

**JMNJE V4. N1. 067**

**Viabilidad técnica y económica del uso de baterías de arena para el  
almacenamiento térmico en el autoabastecimiento energético residencial**

***Technical and economic feasibility of sand batteries for thermal storage in  
residential energy self-supply***

**Autores:**

Danner Anderson Figueroa Guerra  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
Quevedo – Ecuador  
[dfigueroag@uteq.edu.ec](mailto:dfigueroag@uteq.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0003-1040-5485>

Ángel Andrés Silva Verdezoto  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
Quevedo – Ecuador  
[asilvav2@uteq.edu.ec](mailto:asilvav2@uteq.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0009-7722-9528>

Samantha Marlene Puente Bósquez  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
Quevedo – Ecuador  
[spuenteb@uteq.edu.ec](mailto:spuenteb@uteq.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0005-4102-8231>

Alberto Ricardo Delgado Revilla  
Universidad Técnica Estatal de Quevedo  
Quevedo – Ecuador  
[adelgador@uteq.edu.ec](mailto:adelgador@uteq.edu.ec)  
<https://orcid.org/0009-0009-2726-2338>

**Autor de correspondencia:** Danner Anderson Figueroa Guerra, [dfigueroag@uteq.edu.ec](mailto:dfigueroag@uteq.edu.ec)

**Recepción:** 26-abril-2026

**Aceptación:** 30-mayo-2026

**Publicación:** 10-julio-2026

**Cómo citar este artículo:**

Figueroa Guerra, D. A., Silva Verdezoto, Ángel A., Puente Bósquez, S. M., & Delgado Revilla, A. R. (2026). Viabilidad técnica y económica del uso de baterías de arena para el almacenamiento térmico en el autoabastecimiento energético residencial. *Journal of Multidisciplinary Novel Journeys & Explorations*, 4(1), 1-27. <https://doi.org/10.63688/jkwyzd97>

© 2026; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea correctamente citada.



## RESUMEN

El presente estudio analiza la factibilidad técnica y económica del uso de baterías de arena en sistemas residenciales de autoabastecimiento energético. Este sistema innovador propone almacenar energía en forma térmica utilizando arena de sílice, la cual se calienta mediante resistencias eléctricas alimentadas por fuentes renovables, principalmente paneles solares fotovoltaicos. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y analítico, sustentado en la recopilación de información técnica, cálculos termodinámicos y eléctricos, así como en análisis comparativos de desempeño. Para la modelación del sistema se empleó el software COMSOL Multiphysics, que permitió simular el comportamiento térmico del almacenamiento en arena, evaluar la distribución interna de temperatura, cuantificar las pérdidas térmicas, analizar la transferencia de calor hacia el intercambiador y estimar el tiempo útil de suministro energético. Los resultados obtenidos aportan una base sólida para la implementación de sistemas de almacenamiento térmico sostenibles en aplicaciones residenciales.

**Palabras clave:** Batería de arena; almacenamiento térmico; autoabastecimiento energético; energía solar fotovoltaica; motor Stirling.

## ABSTRACT

This study analyzes the technical and economic feasibility of using sand batteries in residential self-sufficient energy systems. This innovative system proposes storing energy in thermal form using silica sand, which is heated by electric resistors powered by renewable sources, mainly photovoltaic solar panels. The research was conducted using a quantitative and analytical approach, based on the collection of technical information, thermodynamic and electrical calculations, and comparative performance analyses. COMSOL Multiphysics software was used to model the system, making it possible to simulate the thermal behavior of sand storage, evaluate internal temperature distribution, quantify thermal losses, analyze heat transfer to the exchanger, and estimate the useful energy supply time. The results provide a solid basis for the implementation of sustainable thermal storage systems in residential applications.

**Keywords:** Sand battery; thermal energy storage; energy self-supply; photovoltaic solar energy; Stirling engine.



## **1. INTRODUCCIÓN**

En el marco de la transición energética global, disponer de mecanismos para almacenar energía de forma eficiente, respetuosa con el medio ambiente y a bajo costo resulta esencial para avanzar hacia un futuro basado en energía limpia (Popp et al., 2020). Entre las nuevas tecnologías, las baterías de arena están ganando relevancia gracias a sus ventajas: alta capacidad de almacenamiento de energía, bajo costo de fabricación y un impacto ambiental menor que el de otras alternativas (Usman et al., 2021). Estos sistemas resultan especialmente idóneos para hogares que buscan autosuficiencia energética a partir de fuentes solares y eólicas, ya que aportan estabilidad y autonomía para aprovechar al máximo dichas fuentes renovables (Santiago et al., 2024).

Las baterías de arena aprovechan las propiedades térmicas de materiales económicos, como la arena de sílice, para acumular y liberar energía en forma de calor (Fernando et al., 2023). Este calor puede transformarse en energía eléctrica mediante ciclos termodinámicos, lo que ofrece una opción viable para el almacenamiento estacionario en usos domésticos (Dats et al., 2019). No obstante, la puesta en marcha de esta tecnología plantea interrogantes fundamentales sobre su factibilidad técnica y financiera, en particular al contrastarla con tecnologías más establecidas, como las baterías de ion-litio (Vykhodtsev et al., 2022). En este contexto, el propósito del presente estudio es examinar la viabilidad técnica y económica de la aplicación de baterías de arena en sistemas de autoabastecimiento residencial. Mediante una revisión detallada de la literatura existente y un análisis comparativo con otras alternativas de almacenamiento, se valoran elementos como la eficiencia energética, la vida útil, los costos iniciales y operativos, así como el efecto medioambiental asociado a esta técnica. Este enfoque permite definir criterios precisos para establecer si las baterías de arena pueden constituir una alternativa competitiva y sostenible en el sector residencial (Salkuti, 2025).

Adicionalmente, este estudio busca identificar los posibles obstáculos que podrían restringir su aplicación a gran escala, como la infraestructura requerida, la aceptación social y la adaptación de las regulaciones vigentes.

## **2. METODOLOGÍA**



Para la ejecución del estudio se adoptó un enfoque analítico que permitió descomponer el sistema de almacenamiento térmico propuesto en sus elementos fundamentales y estudiar su comportamiento individual y en conjunto. Se realizó un análisis detallado de variables como la transferencia de calor, la distribución térmica en el medio de almacenamiento, la eficiencia del motor Stirling y la potencia eléctrica generada. Estos elementos se examinaron mediante simulaciones en COMSOL Multiphysics, lo que permitió observar el impacto de diferentes configuraciones, materiales y condiciones operativas sobre el rendimiento general del sistema. Este método facilitó la identificación de los componentes críticos para la funcionalidad y eficiencia de la batería de arena.

