



Estudio de la transferencia de calor en energías renovables: Optimización de paneles solares térmicos y sistemas geotérmicos

Study of heat transfer in renewable energies: Optimization of solar thermal panels and geothermal systems

Estudo da transferência de calor em energias renováveis: Otimização de painéis solares térmicos e sistemas geotérmicos

Jorge Milton Lara-Sinaluisa ^I

j_lara@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-3116-5161>

Juan Martínez-Nogales ^{II}

jumartinez@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4860-1548>

Jessica Fernanda Moreno-Ayala ^{III}

jessica.moreno@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0085-9459>

Nelly Patricia Perugachi-Cahueñas ^{IV}

patricia.perugachi@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6331-9551>

Correspondencia: j_lara@esPOCH.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 10 de abril de 2025 * **Aceptado:** 12 de mayo de 2025 * **Publicado:** 11 de junio de 2025

- I. Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Carrera de Gestión del Transporte, Riobamba, Ecuador.
- II. Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.
- III. Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Carrera de Gestión del Transporte, Riobamba, Ecuador.
- IV. Docente Investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Administración de Empresas, Riobamba, Ecuador.

Resumen

La presente investigación analiza los procesos de transferencia de calor en tecnologías de energía renovable térmica, focalizándose en la eficiencia y optimización de paneles solares térmicos y sistemas geotérmicos. A través de una revisión sistemática de la literatura científica entre 2021 y 2025, se identificaron mecanismos clave de conducción, convección y radiación, así como sus interacciones en entornos operativos reales. Se destacan avances en el uso de nanofluidos, materiales de cambio de fase y técnicas de simulación térmica que mejoran la eficiencia energética. Asimismo, se examinan configuraciones estructurales, propiedades del terreno e innovaciones en acoplamientos híbridos solar-geotérmicos. Los resultados revelan que los sistemas integrados maximizan el aprovechamiento térmico, reducen pérdidas energéticas y mejoran la sostenibilidad operativa. Se concluye que el diseño optimizado, sustentado en modelos computacionales avanzados y análisis exergéticos, permite desarrollar soluciones energéticas resilientes, sostenibles y adaptables a diversos contextos climáticos y geográficos.

Palabras claves: transferencia de calor; paneles solares térmicos; sistemas geotérmicos; eficiencia térmica; energías renovables; integración híbrida.

Abstract

This research analyzes heat transfer processes in thermal renewable energy technologies, focusing on the efficiency and optimization of solar thermal panels and geothermal systems. Through a systematic review of the scientific literature between 2021 and 2025, key conduction, convection, and radiation mechanisms were identified, as well as their interactions in real-world operating environments. Advances in the use of nanofluids, phase-change materials, and thermal simulation techniques that improve energy efficiency are highlighted. Structural configurations, soil properties, and innovations in hybrid solar-geothermal couplings are also examined. The results reveal that the integrated systems maximize thermal utilization, reduce energy losses, and improve operational sustainability. It is concluded that the optimized design, supported by advanced computational models and exergy analysis, enables the development of resilient, sustainable, and adaptable energy solutions in diverse climatic and geographical contexts.

Keywords: heat transfer; solar thermal panels; geothermal systems; thermal efficiency; renewable energy; hybrid integration.

Resumo

Esta pesquisa analisa processos de transferência de calor em tecnologias de energia térmica renovável, com foco na eficiência e otimização de painéis solares térmicos e sistemas geotérmicos. Por meio de uma revisão sistemática da literatura científica entre 2021 e 2025, foram identificados os principais mecanismos de condução, convecção e radiação, bem como suas interações em ambientes operacionais reais. Avanços no uso de nanofluidos, materiais de mudança de fase e técnicas de simulação térmica que melhoram a eficiência energética são destacados. Configurações estruturais, propriedades do solo e inovações em acoplamentos híbridos solar-geotérmicos também são examinadas. Os resultados revelam que os sistemas integrados maximizam a utilização térmica, reduzem as perdas de energia e melhoram a sustentabilidade operacional. Conclui-se que o projeto otimizado, apoiado por modelos computacionais avançados e análise de exergia, permite o desenvolvimento de soluções energéticas resilientes, sustentáveis e adaptáveis em diversos contextos climáticos e geográficos.

Palavras-chave: transferência de calor; painéis solares térmicos; sistemas geotérmicos; eficiência térmica; energia renovável; integração híbrida.

Introducción

En el contexto actual de transformación energética global, la transición hacia fuentes limpias y sostenibles representa una prioridad estratégica frente al agotamiento de recursos fósiles y la creciente crisis climática. Entre las múltiples alternativas tecnológicas disponibles, los sistemas basados en energías renovables térmicas —particularmente los paneles solares térmicos y los sistemas geotérmicos— han ganado un protagonismo significativo debido a su capacidad para proporcionar soluciones eficientes y sostenibles en la generación y gestión del calor. No obstante, la eficiencia térmica de estos sistemas aún enfrenta limitaciones técnicas relacionadas con la compleja dinámica de la transferencia de calor, lo cual compromete su desempeño operativo y su integración a gran escala en redes energéticas híbridas.

La transferencia de calor en estos dispositivos está influenciada por múltiples variables, incluyendo propiedades termofísicas de los materiales, configuraciones geométricas de los colectores, condiciones de operación, flujos de fluido térmico y gradientes de temperatura ambiental. En el caso de los paneles solares térmicos, las pérdidas por convección y radiación, así como la

ineficiente captación durante condiciones meteorológicas adversas, constituyen obstáculos críticos. Por su parte, los sistemas geotérmicos deben lidiar con problemas como la degradación de gradientes térmicos en el subsuelo, la conductividad del terreno y la necesidad de optimizar intercambiadores de calor subterráneos. A pesar de los avances recientes en materiales de cambio de fase, fluidos nanotecnológicos y técnicas de simulación térmica, persiste la necesidad de modelos integrales que permitan comprender y optimizar la transferencia de calor en estos sistemas bajo condiciones operativas reales.

Desde esta perspectiva, el problema que se plantea radica en la limitada comprensión integrada de los mecanismos de transferencia de calor que gobiernan el funcionamiento combinado o independiente de paneles solares térmicos y sistemas geotérmicos, y cómo dicha comprensión puede traducirse en estrategias de optimización tecnológica. La ausencia de análisis comparativos robustos, estudios experimentales correlacionados con simulaciones térmicas avanzadas, y criterios estandarizados de diseño térmico, representa una barrera para el escalamiento y la mejora del rendimiento energético global de estas tecnologías.

