality: A sustainable investigation from Turkey. *Journal of Environmental Management*, 294, 113004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113004>
- Sovacool, B. K., & Del Rio, D. D. F. (2020). Smart home technologies in Europe: A critical review of concepts, benefits, risks and policies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 120, 109663. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109663>
- Taleb, H. M. (2014). Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in UAE buildings. *Frontiers of architectural research*, 3(2), 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.01.002>
- Tian, J., Yu, L., Xue, R., Zhuang, S., & Shan, Y. (2022). Global low-carbon energy transition in the post-COVID-19 era. *Applied energy*, 307, 118205. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118205>
- Ullah, I., Ahmad, R., & Kim, D. (2018). A prediction mechanism of energy consumption in residential buildings using hidden markov model. *Energies*, 11(2), 358. <https://doi.org/10.3390/en11020358>
- Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85-98. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039>
- Yang, L., Qian, F., Song, D. X., & Zheng, K. J. (2016). Research on urban heat-island effect. *Procedia engineering*, 169, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.002>
- Yigitcanlar, T., Desouza, K. C., Butler, L., & Roozkhosh, F. (2020). Contributions and risks of artificial intelligence (AI) in building smarter cities: Insights from a systematic review of the literature. *Energies*, 13(6), 1473. <https://doi.org/10.3390/en13061473>