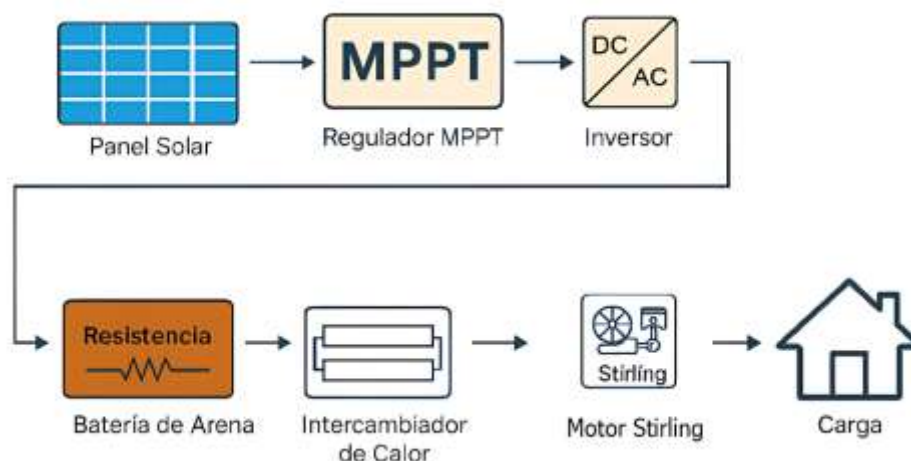
Se aplicó además un enfoque comparativo que permitió evaluar de forma estructurada las diferencias técnicas, económicas y ambientales entre las baterías de arena y las baterías de ion-litio, comúnmente utilizadas en sistemas de autoabastecimiento. La comparación consideró criterios como eficiencia energética, durabilidad, capacidad de almacenamiento, impacto ambiental, facilidad de implementación y costos asociados. A través de esta metodología fue posible determinar las ventajas y limitaciones de cada tecnología, proporcionando una base objetiva para argumentar la viabilidad de la batería de arena como solución innovadora y sostenible para el almacenamiento energético residencial.

Para la validación del sistema propuesto se utilizó el método de simulación y modelado mediante el software COMSOL Multiphysics. Este enfoque permitió representar con precisión los procesos de transferencia de calor dentro del medio de almacenamiento térmico, considerando parámetros como la conductividad térmica de la arena, la temperatura de operación de las resistencias eléctricas y la eficiencia del intercambiador de calor. Mediante el modelado tridimensional del sistema se analizaron fenómenos como la distribución térmica, las pérdidas energéticas y la evolución de la temperatura durante el ciclo de carga y descarga. Esta herramienta de simulación resultó esencial para prever el comportamiento del sistema en condiciones reales, optimizar el diseño térmico y obtener datos cuantitativos necesarios para su comparación con tecnologías de almacenamiento convencionales como las baterías de ion-litio.

### **Figura 1.**

*Esquema propuesto para sistemas de autoabastecimiento residencial con batería de arena.*





El proceso inicia con la captación de la radiación solar mediante paneles fotovoltaicos, los cuales convierten la energía solar en electricidad de corriente continua (CC) con una eficiencia promedio del 21 % (Lee, 2023; Sharma et al., 2021). Esta energía es gestionada por un controlador de carga con seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) (Nisa et al., 2021; Le Veut et al., 2024), que optimiza la extracción de energía ajustando continuamente el punto de operación de los paneles (Vyas & Kushwah, 2023). Posteriormente, la corriente continua se transforma en corriente alterna (CA) mediante un inversor, lo que permite su uso en cargas domésticas y en el sistema de almacenamiento térmico (Hinov, 2023).

La energía eléctrica en forma de CA alimenta resistencias eléctricas que generan calor, elevando la temperatura de la arena de sílice contenida en la batería térmica (Lewis, s.f.). La arena de sílice actúa como medio de almacenamiento térmico, capaz de acumular calor a temperaturas de hasta 1200 °C, gracias a su abundancia, estabilidad térmica y bajo costo (Al Rizeiqi et al., 2023). Para minimizar las pérdidas térmicas, la batería de arena se conforma con materiales aislantes que ayudan a conservar el calor durante el mayor tiempo posible (Fantucci et al., 2015).

El calor almacenado se transfiere al fluido de trabajo del motor Stirling mediante un intercambiador de calor, diseñado para maximizar la eficiencia de transferencia térmica (Russo et al., 2018). El motor Stirling convierte la energía térmica en energía mecánica a través de ciclos de compresión y expansión de un gas (Kongtragool & Wongwises, 2006). Finalmente, un generador eléctrico acoplado al motor Stirling transforma la energía mecánica



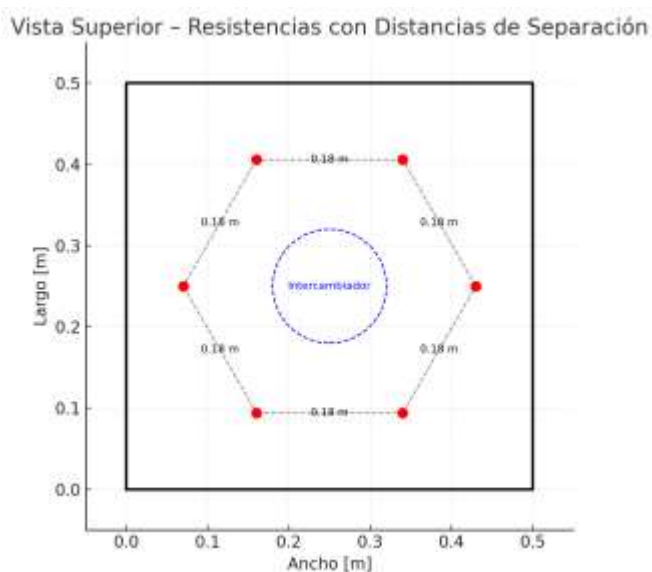
en electricidad, completando así el ciclo de conversión de energía desde la captación solar hasta el suministro eléctrico (Wang et al., 2025).

Para determinar el modelo de panel solar más adecuado es necesario conocer la cantidad de energía que consume la residencia durante un mes. Este valor se estimó a partir del promedio del consumo energético residencial reportado por las principales empresas de distribución eléctrica del país.

Además del consumo energético promedio, otro parámetro fundamental para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico es la irradiancia solar, ya que determina cuánta energía puede captar un panel en una región determinada. La irradiancia se expresa en kilovatios-hora por metro cuadrado por día ( $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ) y varía en función de la ubicación geográfica, las condiciones climáticas y la estacionalidad. En este estudio, al no estar delimitado a una zona específica del país, se consideró un valor promedio representativo para Ecuador, estimado en  $4,5 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$ , de acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) (Inca Yajamín et al., 2023). Este valor permite realizar una estimación técnica inicial de la producción energética diaria de los paneles, necesaria para determinar la cantidad de módulos requeridos para cubrir la demanda mensual calculada. Se determinó que se requieren 9 paneles para cubrir el consumo de 346 kWh, conectados en 3 cadenas de 3 paneles en serie (Akinyele et al., 2016). Para este sistema fotovoltaico residencial, compuesto por 9 paneles Trina Solar TSM-400-DE09 de 400 W cada uno (totalizando 3,6 kW), se seleccionó el regulador de carga Victron SmartSolar MPPT 150/85. Esta elección se fundamenta en su capacidad para manejar eficientemente la corriente generada por los paneles, su compatibilidad con sistemas de 12/24/36/48 V y su alta eficiencia de conversión (Acharya & Aithal, 2020).

Dado que la potencia esperada del sistema es de 3,6 kW, este valor resulta aceptable para el máximo de potencia que resiste el regulador. Para el sistema se seleccionó el inversor Victron MultiPlus-II 48/5000/70-50, que permite una entrega continua de hasta 4 kW en corriente alterna a 230 V, suficiente para abastecer la carga residencial, y se ajusta adecuadamente a los niveles de tensión y corriente proporcionados por los paneles (Caicedo-Peñaranda et al., 2024; Barrionuevo Simbaña et al., 2023). La elección se justifica por su alta eficiencia, su compatibilidad con configuraciones en paralelo y su capacidad para gestionar picos de demanda de hasta 9 kW (Livinti, 2021).