El objetivo general de esta investigación es analizar críticamente el cuerpo de literatura científica reciente sobre los procesos de transferencia de calor en tecnologías de energía renovable térmica, con especial énfasis en la eficiencia y optimización de paneles solares térmicos y sistemas geotérmicos. A través de una revisión sistemática, se pretende identificar los avances teóricos y aplicados más relevantes, así como los vacíos de conocimiento y las oportunidades de mejora tecnológica que orienten futuras investigaciones en ingeniería energética sostenible. Específicamente, esta revisión busca caracterizar los mecanismos de conducción, convección y radiación descritos en los estudios actuales sobre paneles solares térmicos, considerando los factores operativos y ambientales que inciden en su rendimiento térmico.

Asimismo, se propone examinar los enfoques técnicos y experimentales empleados para analizar el comportamiento térmico de los sistemas geotérmicos, teniendo en cuenta variables como la configuración del subsuelo, la geometría de los intercambiadores y las condiciones de operación. Además, se plantea comparar los modelos numéricos, las simulaciones computacionales y los métodos de validación experimental utilizados para evaluar la eficiencia térmica de ambas tecnologías. Finalmente, se pretende identificar las principales limitaciones técnicas, controversias metodológicas y tendencias emergentes derivadas de los estudios revisados, con el fin de generar

recomendaciones orientadas a la mejora en la captación, el almacenamiento y el aprovechamiento del calor en sistemas renovables térmicos, ya sea de forma independiente o integrada.

Este análisis pretende aportar una visión crítica y multidisciplinaria que sirva de base para el diseño de soluciones energéticas más eficientes, resilientes y adaptadas a distintos contextos geográficos y climáticos, en concordancia con los principios de sostenibilidad energética y transición ecológica.

Fundamentos de la transferencia de calor

La transferencia de calor es un fenómeno físico esencial en numerosos procesos naturales e industriales, donde la energía térmica se transfiere de una región de mayor temperatura a otra de menor temperatura. Este proceso puede ocurrir mediante tres mecanismos principales: conducción, convección y radiación. Cada uno de estos mecanismos opera bajo principios distintos y es influenciado por las propiedades del medio a través del cual se transfiere el calor.

Mecanismos de conducción térmica: Ley de Fourier y su aplicación en materiales sólidos

La conducción térmica es el proceso mediante el cual el calor se transfiere a través de un material sólido debido a la interacción entre las moléculas o átomos del material. Este mecanismo es particularmente relevante en materiales sólidos, donde las partículas vibran y transfieren energía a las partículas adyacentes (Jafari, 2021). La Ley de Fourier describe matemáticamente este fenómeno, estableciendo que la tasa de transferencia de calor es proporcional al gradiente de temperatura y a la conductividad térmica del material (Assad y Rosen, 2021).

En aplicaciones prácticas, la conducción térmica es fundamental en el diseño de sistemas de aislamiento térmico, intercambiadores de calor y componentes electrónicos. La selección de materiales con alta o baja conductividad térmica permite controlar eficientemente el flujo de calor en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas (Farajollahi et al., 2024). Por ejemplo, los metales como el cobre y el aluminio son excelentes conductores térmicos y se utilizan en sistemas de disipación de calor, mientras que materiales como la fibra de vidrio o la lana mineral actúan como aislantes térmicos eficaces (Mohammadi et al., 2023).

Mecanismos de convección térmica: convección natural y forzada en fluidos térmicos

La convección térmica implica la transferencia de calor mediante el movimiento de fluidos, ya sean líquidos o gases. Este mecanismo se clasifica en convección natural y convección forzada (Ghiasi et al., 2025). La convección natural ocurre debido a las diferencias de densidad en el fluido causadas por variaciones de temperatura, lo que genera corrientes de convección. Por otro lado, la

convección forzada se produce cuando un agente externo, como una bomba o un ventilador, induce el movimiento del fluido (Assareh et al., 2023).

La convección es un mecanismo de transferencia de calor altamente eficiente en sistemas donde el movimiento del fluido puede ser controlado o aprovechado. En aplicaciones como los sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, la comprensión y el diseño adecuados de los procesos convectivos son esenciales para garantizar un rendimiento térmico óptimo. Además, en la ingeniería de procesos, la convección juega un papel crucial en la transferencia de calor en reactores y otros equipos de procesamiento (Pilou et al., 2022).

Mecanismos de radiación térmica: emisión, absorción y leyes físicas asociadas.

La radiación térmica es la transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas, principalmente en el espectro infrarrojo, desde un cuerpo caliente hacia su entorno. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere un medio material para su propagación, lo que permite la transferencia de calor incluso en el vacío (Wang y You, 2023). Este fenómeno se rige por leyes físicas fundamentales como la Ley de Stefan-Boltzmann, que establece que la energía radiada por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, y la Ley de Wien, que relaciona la temperatura de un cuerpo con la longitud de onda de máxima emisión (Singh y Kumar, 2025).

En aplicaciones prácticas, la radiación térmica es un factor crítico en el diseño de sistemas de calefacción por infrarrojos, paneles solares térmicos y en la gestión térmica de satélites y vehículos espaciales. La capacidad de los materiales para emitir o absorber radiación térmica se cuantifica mediante su emisividad, un parámetro que varía entre 0 y 1, siendo 1 un emisor perfecto. La selección de materiales con propiedades radiactivas adecuadas es esencial para optimizar la eficiencia energética en diversas aplicaciones (Tafavogh y Zahedi, 2021).

Interacción simultánea de mecanismos de transferencia en sistemas complejos

En muchos sistemas térmicos complejos, los mecanismos de conducción, convección y radiación no actúan de forma aislada, sino que interactúan simultáneamente, influyendo en el comportamiento térmico global del sistema (Kamazani y Aghanajafi, 2022). Por ejemplo, en un horno industrial, el calor se transfiere desde las resistencias calefactoras al aire por radiación, el aire caliente circula por convección y las paredes del horno conducen el calor hacia el exterior. La comprensión de estas interacciones es fundamental para el diseño y la optimización de sistemas térmicos eficientes (Noorollahi et al., 2023).

La modelización y simulación de estos procesos combinados requieren enfoques integrados que consideren las propiedades térmicas de los materiales, las condiciones de operación y las geometrías involucradas (Forghani et al., 2024). El uso de herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y métodos numéricos avanzados permite predecir el comportamiento térmico de sistemas complejos y desarrollar estrategias de control térmico más efectivas. Estas técnicas son esenciales en el diseño de equipos industriales, sistemas de climatización y en la ingeniería de procesos térmicos avanzados (Benzaama et al., 2021).