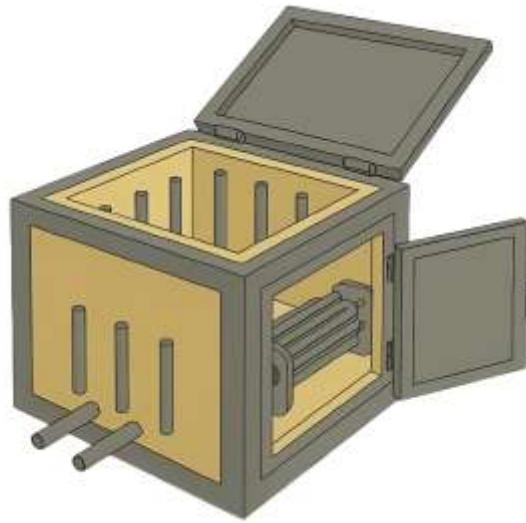


**Figura 2.***Ubicación de las resistencias dentro de la batería de arena*

El uso de resistencias térmicas tubulares de 400 mm de longitud y 10 mm de diámetro, con una potencia unitaria de 600 W a 230 V, se justifica tanto por criterios térmicos como espaciales. Estas resistencias permiten una distribución uniforme del calor en el volumen de arena, aprovechando eficientemente la geometría vertical del contenedor, cuya altura interna útil es de aproximadamente 0,735 m. Su forma delgada y alargada facilita la inmersión total dentro del medio granular, maximizando la superficie de contacto térmico sin ocupar un volumen excesivo (Choi et al., 2021; Liu et al., 2024). Además, la elección de seis resistencias distribuidas equidistantemente garantiza que no existan zonas frías dentro del sistema (Xing et al., 2022), ya que la distancia efectiva entre resistencias (0,27 m) se calculó para permitir una cobertura térmica homogénea en todo el lecho de arena, capaz de disipar la máxima temperatura admitida por el motor Stirling, de 350 °C (Uechi et al., 2024; Nilsson et al., 2019).

En función de las condiciones de operación del sistema (hasta 350 °C), el uso de fibra cerámica se considera la opción más conveniente por su buena capacidad de aislamiento a alta temperatura, su bajo espesor requerido y su disponibilidad comercial para aplicaciones industriales (Fantucci et al., 2015).

**Figura 3.***Diseño del contenedor con aislante, arena, resistencias térmicas e intercambiador de calor*



Las dimensiones del contenedor, para albergar la arena, las resistencias, el intercambiador de calor y el aislante, son de  $0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 0,835 \text{ m}$ ; descontando los 5 cm que ocupa el aislante, se dispone de  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 0,735 \text{ m}$  útiles para los componentes.

La carcasa seleccionada es de acero inoxidable 304, por sus características térmicas y físicas. La arena de sílice seca de grano fino representa la opción más recomendable, como también lo demuestra su implementación exitosa en la batería de arena de Finlandia.

La masa de arena se determina a partir de un análisis energético que considera la cantidad total de energía térmica que el sistema debe almacenar durante la etapa de carga. En este sistema se emplean seis resistencias térmicas de 600 W cada una, conectadas para disipar una potencia total de 3,6 kW. Considerando un tiempo de funcionamiento continuo de 5 horas, la energía eléctrica total suministrada es de 64 800 kJ.

Esta es la energía térmica que deberá ser absorbida por la arena en forma de calor sensible (Poulouse et al., 2022). El valor de 240,2 kg representa la masa óptima de arena necesaria para almacenar toda la energía generada por las resistencias durante el proceso de carga térmica (Niksiar et al., 2024; Tetteh et al., 2024). Además, permite alcanzar una temperatura de 350 °C, umbral mínimo necesario para el arranque eficiente del motor Stirling (Uechi et al., 2024; Nilsson et al., 2019; Romanelli, 2020), asegurando una operación térmicamente estable dentro del volumen útil del sistema (Senft, 2002; Savall-Alemany et al., 2020).

Para la transferencia de calor desde el medio de almacenamiento (arena caliente) hacia el fluido de trabajo que alimenta el motor Stirling existen varias opciones de intercambiadores



técnicamente viables. Entre las alternativas más utilizadas se encuentran los intercambiadores de carcasa y tubos (El-Said & Abou Al-Sood, 2019), que destacan por su resistencia mecánica, su capacidad de operar a temperaturas superiores a los 600 °C y su facilidad de mantenimiento (Marzouk et al., 2023). Otra opción son los intercambiadores de placas soldadas, que ofrecen alta eficiencia térmica en diseños compactos, aunque tienen limitaciones frente a temperaturas y presiones extremas (Arsenyeva et al., 2023). También pueden considerarse los intercambiadores de tipo espiral, útiles cuando se requiere una configuración compacta y se desea manejar fluidos con partículas o comportamiento no lineal. Finalmente, en aplicaciones que no requieren fluido líquido intermedio pueden utilizarse intercambiadores aire-aire regenerativos, aunque su eficiencia es menor. La elección final depende de las condiciones térmicas del sistema, el tipo de fluido a calentar, las necesidades de mantenimiento, el espacio disponible y la compatibilidad con el ciclo térmico del generador.

El intercambiador de calor de carcasa y tubos fue seleccionado por su alta resistencia a temperaturas extremas, su capacidad de integrarse de forma inmersa en medios sólidos como la arena y su eficiente rendimiento en sistemas de transferencia térmica prolongados. Su diseño permite transportar el calor desde la arena almacenada hacia un fluido portador sin contacto directo con el foco térmico, lo que mejora la seguridad y la durabilidad del sistema. Además, admite configuraciones modulares adaptadas al volumen de almacenamiento, manteniendo la estabilidad térmica y minimizando las pérdidas por convección externa.

Existen tres configuraciones principales de motor Stirling: tipo Alfa, Beta y Gamma. Cada una posee características particulares de diseño y rendimiento térmico que las hacen más o menos adecuadas para distintas aplicaciones.

El motor Stirling tipo Beta fue seleccionado como la opción más adecuada para este proyecto debido a su equilibrio entre eficiencia, simplicidad y adaptabilidad. A diferencia del tipo Alfa —que, aunque ofrece mayor eficiencia térmica, requiere la sincronización de dos pistones y una temperatura de arranque más alta—, el tipo Beta permite operar de manera efectiva desde los 300 °C, temperatura alcanzable por la batería de arena. Además, su configuración con desplazador y pistón en un solo cilindro facilita la fabricación, reduce el número de componentes móviles y simplifica el mantenimiento. Esta combinación lo convierte en un candidato ideal para aplicaciones de autoconsumo energético donde se prioriza la



estabilidad operativa, el bajo costo de implementación y la facilidad de integración con otros componentes térmicos.

Para dimensionar adecuadamente el generador eléctrico acoplado al motor Stirling es necesario conocer la potencia media que dicho motor será capaz de entregar durante el ciclo de conversión de energía térmica a eléctrica (Ridwan et al., 2025).

El motor Stirling debe generar una potencia media de aproximadamente 194 W durante 5 horas (0,994 kW en una hora), por lo que el generador eléctrico de CA acoplado tendrá una potencia nominal ligeramente superior a este valor; al conectarse a la red, incorporará un regulador de velocidad para mantener las revoluciones por minuto.

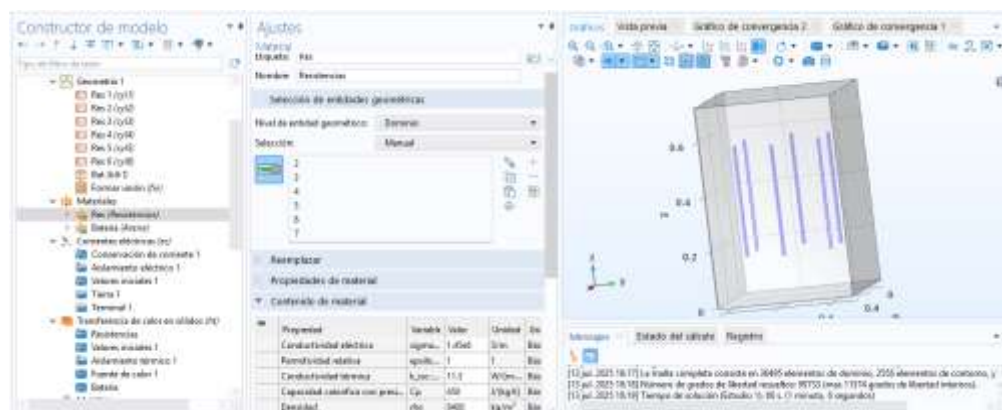
El generador seleccionado corresponde a un modelo síncrono monofásico de corriente alterna (CA), diseñado para operar a 220 V y 60 Hz, con una potencia nominal ajustada al rango de salida del motor Stirling (alrededor de 200 W) (Ridwan et al., 2025). La elección de un generador de CA responde a la necesidad de integrar el sistema con cargas residenciales convencionales o, bajo condiciones controladas, en paralelo con la red eléctrica. Al ser síncrono, este generador garantiza frecuencia y voltaje estables, especialmente al incorporar un regulador automático de voltaje (AVR), que mantiene la tensión constante incluso frente a variaciones en la velocidad del motor Stirling.

### 3. RESULTADOS

A continuación, se detallan los resultados obtenidos durante todo el proceso de la investigación.

#### Figura 4.

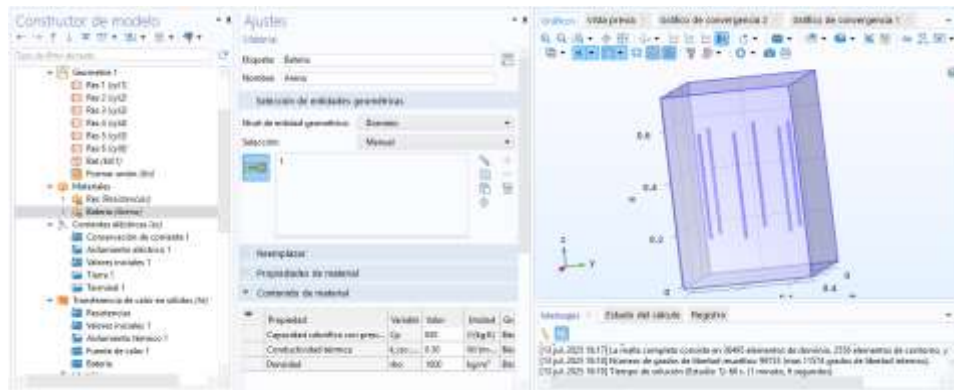
*Parámetros del material de las resistencias.*



Se presentan los parámetros físicos asignados al material de las resistencias, tales como la capacidad calorífica específica, la densidad, la conductividad térmica, la permitividad relativa y la densidad. Tomado de Constructor de modelo, por COMSOL.

**Figura 5.**

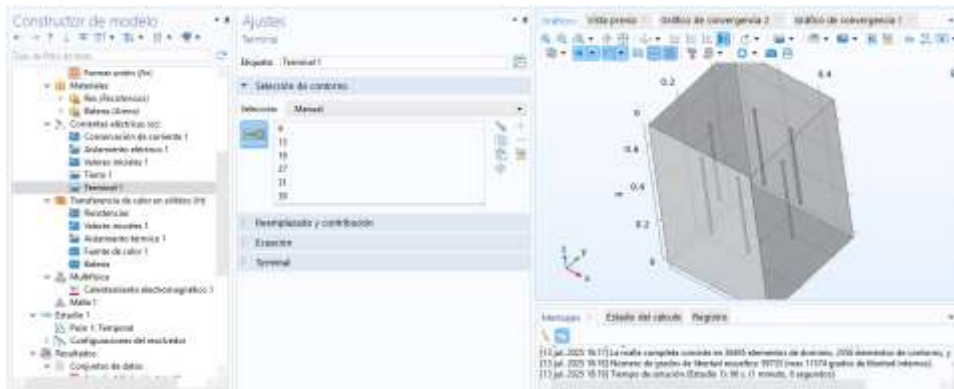
*Parámetros del material de la arena.*



Se presentan los parámetros físicos asignados al material de arena, tales como la capacidad calorífica específica, la densidad y la conductividad térmica. Tomado de Constructor de modelo, por COMSOL.

**Figura 6.**

*Terminal aplicada a las resistencias.*



**Figura 7.**

*Temperatura alcanzada en el tiempo de 5 horas.*





Aunque se estableció un umbral operativo de 623,15 K (350 °C) como temperatura de diseño, la simulación mostró un pico térmico de 626 K al cabo de 5 horas. Este pequeño exceso se explica por la inercia térmica del sistema y el eficiente aislamiento aplicado, que redujo al mínimo las pérdidas de calor. Dado que la fuente de calor por efecto Joule se mantuvo constante, el sistema continuó acumulando energía interna, lo que llevó a superar ligeramente el valor esperado y confirmó la alta capacidad de retención térmica del medio granular.

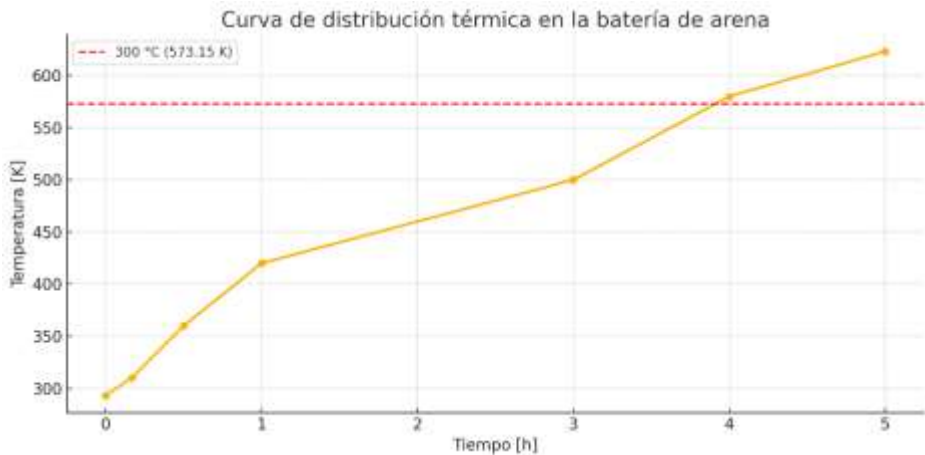
**Tabla 1.**  
*Evolución de la temperatura durante el proceso de carga*

| Tiempo (s) | Temperatura (K) |
|------------|-----------------|
| 0          | 293,15          |
| 600        | 304,15          |
| 1800       | 326,15          |
| 3600       | 360,15          |
| 10800      | 493,15          |
| 14400      | 560,15          |
| 18000      | 626,15          |

El análisis del aumento de temperatura en función del tiempo revela una respuesta térmica progresiva del sistema ante la aplicación constante de calor volumétrico.