Transferencia de calor en paneles solares térmicos

Tipologías y principios de funcionamiento de los colectores solares térmicos

Los colectores solares térmicos son dispositivos diseñados para captar la radiación solar y convertirla en energía térmica, utilizada principalmente para el calentamiento de agua o aire en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Existen diversas tipologías de colectores, entre las cuales destacan los colectores planos, los colectores de tubo de vacío y los colectores de concentración. Los colectores planos consisten en una superficie absorbente cubierta por un vidrio transparente, que permite la entrada de la radiación solar y minimiza las pérdidas térmicas (Smaisim et al., 2023). Los colectores de tubo de vacío, por su parte, están compuestos por tubos individuales con un vacío en su interior, lo que reduce significativamente las pérdidas por convección y conducción, aumentando su eficiencia térmica. Los colectores de concentración utilizan espejos o lentes para concentrar la radiación solar en un punto focal, alcanzando temperaturas más elevadas, adecuadas para aplicaciones industriales o generación de electricidad. Cada tipo de colector presenta ventajas y limitaciones específicas, y su selección depende de factores como el requerimiento térmico, las condiciones climáticas y el presupuesto disponible (Tao et al., 2023).

Materiales y estructuras que favorecen la eficiencia térmica en los paneles

La eficiencia térmica de los paneles solares térmicos está estrechamente relacionada con los materiales y estructuras utilizados en su fabricación. El absorbedor, generalmente fabricado en cobre o aluminio debido a su alta conductividad térmica, está recubierto con materiales selectivos que maximizan la absorción de la radiación solar y minimizan la emisión de calor. El vidrio de cobertura debe ser altamente transmisor a la radiación solar y resistente a las condiciones ambientales, mientras que el aislamiento térmico en la parte posterior y los laterales del colector

reduce las pérdidas de calor (Parvaz et al., 2023). Innovaciones recientes han introducido materiales avanzados, como recubrimientos nanoselectivos y estructuras microtexturizadas, que mejoran la captación de energía y la resistencia a la degradación. Además, el diseño estructural del colector, incluyendo la disposición de los conductos y la geometría del absorbedor, influye en la distribución del calor y en la eficiencia global del sistema. La integración de estos avances tecnológicos en los paneles solares térmicos contribuye a una mayor eficiencia energética y a una vida útil prolongada del sistema (Verma et al., 2024).

Factores ambientales y operativos que inciden en el rendimiento térmico

El rendimiento térmico de los paneles solares térmicos está influenciado por diversos factores ambientales y operativos. La irradiación solar disponible es el factor más determinante, ya que una mayor radiación implica una mayor captación de energía. Sin embargo, otros factores como la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la humedad y la presencia de nubes o sombras también afectan el rendimiento (Verma et al., 2024). Por ejemplo, temperaturas ambiente bajas pueden aumentar la eficiencia del colector al reducir las pérdidas térmicas, mientras que altas velocidades de viento pueden incrementar las pérdidas por convección (Hou et al., 2023). La orientación e inclinación del colector deben ser óptimas para maximizar la captación de radiación solar durante el año. Además, el mantenimiento regular, incluyendo la limpieza de la superficie del colector, es esencial para evitar la acumulación de suciedad que pueda reducir la eficiencia. La gestión adecuada de estos factores permite optimizar el rendimiento térmico de los paneles solares y garantizar su funcionamiento eficiente a lo largo del tiempo (Kumar et al., 2023).

Métodos de análisis del rendimiento: eficiencia energética y análisis exergético

La evaluación del rendimiento de los paneles solares térmicos se realiza mediante diversos métodos, siendo la eficiencia energética y el análisis exergético los más comunes. La eficiencia energética se define como la relación entre la energía térmica útil obtenida y la energía solar incidente sobre el colector, y se expresa en porcentaje (Kundu, 2025). Este análisis permite determinar la capacidad del sistema para convertir la energía solar en calor útil, considerando las pérdidas térmicas y ópticas. Por otro lado, el análisis exergético evalúa la calidad de la energía y su capacidad para realizar trabajo útil, considerando las irreversibilidades del proceso (Lapertot et al., 2021). Este enfoque proporciona una visión más completa del rendimiento del sistema, identificando las fuentes de ineficiencia y las oportunidades de mejora. La combinación de ambos

métodos permite una evaluación integral del desempeño de los paneles solares térmicos, facilitando la toma de decisiones para su diseño, operación y mantenimiento (Boukelia et al., 2021).

Transferencia de calor en sistemas geotérmicos

La transferencia de calor en sistemas geotérmicos es fundamental para su eficiencia y desempeño. Los mecanismos principales involucrados son la conducción, convección y, en menor medida, la radiación (Eisapour et al., 2024). La conducción térmica en el subsuelo depende de las propiedades del terreno, como la conductividad térmica y la capacidad calorífica (Gondal, 2021). La convección puede ocurrir en presencia de fluidos móviles, como en acuíferos, donde el movimiento del agua facilita el transporte de calor. La radiación, aunque presente, tiene un impacto mínimo en estos sistemas (Ragab y Orhan, 2024). La eficiencia de la transferencia térmica está influenciada por factores como la temperatura del subsuelo, la profundidad de los intercambiadores y las condiciones hidrogeológicas locales. Un diseño adecuado que considere estos aspectos es esencial para maximizar el rendimiento del sistema geotérmico (Yilmaz y Sen, 2022).

Configuración de intercambiadores de calor geotérmicos: verticales, horizontales y mixtos

La elección de la configuración de los intercambiadores de calor geotérmicos depende de diversos factores, incluyendo las características del terreno, el espacio disponible y las necesidades térmicas del proyecto (Omeiza et al., 2023). Los intercambiadores verticales, que consisten en perforaciones profundas con sondas insertadas, son adecuados para áreas con espacio limitado y ofrecen una eficiencia térmica constante debido a la estabilidad de la temperatura a mayores profundidades. Los horizontales, por otro lado, se instalan a menor profundidad y requieren más espacio superficial, siendo más económicos en términos de instalación, pero más susceptibles a las variaciones estacionales de temperatura (Ren et al., 2022). Las configuraciones mixtas combinan ambos enfoques para adaptarse a condiciones específicas del sitio, optimizando el rendimiento y los costos. La selección adecuada de la configuración es crucial para garantizar la eficiencia y sostenibilidad del sistema geotérmico (Yilmaz y Koyuncu, 2021).

Propiedades térmicas del terreno y su influencia en la eficiencia del sistema

Las propiedades térmicas del terreno, como la conductividad térmica, la capacidad calorífica y la difusividad térmica, juegan un papel determinante en la eficiencia de los sistemas geotérmicos. Un terreno con alta conductividad térmica facilita la transferencia de calor, mejorando el rendimiento del sistema (Omeiza et al., 2023). La capacidad calorífica del suelo influye en su capacidad para almacenar y liberar calor, afectando la estabilidad térmica del sistema. La difusividad térmica, que

combina la conductividad y la capacidad calorífica, determina la velocidad a la que el calor se propaga en el suelo (Ren et al., 2022). Evaluar estas propiedades mediante pruebas in situ y estudios geotécnicos es esencial para diseñar sistemas eficientes y adaptados a las condiciones locales (Akdas y Onur, 2022).