**Figura 8.**  
*Curva de carga de la batería de arena.*





La Figura 8 representa la curva de carga de la batería de arena durante las 5 horas. El uso de arena como material de almacenamiento térmico ha demostrado una notable estabilidad frente a los ciclos de carga y descarga, lo que le confiere una vida útil muy superior a la de las tecnologías electroquímicas. Según un estudio del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), sistemas como el proyecto ENDURING han mostrado que la arena puede calentarse y enfriarse miles de veces sin perder sus propiedades térmicas (Ma, 2023), lo que permite operaciones sostenidas durante más de 30 años sin degradación significativa del medio de almacenamiento (SMARTGRIDSINFO, 2024). Esta característica convierte a la arena en un material altamente confiable y rentable para sistemas de almacenamiento térmico de larga duración, especialmente en aplicaciones estacionarias donde la durabilidad es un factor crítico.

**Tabla 2.**  
*Comparativa técnica de la batería de litio y de arena*

| Parámetro                      | Batería de Arena               | Batería de Ion-Litio         |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Tipo de almacenamiento         | Térmico                        | Electroquímico               |
| Energía útil almacenada        | 5.83 MJ $\approx$ 1.62 kWh     | 5 – 15 kWh                   |
| Densidad energética (estimada) | 10 – 15 kWh/m <sup>3</sup>     | 200 – 250 kWh/m <sup>3</sup> |
| Eficiencia de conversión total | 20 – 35 % (con motor Stirling) | 90 – 95 %                    |
| Vida útil esperada             | > 30 años                      | 10 – 15 años                 |



|                            |                 |                                 |
|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| Materiales principales     | Arena de sílice | Litio, cobalto, níquel, grafito |
| Temperatura de operación   | 200 – 600 °C    | 0 – 45 °C                       |
| Riesgo térmico / explosión | Muy bajo        | Medio / alto                    |
| Degradación por ciclos     | No aplica       | Sí, gradual                     |

El proceso de extracción del litio, particularmente a partir de salmueras, genera un fuerte impacto ambiental, especialmente en zonas áridas como el Salar de Atacama, donde se requiere la evaporación de millones de litros de agua para obtener una tonelada del mineral. Este proceso afecta directamente a los ecosistemas locales, disminuye la disponibilidad hídrica para las comunidades y altera los equilibrios geoquímicos de los acuíferos circundantes. Además, la minería del litio implica el uso de químicos como cloruro de sodio y cal, que pueden generar residuos tóxicos si no se gestionan adecuadamente. La fabricación y disposición de baterías de ion-litio también generan emisiones de gases de efecto invernadero y, aunque existen iniciativas de reciclaje, su implementación aún es limitada, lo que agrava la huella ambiental de esta tecnología (Sticco et al., 2021).

La fabricación de baterías de ion-litio genera entre 56 y 494 kg de CO<sub>2</sub> por kWh de capacidad, dependiendo de factores como el tipo de batería y la fuente de energía utilizada en la producción (Ellingsen et al., 2016). Asimismo, se ha identificado que las baterías de ion-litio contienen compuestos PFAS, conocidos como «químicos eternos» por su persistencia en el medio ambiente. Estos compuestos, como las bis-perfluoroalquil sulfonimidias (bis-FASI), pueden afectar la salud humana y la biodiversidad (Rensmo et al., 2023).

La arena de sílice, utilizada como medio termoestable en sistemas de almacenamiento térmico, es un material abundante y no tóxico, cuya extracción tiene un impacto ambiental considerablemente menor. El proceso de explotación implica únicamente procesos mecánicos de remoción, trituración y clasificación, sin necesidad de sustancias químicas agresivas ni grandes volúmenes de agua. A diferencia del litio, el uso de arena no genera residuos peligrosos ni contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por su naturaleza inerte y su capacidad para soportar miles de ciclos térmicos sin degradación, se considera una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental para el almacenamiento de energía térmica a largo plazo (Pedro et al., 2020).

Tabla 3.



*Comparación ambiental de las baterías*

| Característica                | Baterías de Ion-Litio          | Almacenamiento Térmico con Arena |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Consumo de Agua               | Alto                           | Bajo                             |
| Emisiones de GEI (producción) | 56–494 kg CO <sub>2</sub> /kWh | Mínimas                          |
| Uso de Materiales Tóxicos     | Sí                             | No                               |
| Reciclabilidad                | Limitada                       | No aplica                        |
| Impacto en Ecosistemas        | Significativo                  | Mínimo                           |
| Precio                        | \$11,050                       | \$5,997                          |

El sistema logra alcanzar temperaturas superiores a los 350 °C, suficientes para activar la conversión energética mediante un motor Stirling, con una eficiencia de conversión aceptable dentro del rango térmico considerado. Sin embargo, si bien esta tecnología demuestra una alta estabilidad térmica, una vida útil superior a 30 años y un impacto ambiental muy bajo, su aporte energético neto aún es limitado en comparación con las necesidades eléctricas residenciales convencionales. Por tanto, este sistema no está diseñado para sustituir por completo la red eléctrica, sino para complementar el suministro y reducir parcialmente los costos asociados al consumo de energía de la red pública, especialmente durante las horas pico o en zonas rurales con acceso intermitente al servicio eléctrico.

**A. Ventajas**

El sistema de almacenamiento con batería de arena presenta múltiples ventajas que lo posicionan como una alternativa sostenible frente a las tecnologías electroquímicas. Entre sus beneficios destacan su elevada vida útil, superior a 30 años, sin degradación significativa por ciclos térmicos, así como su bajo impacto ambiental, al no requerir materiales tóxicos ni procesos contaminantes.

**B. Desventajas**

No obstante, el sistema también presenta algunas desventajas que limitan su aplicabilidad directa en entornos residenciales. La más relevante es su baja densidad energética, que obliga al uso de grandes volúmenes de arena para alcanzar niveles energéticos útiles, lo cual incrementa los requerimientos de espacio e infraestructura. Asimismo, la eficiencia de



conversión de calor a electricidad es reducida, especialmente cuando se emplea un motor Stirling, situándose entre el 20 % y el 35 %. Otro aspecto limitante es el tiempo útil de entrega de calor: en el diseño simulado, la temperatura útil ( $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) solo se mantiene por aproximadamente 42 minutos, lo que restringe su autonomía operativa.

En áreas urbanas, la implementación de un sistema de almacenamiento térmico con batería de arena presenta ciertas limitaciones debido a la disponibilidad restringida de espacio físico y a las regulaciones constructivas existentes. Si bien el sistema ofrece beneficios ambientales y de seguridad, su baja densidad energética implica la necesidad de un volumen considerable de arena para lograr un almacenamiento significativo, lo que puede resultar inviable en edificaciones con espacio reducido. Sin embargo, en zonas urbanas con residencias unifamiliares o centros comunitarios que cuenten con espacio disponible y acceso a energía solar, este tipo de sistema puede funcionar como complemento al suministro eléctrico convencional, ayudando a reducir parcialmente los picos de demanda y el consumo desde la red.

En contextos rurales, el sistema con batería de arena representa una alternativa factible y atractiva. La disponibilidad de espacio, el menor costo del terreno y la posibilidad de instalar infraestructura adaptada facilitan su implementación. Además, en comunidades con acceso limitado a tecnologías de almacenamiento electroquímico, la batería de arena puede aprovechar el exceso de generación solar o eólica durante el día para almacenar calor y transformarlo posteriormente en energía térmica o eléctrica. Aunque su eficiencia de conversión eléctrica es inferior a la de otros sistemas, su bajo mantenimiento, alta durabilidad y bajo costo la convierten en una solución de respaldo sostenible en entornos rurales.

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta investigación confirman que el almacenamiento térmico basado en arena de sílice constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente favorable para el autoabastecimiento energético residencial, aunque con limitaciones claras en densidad energética y eficiencia de conversión. La capacidad del medio granular para alcanzar y retener temperaturas superiores a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ , evidenciada en las simulaciones de COMSOL, coincide con la premisa fundamental de la tecnología de baterías de arena: aprovechar el calor sensible de un material abundante y de bajo costo para acumular energía



durante períodos prolongados (Vyas & Kushwah, 2023). Este comportamiento refuerza la idea de que la arena, más que un material de relleno actúa como un reservorio térmico estable capaz de sostener ciclos repetidos de carga y descarga sin degradación apreciable.

El pico térmico de 626 K registrado tras 5 horas de carga, ligeramente superior al umbral de diseño de 623,15 K, es coherente con la elevada inercia térmica del lecho de arena y con la eficacia del aislamiento de fibra cerámica empleado. Estudios experimentales recientes sobre sistemas de calor sensible con arena de sílice en configuraciones de carcasa y tubos han demostrado que la granulometría fina mejora la transferencia de calor y reduce los tiempos de carga y descarga (Niksiar et al., 2024). En la misma línea, se ha comprobado que la conductividad térmica efectiva del lecho —parámetro crítico para la velocidad de carga— puede incrementarse notablemente mediante el control de la humedad, la compactación y la incorporación de aditivos conductores (Tetteh et al., 2024). Estos hallazgos sugieren que el desempeño obtenido en el presente diseño podría optimizarse aún más incorporando estrategias de mejora de la conductividad, lo que reduciría el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de arranque del motor Stirling.

Uno de los aspectos más debatidos en la literatura es la baja densidad energética del almacenamiento en arena frente a las baterías electroquímicas, limitación que también se manifiesta en este estudio, donde la temperatura útil ( $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) solo se mantiene durante aproximadamente 42 minutos. Sin embargo, esta desventaja debe interpretarse en el contexto de la aplicación: la tecnología no compite directamente con el ion-litio en aplicaciones de alta densidad, sino que ocupa un nicho distinto orientado al almacenamiento de larga duración y bajo costo. Análisis tecno-económicos de sistemas híbridos que combinan generación fotovoltaica con almacenamiento en arena han mostrado que estas configuraciones pueden alcanzar fracciones solares elevadas y competir económicamente con los combustibles fósiles en la producción de calor de proceso, precisamente porque el material de almacenamiento es económico y escalable (Saini et al., 2023). De forma complementaria, evaluaciones de almacenamiento térmico de partículas de sílice reportan costos de calor por debajo de umbrales muy competitivos cuando se optimizan la capacidad y la integración con la fuente renovable (Al-Ghussain et al., 2024).

La comparación entre la batería de arena y la de ion-litio realizada en este trabajo (Tablas 2 y 3) se alinea con la evidencia internacional sobre las ventajas ambientales del



almacenamiento térmico. La fabricación de baterías de litio conlleva emisiones significativas de gases de efecto invernadero y, además, se ha documentado que su reciclaje puede constituir una fuente de sustancias perfluoroalquiladas (PFAS) al medio ambiente, con potenciales efectos sobre la salud y la biodiversidad (Rensmo et al., 2023). En contraste, la arena de sílice es inerte, no tóxica y no genera residuos peligrosos, lo que respalda su posicionamiento como una opción de bajo impacto para el almacenamiento estacionario. Esta diferencia ambiental, más que un argumento accesorio, constituye uno de los pilares que justifican la exploración de la tecnología en contextos donde la sostenibilidad y la seguridad son prioritarias.

Desde la perspectiva de la integración residencial, los resultados de este estudio son consistentes con investigaciones que sitúan el almacenamiento térmico dentro de la vivienda como un mecanismo eficaz para reducir costos y desplazar demanda. Se ha demostrado que el almacenamiento térmico in situ en edificaciones puede satisfacer necesidades de energía a un costo inferior al de las baterías electroquímicas en escenarios de alta penetración renovable (Odukumaiya et al., 2021). Asimismo, experiencias de microrredes en comunidades remotas evidencian que la hibridación entre baterías electroquímicas y almacenamiento térmico sensible mejora el desempeño global del sistema y reduce el costo nivelado de la energía (Knowles et al., 2025). Estos antecedentes coinciden con la conclusión del presente trabajo de que la batería de arena no debe concebirse como un sustituto total de la red, sino como un complemento que reduce parcialmente el consumo y aporta respaldo, especialmente en zonas rurales o de acceso intermitente.

Finalmente, la validez del enfoque de simulación empleado se sustenta en el creciente cuerpo de herramientas de modelado abiertas para almacenamiento térmico basado en arena, que permiten representar con fidelidad los procesos de carga y descarga en aplicaciones de calefacción y generación (Milner et al., 2023). La coherencia entre los resultados numéricos obtenidos en COMSOL y las tendencias reportadas por estos modelos refuerza la fiabilidad de las estimaciones de este estudio. No obstante, se reconoce que la validación experimental de un prototipo a escala constituye el siguiente paso necesario para confirmar las cifras de eficiencia térmica (89,91 %) y de conversión térmica-eléctrica (en torno al 35 %) estimadas, así como para caracterizar con mayor precisión las pérdidas durante la fase de descarga. En síntesis, la comparación con la literatura de alto impacto permite sostener que los



hallazgos de este trabajo son competitivos y coherentes con el estado del arte, y que la batería de arena representa una vía prometedora de almacenamiento sostenible cuyo principal reto pendiente es mejorar su densidad energética y la eficiencia de la etapa de conversión.

## 5. CONCLUSIONES

El análisis económico permitió cuantificar los costos de instalación de un sistema completo con batería de arena, considerando todos los componentes necesarios: paneles solares, regulador, inversor, resistencias, intercambiador, motor Stirling y protecciones. El sistema presentó un costo total aproximado de \$5 997, siendo una alternativa significativamente más económica que los sistemas equivalentes con baterías de litio, cuyo costo total supera los \$11 000. Esto demuestra que, desde la perspectiva de la inversión inicial, las baterías de arena son viables económicamente, especialmente en aplicaciones donde la prioridad sea reducir el CAPEX (Cole & Karmakar, 2023; NREL, 2021), sin comprometer la seguridad ni la sostenibilidad del sistema.