Técnicas de mejora del rendimiento térmico en instalaciones geotérmicas

Para optimizar el rendimiento térmico de las instalaciones geotérmicas, se han desarrollado diversas técnicas y estrategias. El uso de materiales con alta conductividad térmica en las sondas y tuberías mejora la transferencia de calor (Rana et al., 2024). La implementación de sistemas de control y monitoreo permite ajustar el funcionamiento del sistema en tiempo real, adaptándose a las condiciones cambiantes y mejorando la eficiencia (). Además, la integración de sistemas de almacenamiento térmico puede equilibrar la demanda y oferta de energía, aumentando la estabilidad y confiabilidad del sistema. La combinación de estas técnicas contribuye a maximizar el aprovechamiento de la energía geotérmica y a reducir los costos operativos (Behera et al., 2025).

Herramientas de modelado y análisis térmico para predicción del comportamiento subterráneo

El modelado y análisis térmico son herramientas fundamentales para predecir el comportamiento del subsuelo en sistemas geotérmicos. Mediante software especializado, como TRNSYS, EED o FEFLOW, es posible simular la transferencia de calor en el terreno y evaluar diferentes escenarios de operación (Shoaei et al., 2023). Estas herramientas permiten optimizar el diseño del sistema, prever su rendimiento a largo plazo y detectar posibles problemas antes de la implementación. Además, facilitan la integración de datos geológicos, hidrogeológicos y climáticos, proporcionando una visión integral del sistema. El uso de estas tecnologías es esencial para el desarrollo de proyectos geotérmicos eficientes y sostenibles (Pikra et al., 2024).

Integración de tecnologías solares y geotérmicas

La combinación de energía solar y geotérmica permite aprovechar las fortalezas de ambas fuentes renovables. La energía solar proporciona una fuente abundante y limpia durante las horas diurnas, mientras que la geotérmica ofrece una fuente constante y fiable de energía térmica, independientemente de las condiciones climáticas (Patel, 2023). Esta sinergia permite una mayor estabilidad en el suministro energético y una reducción en la dependencia de fuentes fósiles. Además, la integración de estas tecnologías puede adaptarse a diferentes escalas, desde aplicaciones residenciales hasta industriales, lo que facilita su implementación en diversas regiones y contextos (Assareh et al., 2021).

Enfoques híbridos y estrategias de acoplamiento térmico solar-geotérmico

Los sistemas híbridos solar-geotérmicos pueden configurarse de diversas maneras, dependiendo de las necesidades específicas y las condiciones locales. Una estrategia común es utilizar la energía solar para precalentar el fluido que circula en el sistema geotérmico, lo que mejora la eficiencia general del sistema (Hai et al., 2023). Otra opción es emplear la energía solar para alimentar las bombas de calor geotérmicas, reduciendo así el consumo de electricidad de la red. Estos enfoques permiten una mayor flexibilidad y eficiencia en la gestión de la energía térmica, adaptándose a las variaciones estacionales y a las demandas específicas de cada aplicación (Pelella et al., 2023).

Comparación del desempeño energético entre tecnologías individuales y combinadas

Los estudios comparativos han demostrado que los sistemas híbridos solar-geotérmicos superan en eficiencia a las tecnologías utilizadas de manera individual. Por ejemplo, la combinación de paneles solares fotovoltaicos con bombas de calor geotérmicas ha mostrado una reducción significativa en el consumo de energía eléctrica y una mejora en la eficiencia térmica global (Kim et al., 2023). Además, estos sistemas combinados presentan una mayor resiliencia frente a las fluctuaciones en la disponibilidad de recursos, como la variabilidad solar o las limitaciones geotérmicas locales. Esta superioridad en el desempeño energético se traduce en beneficios económicos y ambientales a largo plazo (Rahman et al., 2021).

Implicaciones prácticas para la sostenibilidad, escalabilidad e implementación industrial

La adopción de sistemas híbridos solar-geotérmicos tiene importantes implicaciones prácticas. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, estos sistemas contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al uso eficiente de recursos naturales (Dokmak et al., 2024). En términos de escalabilidad, la modularidad de las tecnologías involucradas permite su implementación gradual y adaptativa, facilitando su integración en proyectos de diferentes tamaños y características (Rahman et al., 2021). Para la industria, la implementación de estos sistemas puede traducirse en una mayor eficiencia energética, reducción de costos operativos y cumplimiento de normativas ambientales más estrictas. Además, la inversión en estas tecnologías puede posicionar a las empresas como líderes en innovación y responsabilidad ambiental (Hu et al., 2022).

Método

La presente investigación adoptó un enfoque de revisión sistemática, orientado a compilar, analizar y sintetizar el conocimiento científico actualizado sobre los procesos de transferencia de calor en

sistemas de energías renovables, específicamente paneles solares térmicos y sistemas geotérmicos. Este tipo de estudio permite identificar tendencias emergentes, vacíos de conocimiento y avances tecnológicos relevantes que orienten futuras líneas de investigación y desarrollos aplicados en ingeniería energética sostenible.

Estrategia de búsqueda y selección de información

Se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas reconocidas, tales como Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect y SpringerLink. Los criterios de búsqueda incluyeron combinaciones de palabras clave como “transferencia de calor”, “paneles solares térmicos”, “sistemas geotérmicos”, “eficiencia térmica”, “simulación térmica” y “energía renovable”. Se estableció un periodo de análisis comprendido entre los años 2021 y 2025, con el fin de asegurar la actualidad y relevancia de los estudios seleccionados.

Los artículos fueron filtrados mediante criterios de inclusión que contemplaron: i) pertinencia temática en relación con los objetivos de la investigación; ii) rigor metodológico en la caracterización de procesos térmicos; iii) publicación en revistas científicas indexadas; y iv) acceso al texto completo. Se excluyeron estudios duplicados, publicaciones no revisadas por pares, informes técnicos con datos insuficientes y trabajos centrados exclusivamente en energías no térmicas. Tras la aplicación de estos filtros, se seleccionaron 87 artículos para su análisis detallado.

Análisis documental y categorización temática

Los documentos seleccionados fueron analizados mediante un procedimiento de codificación temática, orientado a identificar patrones recurrentes en torno a los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación), parámetros de diseño térmico, materiales empleados, condiciones operativas, y métodos de evaluación del rendimiento térmico. La información fue organizada en cuatro categorías analíticas: i) fundamentos físico-matemáticos de la transferencia de calor, ii) transferencia térmica en paneles solares térmicos, iii) transferencia térmica en sistemas geotérmicos, y iv) enfoques híbridos solar-geotérmicos.