Las simulaciones térmicas realizadas en COMSOL y el posterior análisis energético mostraron que el sistema con batería de arena puede alcanzar temperaturas de hasta 350 °C en 5 horas de carga, lo que permite activar eficientemente un motor Stirling tipo Beta. La eficiencia térmica del sistema se estimó en 89,91 %, mientras que la eficiencia de conversión térmica a eléctrica se ubicó en torno al 35 %. Asimismo, se confirmó que el calor almacenado en la arena puede mantenerse útil durante 42 minutos, con una vida útil del sistema superior a 30 años gracias a la estabilidad térmica del medio. Estos resultados evidencian un alto potencial técnico para aplicaciones de respaldo energético o suministro parcial en viviendas. La batería de arena mostró ventajas notables frente a la de litio en términos de impacto ambiental, vida útil y costo. Al no requerir materiales escasos ni tóxicos ni procesos electroquímicos complejos, su implementación resulta más sostenible (Zhong et al., 2018; Tetteh et al., 2021). Además, los costos de operación y mantenimiento son inferiores al 1 % anual (NREL, 2021). No obstante, presenta limitaciones técnicas como la baja densidad energética, el mayor volumen requerido y la autonomía reducida, aspectos que definen las líneas de trabajo futuro orientadas a mejorar la eficiencia de conversión y la densidad de almacenamiento.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acharya, P. S., & Aithal, P. S. (2020). A comparative study of MPPT and PWM solar charge controllers and their integrated system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1712(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1712/1/012023>
- Akinyele, D. O., Rayudu, R. K., & Tan, R. H. G. (2016). Comparative study of photovoltaic technologies based on performance, cost and space requirement: Strategy for selection and application. *International Journal of Green Energy*, 13(13), 1352–1368. <https://doi.org/10.1080/15435075.2015.1112287>
- Al Rizeiqi, N., Jedda, M., & Liew, P. Y. (2023). Silica sand as thermal energy storage for renewable-based hydrogen and ammonia production plants. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 1111–1116. <https://doi.org/10.3303/CET23106186>
- Al-Ghussain, L., Johnson, T., Martinek, J., & Ma, Z. (2024). Techno-economic feasibility analysis of solar industrial process heat using particle thermal energy storage. *ASME 2024 18th International Conference on Energy Sustainability*. <https://doi.org/10.1115/es2024-131139>
- Arsenyeva, O., Tovazhnyanskyy, L., Kapustenko, P., Klemeš, J. J., & Varbanov, P. S. (2023). Review of developments in plate heat exchanger heat transfer enhancement for single-phase applications in process industries. *Energies*, 16(13), 4976. <https://doi.org/10.3390/en16134976>
- Barrionuevo Simbaña, A. P., Marreno Ramírez, S., & Quinatoa Caiza, C. I. (2023). Análisis de armónicos generados en inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.823>
- Caicedo-Peñaranda, E. A., Pardo-García, A., Mantilla-Villalobos, M. A., & Pabón-Fernández, L. D. (2024). Recent advances in multifunctional inverters in photovoltaic systems. *Universidad de Santander*. <https://doi.org/10.15649/2346030X.4159>
- Choi, H. J., Ahn, H., Choi, G. S., Kang, J. S., & Huh, J. H. (2021). Analysis of long-term change in the thermal resistance of extruded insulation materials through accelerated tests. *Applied Sciences*, 11(19), 9354. <https://doi.org/10.3390/app11199354>
- Cole, W., & Karmakar, A. (2023). Cost projections for utility-scale battery storage: 2023 update. *National Renewable Energy Laboratory*. <https://www.nrel.gov/publications>



- Datas, A., Ramos, A., & del Cañizo, C. (2019). Techno-economic analysis of solar PV power-to-heat-to-power storage and trigeneration in the residential sector. *Applied Energy*, 256, 113935. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113935>
- El-Said, E. M. S., & Abou Al-Sood, M. M. (2019). Shell and tube heat exchanger with new segmental baffles configurations: A comparative experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 150, 803–810. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.039>
- Ellingsen, L. A. W., Singh, B., & Strømman, A. H. (2016). The size and range effect: Lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>
- Fantucci, S., Lorenzati, A., Kazas, G., Levchenko, D., & Serale, G. (2015). Thermal energy storage with super insulating materials: A parametrical analysis. *Energy Procedia*, 78, 441–446. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.691>
- Fernando, D., et al. (2023). Desarrollo de una batería de arena para almacenamiento de energía renovable en zonas rurales. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 1–10. <https://doi.org/10.26507/paper.3027>
- Hinov, N. (2023). A unified approach to the analysis of DC/AC converters, based on the study of electromagnetic processes in a series RLC circuit. *Electronics*, 12(4), 983. <https://doi.org/10.3390/electronics12040983>
- Inca Yajamín, G. S., Cabrera Carrión, D. F., Villalta Gualán, D. F., Bautista Zurita, R. C., & Cabrera Carrión, H. D. (2023). Evaluación de la actualidad de los sistemas fotovoltaicos en Ecuador: Avances, desafíos y perspectivas. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(3), 9493–9509. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v7i3.6835](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6835)
- Knowles, H., Swingler, A., & Swan, L. (2025). Hybrid battery and sensible thermal energy storage for a microgrid in a remote Indigenous Canadian community. *Energy Storage*, 7(4), e70165. <https://doi.org/10.1002/est2.70165>
- Kongtragool, B., & Wongwises, S. (2006). Thermodynamic analysis of a Stirling engine including dead volumes of hot space, cold space and regenerator. *Renewable Energy*, 31(3), 345–359. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.012>



- Le Veut, D. M. C. D., Shuting, W., & Bolin, Z. (2024). Comparative study of MPPT and PWM charge controllers: Designing an efficient solution for small-scale solar installations with budget constraints. *Saudi Journal of Engineering and Technology*, 9(8), 367–376. <https://doi.org/10.36348/sjet.2024.v09i08.001>
- Lee, A. (2023). Thermal energy storage and energy conversion technologies. MDPI. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-9090-5>
- Lewis, J. (s.f.). Utilizing electric resistance heat for thermal energy storage systems. North American Clean Energy. Recuperado el 24 de abril de 2025, de <https://www.nacleanenergy.com/energy-storage/utilizing-electric-resistance-heat-for-thermal-energy-storage-systems>
- Liu, J., Al Keyyam, I., Xie, Y., & Wang, X. (2024). Perspectives on interfacial thermal resistance of 2D materials: Raman characterization and underlying physics. *Surface Science and Technology*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44251-024-00037-6>
- Livinti, P. (2021). Comparative study of a photovoltaic system connected to a three-phase grid by using PI or fuzzy logic controllers. *Sustainability*, 13(5), 2562. <https://doi.org/10.3390/su13052562>
- Ma, Z. (2023). Economic long-duration electricity storage by using low-cost thermal energy storage and high-efficiency power cycle (ENDURING). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/publications>
- Marzouk, S. A., Abou Al-Sood, M. M., El-Said, E. M. S., Younes, M. M., & El-Fakharany, M. K. (2023). A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3>
- Milner, D., Hinkelman, K., & Zuo, W. (2023). Open-source models for sand-based thermal energy storage in heating applications. *Proceedings of the 15th International Modelica Conference*. <https://doi.org/10.3384/ecp204627>
- National Renewable Energy Laboratory. (2021). NREL options a modular, cost-effective, build-anywhere particle thermal energy storage technology. <https://www.nrel.gov/news/detail/program/2021/nrel-options-a-modular-cost-effective-build-anywhere-particle-thermal-energy-storage-technology>