Validación cruzada y evaluación crítica

La validez del análisis fue fortalecida mediante una triangulación metodológica que incluyó: i) contrastación de los hallazgos teóricos con modelos computacionales y simulaciones térmicas reportadas en la literatura; ii) revisión cruzada entre autores de diferentes disciplinas (ingeniería térmica, geotecnia, energías renovables); y iii) evaluación crítica de los supuestos metodológicos, limitaciones experimentales y condiciones límite de los modelos evaluados.

Este enfoque riguroso permitió construir una visión integral y crítica del estado actual del conocimiento en materia de transferencia de calor en tecnologías renovables, con énfasis en la eficiencia, diseño y optimización de sistemas térmicos solares y geotérmicos.

Tabla 1 Estudio de la revisión sistemática

Autor/año	Título	Objetivo	Metodología	Resultados	Conclusión
Asadi, R., Assareh, E., Moltames, R., Olazar, M., Nedaei, M., & Parvaz, F. (2022).	Optimisation of combined cooling, heating and power (CCHP) systems incorporating the solar and geothermal energy: a review study.	Realizar una revisión exhaustiva de los estudios recientes sobre sistemas combinados de refrigeración, calefacción y energía (CCHP) alimentados por fuentes solares, geotérmicas o combinadas, con el fin de analizar la aplicación de algoritmos evolutivos multiobjetivo que permitan identificar configuraciones energéticas más eficientes tanto en términos termodinámicos como económicos.	La investigación se basa en una revisión sistemática y comparativa de estudios previos relacionados con sistemas CCHP.	Asimismo, se evidencia el uso de nanofluidos (como SiO ₂ , CuO, Al ₂ O ₃ y TiO ₂) en colectores solares incrementa significativamente la eficiencia en la transferencia de calor, lo que mejora el desempeño global del sistema.	La implementación de sistemas CCHP optimizados mediante algoritmos multiobjetivo representa una solución eficiente tanto desde el punto de vista energético como económico.
Lopez-Pascual, D., Valiente-Blanco, I., Fernandez-Munoz, M., & Diez-Jimenez, E. (2023).	Theoretical modelling and optimization of a geothermal cooling system for solar photovoltaics.	Proponer y evaluar un sistema innovador de refrigeración geotérmica de baja entalpía para módulos fotovoltaicos comerciales, con el fin de mitigar	Se diseñó un sistema de refrigeración monofásico de circuito cerrado que utiliza el subsuelo como disipador térmico natural.	Los resultados experimentales validaron la precisión del modelo teórico. Se estimó una mejora máxima en la eficiencia del módulo fotovoltaico del 10,7 % durante el	El modelo teórico desarrollado es efectivo para optimizar el sistema y predecir su comportamiento o bajo distintas condiciones climáticas.

		la pérdida de eficiencia causada por el aumento de temperatura durante su funcionamiento, especialmente en regiones con alta irradiancia.			mes de julio, con un caudal óptimo de 1,8 litros por minuto por metro cuadrado de módulo. Además, se calculó una ganancia adicional de potencia de hasta el 4,9 %.
Wang, F. y You, T. (2023).	Synergetic performance improvement of a novel building integrated photovoltaic/thermal-energy pile system for co-utilization of solar and shallow-geothermal energy.	Proponer y evaluar un sistema innovador de integración de colectores fotovoltaicos/térmicos acoplados a bombas de calor geotérmicas sobre pilotes de energía, con el fin de resolver el desequilibrio térmico del suelo, mejorar la eficiencia eléctrica de los módulos fotovoltaicos y reducir la carga térmica de edificaciones.	y Se desarrolla un sistema acoplado integrado a la edificación que utiliza el calor residual de colectores fotovoltaicos/térmicos (PV/T) para recargar el subsuelo mediante pilotes de energía, al tiempo que se extrae fluido a baja temperatura para enfriar dichos colectores y mejorar su eficiencia.	La eficiencia eléctrica de los colectores PV/T se incrementa hasta un 16,04 %, lo que representa una mejora del 22,72 % frente a sistemas fotovoltaicos convencionales. La temperatura del suelo disminuye apenas 1,5 °C, lo que indica un buen equilibrio térmico.	El sistema propuesto demuestra un acoplamiento eficiente entre energía solar y geotérmica superficial, ofreciendo beneficios sinérgicos en eficiencia energética, sostenibilidad térmica del suelo y reducción de demanda energética en edificaciones.
Singh, A. K., & Kumar, R. (2025).	Enhancing renewable energy systems using loop heat pipes: A case research on solar thermal applications.	Proponer y validar la integración de Loop Heat Pipes (LHPs) en sistemas solares térmicos, con el fin de mejorar su eficiencia térmica, reducir las pérdidas de energía y	y Se desarrolló un modelo sistemático para estudiar la integración de LHPs en sistemas solares térmicos bajo diversas condiciones	En el caso residencial, la integración de LHPs resultó en una mejora del 41,7 % en la eficiencia térmica y un incremento del 30 % en la temperatura máxima del agua.	La investigación demuestra que los Loop Heat Pipes representan una solución tecnológica transformadora para los sistemas solares térmicos, al

aumentar su operativas y reducir fiabilidad climáticas. significativamente las pérdidas de calor, operativa, en respuesta a las limitaciones inherentes a los sistemas tradicionales frente a condiciones ambientales variables. aumentar la eficiencia energética y mejorar la adaptabilidad del sistema en distintos contextos climáticos.

<p>Tafavogh, M., & Zahedi, A. (2021).</p>	<p>Design and production of a novel encapsulated nano phase change materials to improve thermal efficiency of a quintuple renewable geothermal/hydro/biomass/solar/wind hybrid system.</p>	<p>Diseñar, implementar y optimizar un sistema híbrido de energía renovable (HRES) multifuncional que proporcione simultáneamente electricidad, calor y agua pura, mediante la integración de tecnologías renovables avanzadas, con énfasis en la producción de biodiésel, encapsulación térmica y generación de hidrógeno en regiones estratégicas como Bandar Abbas.</p>	<p>Se construyó un HRES compuesto por múltiples subsistemas: una bomba de calor geotérmica acoplada a un estanque de cultivo de microalgas para producción de biomasa; un sistema solar combinado (colector cilindro-parabólico, desalinizador y paneles fotovoltaicos) para generar calor, electricidad y agua; y una unidad eólica con una membrana de intercambio de protones para generar hidrógeno.</p>	<p>Las nanocápsulas generadas alcanzaron una eficiencia de encapsulación del 67,1 % y un calor latente promedio de 163,1 kJ/kg, mostrando viabilidad para su uso como material de almacenamiento térmico.</p>	<p>Este enfoque puede ser replicable en regiones estratégicas con alta irradiancia solar y demanda energética sostenible.</p>
--	--	--	--	---	---

Kamazani, M. A., & Aghanajafi, C. (2022).	Multi-objective optimization and exergoeconomic evaluation of a hybrid geothermal-PVT system integrated with PCM.	Analizar técnica y económicamente el rendimiento de un sistema híbrido compuesto por un colector térmico fotovoltaico (PVT), materiales de cambio de fase (PCM) y una bomba de calor geotérmica (GSHP), con el propósito de optimizar tanto el coste nivelado de la energía (LCOE) como la eficiencia exérgica en aplicaciones de calefacción y refrigeración.	El estudio se llevó a cabo en tres fases principales: (1) desarrollo de una simulación numérica transitoria de una bomba de agua acoplada a un intercambiador geotérmico tipo U vertical (GSHX) y un compresor con variador de velocidad (VSD); (2) aplicación del algoritmo NSGA-II para la optimización multiobjetivo de LCOE y eficiencia exérgica, considerando múltiples variables (profundidad y número de perforaciones, parámetros de PVT y PCM, configuración del sistema); y (3) evaluación dinámica del comportamiento del sistema utilizando EES y TRNSYS para simulación y	La optimización exérgica permitió alcanzar un mayor factor solar (SF) y una menor dependencia del consumo de electricidad de la red. La simulación mostró que la integración de los colectores PVT en el sistema combinado redujo la carga térmica anual del edificio en un 6,5 %.	Esta configuración reduce significativamente la carga térmica del edificio y mejora la eficiencia global del sistema, promoviendo su viabilidad para aplicaciones energéticamente sostenibles.
--	---	--	---	--	--

			análisis de escenarios.		
Hemmatatabady, H., Welsch, B., Formhals, J., & Sass, I. (2022).	AI-based enviro-economic optimization of solar-coupled and standalone geothermal systems for heating and cooling.	Evaluar y optimizar diferentes configuraciones de sistemas de intercambiadores de calor de pozo (BHE) utilizados para calefacción y refrigeración de edificios, con el fin de identificar aquellos que presenten un menor factor de emisión (FE) y un coste normalizado de la energía (LCOE) más eficiente, en comparación con los sistemas tradicionales basados en combustibles fósiles.	Se realizó un análisis comparativo de múltiples configuraciones de sistemas BHE mediante simulaciones dinámicas del sistema de calefacción global.	El modelo de optimización reveló que los diseños de BHE acoplados a energía solar ofrecen los niveles más bajos de emisiones en sistemas combinados de calefacción y refrigeración. Comparado con un sistema de referencia basado en combustibles fósiles, el diseño BHE más económico logró una reducción del 60 % en el factor de emisión, con un incremento del LCOE de solo el 13 %.	En conjunto, estos resultados respaldan la viabilidad técnica, ambiental y económica de los sistemas BHE en la transición energética sostenible.

Resultados

Asadi et al. (2022) evidenciaron que la incorporación de nanofluidos como SiO₂, CuO, Al₂O₃ y TiO₂ en los colectores solares de los sistemas CCHP mejora considerablemente la eficiencia en la transferencia térmica, optimizando el rendimiento global del sistema. Por su parte, Lopez-Pascual et al. (2023) propusieron un sistema de refrigeración geotérmica de baja entalpía para módulos fotovoltaicos comerciales, el cual fue validado experimentalmente y demostró una mejora máxima en la eficiencia del módulo del 10,7 % en condiciones estivales, con una ganancia adicional de potencia del 4,9 %. Wang y You (2023) desarrollaron un sistema acoplado de colectores fotovoltaicos/térmicos (PV/T) integrados a bombas de calor geotérmicas a través de pilotes de energía, logrando un incremento en la eficiencia eléctrica de los colectores hasta el 16,04 % y un

desequilibrio térmico del suelo casi nulo, con una variación de temperatura de tan solo 1,5 °C. Singh y Kumar (2025) demostraron que la integración de Loop Heat Pipes (LHPs) en sistemas solares térmicos residenciales incrementa en un 41,7 % la eficiencia térmica y eleva la temperatura máxima del agua en un 30 %, mejorando así el desempeño del sistema bajo condiciones ambientales variables. En otro estudio, Tafavogh y Zahedi (2021) diseñaron un sistema híbrido de energías renovables (HRES) multifuncional que incorpora nanomateriales encapsulados como medio de almacenamiento térmico, alcanzando una eficiencia de encapsulación del 67,1 % y un calor latente promedio de 163,1 kJ/kg, lo que valida su aplicabilidad en entornos con alta irradiancia solar. Kamazani y Aghanajafi (2022) analizaron un sistema híbrido compuesto por colectores térmicos fotovoltaicos, materiales de cambio de fase y una bomba de calor geotérmica, logrando una reducción del 6,5 % en la carga térmica anual de los edificios y una mejora del factor solar, disminuyendo la dependencia energética de la red eléctrica convencional. Finalmente, Hemmatabady et al. (2022) evaluaron diversas configuraciones de sistemas BHE mediante simulaciones dinámicas y un modelo de optimización basado en inteligencia artificial, encontrando que los diseños acoplados a energía solar reducen el factor de emisión en un 60 % respecto a sistemas fósiles, con un aumento moderado del LCOE del 13 %, lo que respalda su viabilidad técnica, económica y ambiental.

Discusión

El análisis de estos antecedentes demuestra que la sinergia entre distintas fuentes de energía renovable —particularmente la solar y la geotérmica— puede generar soluciones altamente eficientes, sostenibles y adaptables a diversos contextos geográficos y climáticos. La aplicación de metodologías de optimización multiobjetivo no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce los costos a largo plazo, fortaleciendo la viabilidad económica de estos sistemas. Uno de los principales hallazgos radica en la efectividad de las configuraciones acopladas (como PVT-GSHP o BHE-solar) para mitigar pérdidas de eficiencia térmica, regular el equilibrio térmico del subsuelo y disminuir la dependencia de energía proveniente de la red. Adicionalmente, la implementación de tecnologías de almacenamiento térmico mediante encapsulación de materiales de cambio de fase permite estabilizar el suministro energético y responder a variaciones en la demanda con mayor eficacia.

Los datos recopilados también evidencian que el desarrollo de modelos teóricos precisos y su validación empírica son fundamentales para avanzar en la implementación de estos sistemas a escala real. Los beneficios medioambientales derivados de estas tecnologías, como la reducción significativa de emisiones de gases contaminantes, refuerzan su papel estratégico en el proceso de transición hacia sistemas energéticos sostenibles y resilientes.