- Niksiar, P., Rogillio, C., Torab, H., & Tiari, S. (2024). Experimental study of a silica sand sensible heat storage system enhanced by fins. *Energies*, 17(21), 5402. <https://doi.org/10.3390/en17215402>
- Nilsson, M., Abou-Taouk, A., Sandberg, H., & Lindh, J. (2019). A Stirling engine for thermal energy storage. *AIP Conference Proceedings*, 2126, 200025. <https://doi.org/10.1063/1.5117653>
- Nisa, M., Andleeb, M., & Farhad Ilahi, B. (2021). Effect of partial shading on a PV array and its maximum power point tracking using particle swarm optimization. *Journal of Physics: Conference Series*, 1817(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1817/1/012025>
- Odukamaiya, A., Woods, J., James, N., Kaur, S., Gluesenkamp, K. R., Kumar, N., Mumme, S., Jackson, R., & Prasher, R. (2021). Addressing energy storage needs at lower cost via on-site thermal energy storage in buildings. *Energy & Environmental Science*, 14(10), 5315–5329. <https://doi.org/10.1039/d1ee01992a>
- Popp, H., Koller, M., Jahn, M., & Bergmann, A. (2020). Mechanical methods for state determination of lithium-ion secondary batteries: A review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101859. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101859>
- Poulose, T., Kumar, S., & Torell, G. (2022). Power storage using sand and engineered materials as an alternative for existing energy storage technologies. *Journal of Energy Storage*, 51, 104381. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104381>
- Rensmo, A., Savvidou, E. K., Cousins, I. T., Hu, X., Schellenberger, S., & Benskin, J. P. (2023). Lithium-ion battery recycling: A source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) to the environment? *Environmental Science: Processes & Impacts*, 25(6), 1015–1030. <https://doi.org/10.1039/d2em00511e>
- Ridwan, M., Gasulla, M., & Reverter, F. (2025). Principle and applications of thermoelectric generators: A review. *Sensors*, 25(8), 2484. <https://doi.org/10.3390/s25082484>
- Romanelli, A. (2020). Stirling engine operating at low temperature difference. *American Journal of Physics*, 88(4), 319–324. <https://doi.org/10.1119/10.0000832>



- Russo, V., Mazzei, D., & Liberatore, R. (2018). Thermal energy storage with integrated heat exchangers using stratified molten salt system for 1 MWe CSP. AIP Conference Proceedings, 2033, 090025. <https://doi.org/10.1063/1.5067119>
- Saini, P., Kivioja, V., Naskali, L., Byström, J., Semeraro, C., Gambardella, A., & Zhang, X. (2023). Techno-economic assessment of a novel hybrid system of solar thermal and photovoltaic driven sand storage for sustainable industrial steam production. Energy Conversion and Management, 293, 117414. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117414>
- Salkuti, S. R. (2025). Techno-economic analysis of renewable energy, storage, and electric vehicles for sustainable development. Energies, 18(2), 238. <https://doi.org/10.3390/en18020238>
- Santiago, D., et al. (2024). Almacenamiento de energía en sistemas renovables: Baterías versus alternativas emergentes. Revista Social Fronteriza, 4(5), e45467. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(5\)467](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(5)467)
- Savall-Aleman, F., Esparza-García, M., Álvarez-Herrero, J. F., & Rosa-Cintas, S. (2020). Determining the efficiency of a Stirling engine using Arduino: A proposal for teaching thermodynamics in introductory courses. Revista Brasileira de Ensino de Física, 42, e20200279. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0279>
- Senft, J. R. (2002). Optimum Stirling engine geometry. International Journal of Energy Research, 26(12), 1087–1101. <https://doi.org/10.1002/er.838>
- Sharma, D., Mehra, R., & Raj, B. (2021). Comparative analysis of photovoltaic technologies for high efficiency solar cell design. Superlattices and Microstructures, 153, 106861. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2021.106861>
- SMARTGRIDSINFO. (2024, 8 de abril). El NREL investiga la arena como material más eficiente para el almacenamiento de energía térmica. <https://www.smartgridsinfo.es/2024/04/08/nrel-investiga-arena-material-mas-eficiente-almacenamiento-energia-termica>
- Sticco, M., Guerra, G., Kwaterka, V., & Valdés, S. (2021). Impactos ambientales de la explotación de litio en los humedales y recursos hídricos del Altiplano. Wetlands International.



- Tetteh, S., Juul, G., Järvinen, M., & Santasalo-Aarnio, A. (2024). Improved effective thermal conductivity of sand bed in thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, 86, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111350>
- Tetteh, S., Yazdani, M. R., & Santasalo-Aarnio, A. (2021). Cost-effective electro-thermal energy storage to balance small scale renewable energy systems. *Journal of Energy Storage*, 41, 102829. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102829>
- Uechi, H., Uechi, L., & Uechi, S. T. (2024). Thermoelectric Stirling engine (TEG-Stirling engine) based on the analysis of thermomechanical dynamics (TMD). *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 12(7), 2386–2399. <https://doi.org/10.4236/jamp.2024.127143>
- Usman, M., Khalid, K., & Mehdi, M. A. (2021). What determines environmental deficit in Asia? Embossing the role of renewable and non-renewable energy utilization. *Renewable Energy*, 168, 1165–1176. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.012>
- Vyas, A. M., & Kushwah, G. S. (2023). Sand battery: An innovative solution for renewable energy storage (A review). In 2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RESEM57584.2023.10236319>
- Vykhodtsev, A. V., Jang, D., Wang, Q., Zareipour, H., & Rosehart, W. D. (2022). A review of lithium-ion battery models in techno-economic analyses of power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112584. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112584>
- Wang, H., et al. (2025). A novel high-power free-piston Stirling engine generator with integrated heat pipes for thermal-to-electric conversion of clean energy. *Energy*, 314, 134218. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134218>
- Xing, W., Xu, Y., Song, C., & Deng, T. (2022). Recent advances in thermal interface materials for thermal management of high-power electronics. *Nanomaterials*, 12(19), 3365. <https://doi.org/10.3390/nano12193365>
- Zhong, G., Gong, J., Wang, C., Xu, K., & Chen, H. (2018). Comparison of the electrochemical performance and thermal stability for three kinds of charged cathodes. *Frontiers in Energy Research*, 6, 110. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00110>



**Conflicto de Intereses:** Los autores afirman que no existen conflictos de intereses en este estudio y que se han seguido éticamente los procesos establecidos por esta revista. Además, aseguran que este trabajo no ha sido publicado parcial ni totalmente en ninguna otra revista.

**CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA:**

Nombres de autores e iniciales: Danner Anderson Figueroa Guerra (DAFG), Andrés Ángel Andrés Silva Verdezoto (ARSV), Samantha Marlene Puente Bósquez (SMPB), Alberto Ricardo Delgado Revilla (ARDR).

1. Conceptualización: DAFG
2. Curación de datos: SMPB
3. Análisis formal: ARDR
4. Adquisición de fondos: ARSV
5. Investigación: DAFG
6. Metodología: ARSV
7. Administración del proyecto: DAFG
8. Recursos: SMPB
9. Software: ARSV
10. Supervisión: ARDR
11. Validación: SMPB
12. Visualización: ARDR
13. Redacción -- Borrador original: ARSV
14. Redacción -- Revisión y edición: DAFG