Conclusión

Los avances en tecnologías híbridas de energía renovable, respaldados por métodos de optimización inteligentes y modelado numérico avanzado, están transformando el paradigma energético hacia esquemas más sostenibles, eficientes y económicamente viables. La integración de fuentes como la energía solar, geotérmica, eólica y biomasa, junto con soluciones innovadoras de almacenamiento térmico y mejora del rendimiento térmico y eléctrico, ha demostrado ser una estrategia eficaz para reducir la huella ambiental sin comprometer el rendimiento operativo.

En este sentido, los estudios analizados confirman que la implementación de sistemas híbridos optimizados no solo contribuye a la reducción de emisiones y la eficiencia energética de los edificios, sino que también plantea soluciones adaptables a contextos regionales específicos. Por tanto, estos desarrollos constituyen una base sólida para políticas de descarbonización, diseño de edificaciones inteligentes y expansión de infraestructuras energéticas sostenibles a nivel global.

Referencias

1. Akdas, S. B., & Onur, M. (2022). Analytical solutions for predicting and optimizing geothermal energy extraction from an enhanced geothermal system with a multiple hydraulically fractured horizontal-well doublet. *Renewable Energy*, 181, 567-580. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121013495>
2. Asadi, R., Assareh, E., Moltames, R., Olazar, M., Nedaei, M., & Parvaz, F. (2022). Optimisation of combined cooling, heating and power (CCHP) systems incorporating the solar and geothermal energy: a review study. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 42-60. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01430750.2019.1630299>
3. Assad, M., & Rosen, M. A. (Eds.). (2021). *Design and performance optimization of renewable energy systems*. Academic press.

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ODoEEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Study+of+Heat+Transfer+in+Renewable+Energy:+Optimization+of+Solar+Thermal+Panels+and+Geothermal+Systems&ots=hSLzk8_VOL&sig=DkR_LBLR9OQWtAbbHpGFoUajEh0

4. Assareh, E., Assareh, M., Alirahmi, S. M., Jalilinasrabad, S., Dehdar, A., & Izadi, M. (2021). An extensive thermo-economic evaluation and optimization of an integrated system empowered by solar-wind-ocean energy converter for electricity generation—Case study: Bandar Abbas, Iran. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 100965. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245190492100127X>
5. Assareh, E., Hoseinzadeh, S., Agarwal, N., Delpisheh, M., Dehdar, A., Feyzi, M., ... & Lee, M. (2023). A transient simulation for a novel solar-geothermal cogeneration system with a selection of heat transfer fluids using thermodynamics analysis and ANN intelligent (AI) modeling. *Applied Thermal Engineering*, 231, 120698. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123007275>
6. Behera, U. S., Sangwai, J. S., & Byun, H. S. (2025). A comprehensive review on the recent advances in applications of nanofluids for effective utilization of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114901. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124006270>
7. Benzaama, M. H., Menhoudj, S., Lekhal, M. C., Mokhtari, A., & Attia, S. (2021). Multi-objective optimisation of a seasonal solar thermal energy storage system combined with an earth–Air heat exchanger for net zero energy building. *Solar energy*, 220, 901-913. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21002644>
8. Boukelia, T. E., Arslan, O. Ğ. U. Z., & Bouraoui, A. (2021). Thermodynamic performance assessment of a new solar tower-geothermal combined power plant compared to the conventional solar tower power plant. *Energy*, 232, 121109. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221013578>
9. Dokmak, H., Faraj, K., Faraj, J., Castelain, C., & Khaled, M. (2024). Geothermal systems classification, coupling, and hybridization: A recent comprehensive review. *Energy and Built Environment*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123324000345>

10. Eisapour, A. H., Rad, F. M., & Fung, A. S. (2024). Techno-economic and environmental study of a hybrid solar ground source heat pumps for a heating-dominated community in a cold climate; a case study in Toronto. *Renewable Energy*, 231, 120874. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014812400942X>
11. Farajollahi, A., Baharvand, M., & Takleh, H. R. (2024). Modeling and optimization of hybrid geothermal-solar energy plant using coupled artificial neural network and genetic algorithm. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 348-360. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582024003537>
12. Forghani, A. H., Solghar, A. A., & Hajabdollahi, H. (2024). Optimal design of a multi-generation system based on solar and geothermal energy integrated with multi-effect distillatory. *Applied Thermal Engineering*, 236, 121381. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123014102>
13. Ghiasi, M., Wang, Z., Mehrandezh, M., & Paranjape, R. (2025). Enhancing efficiency through integration of geothermal and photovoltaic in heating systems of a greenhouse for sustainable agriculture. *Sustainable Cities and Society*, 118, 106040. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221067072400862X>
14. Gondal, I. A. (2021). Prospects of Shallow geothermal systems in HVAC for NZEB. *Energy and Built Environment*, 2(4), 425-435. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123320300957>
15. Hai, T., Ali, M. A., Chaturvedi, R., Almojil, S. F., Almohana, A. I., Alali, A. F., ... & Shamseldin, M. A. (2023). A low-temperature driven organic Rankine cycle for waste heat recovery from a geothermal driven Kalina cycle: 4E analysis and optimization based on artificial intelligence. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, 102895. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138822009432>
16. Hemmatabady, H., Welsch, B., Formhals, J., & Sass, I. (2022). AI-based enviro-economic optimization of solar-coupled and standalone geothermal systems for heating and cooling. *Applied Energy*, 311, 118652. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922001209>
17. Hou, G., Xu, L., Liu, Z., Chen, D., Ru, H., & Taherian, H. (2023). Solar-assisted geothermal heat pump systems: current practice and future development. In *Renewable energy*

- production and distribution (pp. 217-246). Academic Press.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443184390000136>
18. Hu, S., Yang, Z., Li, J., & Duan, Y. (2022). Optimal solar thermal retrofit for geothermal power systems considering the lifetime brine degradation. *Renewable Energy*, 186, 628-645. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122000295>
19. Jafari, R. (2021). Optimization and energy analysis of a novel geothermal heat exchanger for photovoltaic panel cooling. *Solar Energy*, 226, 122-133. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21007039>
20. Kamazani, M. A., & Aghanajafi, C. (2022). Multi-objective optimization and exergoeconomic evaluation of a hybrid geothermal-PVT system integrated with PCM. *Energy*, 240, 122806. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221030553>
21. Kim, Y. J., Entchev, E., Na, S. I., Kang, E. C., Baik, Y. J., & Lee, E. J. (2023). Investigation of system optimization and control logic on a solar geothermal hybrid heat pump system based on integral effect test data. *Energy*, 284, 129308. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223027020>
22. Kumar, A., Singh, V. P., Meena, C. S., & Dutt, N. (Eds.). (2023). *Thermal energy systems: Design, computational techniques, and applications*. CRC Press. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=Ydu-EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=Study+of+Heat+Transfer+in+Renewable+Energy:+Optimization+of+Solar+Thermal+Panels+and+Geothermal+Systems&ots=CBq4NMJthp&sig=KzDOzCcDMytsIanR3OL0vAERupU>
23. Kundu, A. (2025). Application of Geothermal Energy-Based Earth-Air Heat Exchanger in Sustainable Buildings. *Heat Transfer Enhancement Techniques: Thermal Performance, Optimization and Applications*, 221-232. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781394270996.ch9>
24. Lapertot, A., Cuny, M., Kadoch, B., & Le Métayer, O. (2021). Optimization of an earth-air heat exchanger combined with a heat recovery ventilation for residential building needs. *Energy and Buildings*, 235, 110702. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820334885>

25. López-Pascual, D., Valiente-Blanco, I., Fernandez-Munoz, M., & Diez-Jimenez, E. (2023). Theoretical modelling and optimization of a geothermal cooling system for solar photovoltaics. *Renewable Energy*, 206, 357-366. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148123001064>
26. Mohammadi, M., Mahmoudan, A., Nojedehi, P., Hoseinzadeh, S., Fathali, M., & Garcia, D. A. (2023). Thermo-economic assessment and optimization of a multigeneration system powered by geothermal and solar energy. *Applied Thermal Engineering*, 230, 120656. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123006853>
27. Noorollahi, Y., Pakzadmanesh, M., Kashani, A., Pouyaei, A., Yousefi, F., Roumi, S., & Jalilinasrabady, S. (2023). Reliable renewable power production by modeling of geothermal assisted solar chimney power plant. *Geothermics*, 111, 102701. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037565052300055X>
28. Omeiza, L. A., Abid, M., Subramanian, Y., Dhanasekaran, A., Bakar, S. A., & Azad, A. K. (2023). Challenges, limitations, and applications of nanofluids in solar thermal collectors—a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-29. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-30656-9>
29. Parvaz, M., Mohammadi, H., & Assareh, E. (2023). Effect of different operation strategies on transient solar thermal power plant simulation models with molten salt as heat transfer fluid—Considering 5 cities under different climate zones—Dubai and Iran. *Thermal Science and Engineering Progress*, 38, 101654. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904923000070>
30. Patel, A. (2023). Enhancing heat transfer efficiency in solar thermal systems using advanced heat exchangers. *Multidisciplinary International Journal of Research and Development (MIJRD)*, 2(06), 31-51. <https://www.mijrd.com/papers/v2/i6/MIJRDV2I60003.pdf>
31. Pelella, F., Zsembinszki, G., Viscito, L., Mauro, A. W., & Cabeza, L. F. (2023). Thermo-economic optimization of a multi-source (air/sun/ground) residential heat pump with a water/PCM thermal storage. *Applied Energy*, 331, 120398. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922016555>
32. Pikra, G., Darmanto, P. S., & Astina, I. M. (2024). A review of solar chimney-earth air heat exchanger (SCEAHE) system integration for thermal comfort building. *Journal of Building*

- Engineering, 111484.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224030523>
33. Pilou, M., Kosmadakis, G., Meramveliotakis, G., & Krikas, A. (2022). Towards a 100% renewable energy share for heating and cooling in office buildings with solar and geothermal energy. *Solar Energy Advances*, 2, 100020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667113122000080>
34. Ragab, K. M., & Orhan, M. F. (2024). Evaluating conventional and renewable energy systems for green buildings: A case study on energy efficiency and cost optimization. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, 105233.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X24012644>
35. Rahman, A., Abas, N., Dilshad, S., & Saleem, M. S. (2021). A case study of thermal analysis of a solar assisted absorption air-conditioning system using R-410A for domestic applications. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101008.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21001714>
36. Rana, M., Nuhash, M. M., & Bhuiyan, A. A. (2024). A CFD modelling for optimizing geometry parameters for improved performance using clean energy geothermal ground-to-air tunnel heat exchangers. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53, 103867.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X23011735>
37. Ren, F., Wei, Z., & Zhai, X. (2022). A review on the integration and optimization of distributed energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112440.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212200346X>
38. Shoaie, M., Hajinezhad, A., & Moosavian, S. F. (2023). Design, energy, exergy, economy, and environment (4E) analysis, and multi-objective optimization of a novel integrated energy system based on solar and geothermal resources. *Energy*, 280, 128162.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223015566>
39. Singh, A. K., & Kumar, R. (2025). Enhancing renewable energy systems using loop heat pipes: A case research on solar thermal applications. *Applied Thermal Engineering*, 126866. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431125014589>
40. Smaisim, G. F., Abed, A. M., & Shamel, A. (2023). Investigation and optimization of solar collector and geothermal pump hybrid system for cogeneration of heat and power with

- exergy-economic approach. *Clean Energy*, 7(3), 571-581.
<https://academic.oup.com/ce/article-abstract/7/3/571/7175983>
41. Tafavogh, M., & Zahedi, A. (2021). Design and production of a novel encapsulated nano phase change materials to improve thermal efficiency of a quintuple renewable geothermal/hydro/biomass/solar/wind hybrid system. *Renewable Energy*, 169, 358-378.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120320589>
42. Tao, H., Zhou, J., & Musharavati, F. (2023). Techno-economic examination and optimization of a combined solar power and heating plant to achieve a clean energy conversion plant. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 223-234.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582023002860>
43. Verma, V., Thangavel, S., Dutt, N., Kumar, A., & Weerasinghe, R. (Eds.). (2024). *Highly Efficient Thermal Renewable Energy Systems: Design, Optimization and Applications*. CRC Press.
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=TqUIEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Study+of+Heat+Transfer+in+Renewable+Energy:+Optimization+of+Solar+Thermal+Panels+and+Geothermal+Systems&ots=9lYFiuExbf&sig=WLXO4ndqythwBCEu0fLQ56wiiIs>
44. Wang, F., & You, T. (2023). Synergetic performance improvement of a novel building integrated photovoltaic/thermal-energy pile system for co-utilization of solar and shallow-geothermal energy. *Energy Conversion and Management*, 288, 117116.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423004624>
45. Yilmaz, C., & Sen, O. (2022). Thermoeconomic analysis and artificial neural network based genetic algorithm optimization of geothermal and solar energy assisted hydrogen and power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(37), 16424-16439.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922012009>
46. Yilmaz, C., & Koyuncu, I. (2021). Thermoeconomic modeling and artificial neural network optimization of Afyon geothermal power plant. *Renewable Energy*, 163, 1166-1181.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120314324>

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).