

Del Calor Residual a la Electricidad: El Potencial de los Materiales Termoeléctricos para una Industria Sustentable

Juan Jesús Reyes-Valdez ^{1,*}, Edna Carina De la Cruz-Terrazas ², Deyanira Del Angel-López ³ y Eugenio Rodríguez-González ³

¹ EPM del SECIHTI-Instituto Politécnico Nacional-Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira Km. 14.5, Altamira 89600, Tamaulipas, México.

² SECIHTI-Instituto Politécnico Nacional-Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira Km. 14.5, Altamira 89600, Tamaulipas, México.

³ Instituto Politécnico Nacional-Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira Km. 14.5, Altamira 89600, Tamaulipas, México.

* Autor de correspondencia: juan.jesus.reyes@hotmail.com

Artículo de divulgación científica

Recibido: 19 de marzo de 2026

Aceptado: 16 de julio de 2026

Publicado: 31 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.692>

Resumen: El crecimiento de la demanda energética mundial y los efectos del cambio climático han impulsado la búsqueda de tecnologías capaces de mejorar la eficiencia en el uso de la energía y reducir el impacto ambiental de las actividades industriales. En numerosos procesos productivos, una fracción considerable de la energía consumida se pierde en forma de calor residual, el cual suele disiparse al ambiente sin ser aprovechado. La recuperación de este calor representa una oportunidad importante para optimizar el uso de la energía y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las tecnologías emergentes para aprovechar esta fuente energética destacan los generadores termoeléctricos (TEG), dispositivos capaces de convertir directamente gradientes de temperatura en electricidad mediante el efecto Seebeck. En sectores industriales como el cementero, metalúrgico, automotriz, químico y de generación eléctrica, los TEG pueden contribuir al desarrollo de una industria más sustentable al recuperar parte de la energía desperdiciada y reducir el consumo de combustibles fósiles. Estos sistemas emplean materiales semiconductores capaces de transformar el flujo de calor en corriente eléctrica sin requerir partes móviles ni etapas intermedias, lo que disminuye los requerimientos de mantenimiento y mejora la confiabilidad operativa. En los últimos años, los avances en ciencia de materiales, nanotecnología y modelado computacional han permitido mejorar significativamente el desempeño de los materiales termoeléctricos. Sin embargo, aún existen importantes limitaciones relacionadas con la baja eficiencia de conversión energética, el alto costo de materiales como el telurio, la estabilidad térmica a largo plazo y la disponibilidad limitada de algunos elementos críticos utilizados en la fabricación de estos dispositivos. En este contexto, el presente artículo analiza el potencial de los materiales termoeléctricos para la recuperación de calor residual, abordando sus fundamentos físicos, los materiales más relevantes, sus aplicaciones actuales y los principales desafíos tecnológicos para su implementación a gran escala.

Palabras clave: materiales termoeléctricos, calor residual, eficiencia energética, efecto Seebeck

Introducción

El crecimiento económico global y el aumento de la población han generado una demanda energética sin precedentes en las últimas décadas. La energía es un componente fundamental para el funcionamiento de las sociedades modernas, ya que sustenta actividades industriales, sistemas de transporte, infraestructura urbana y producción de bienes. A pesar de los avances en energías renovables, los combustibles fósiles continúan representando una proporción significativa del suministro energético mundial, contribuyendo a la emisión de gases de efecto invernadero y al calentamiento global (International Energy Agency [IEA], 2023).

Frente a este panorama, mejorar la eficiencia energética se ha convertido en una estrategia clave dentro de las políticas de transición energética. La Agencia Internacional de Energía ha señalado que una parte importante de las reducciones necesarias en emisiones de carbono podría lograrse mediante mejoras en eficiencia energética y el aprovechamiento de recursos energéticos actualmente desaprovechados (IEA, 2024a). Uno de los ejemplos más claros de esta ineficiencia es la pérdida de energía en forma de calor residual durante procesos industriales. Diversos estudios han estimado que una fracción considerable de la energía utilizada en la industria, en algunos casos superior al 50 %, se libera al ambiente como calor sin ser aprovechada (Forman *et al.*, 2016). Este fenómeno ocurre en sistemas como hornos industriales, motores de combustión interna, turbinas de generación eléctrica y procesos químicos que operan a altas temperaturas.

El aprovechamiento del calor residual ha adquirido relevancia dentro de la investigación energética, dado que su recuperación podría contribuir significativamente a optimizar el aprovechamiento energético de los sistemas

industriales. Entre las tecnologías emergentes que permiten transformar energía térmica en energía eléctrica destacan los generadores termoeléctricos (TEG), dispositivos basados en fenómenos físicos que describen la interacción entre el transporte de calor y de carga eléctrica en materiales sólidos (Vaqueiro, 2024).

En sectores industriales como el cementero, metalúrgico, automotriz, químico y de generación eléctrica, los TEG representan una alternativa atractiva para una industria sustentable debido a que pueden instalarse directamente sobre superficies calientes, ductos industriales o sistemas de escape para convertir energía térmica desperdiciada en electricidad útil (Bhakta & Kundu, 2024; Forman *et al.*, 2016). Por ejemplo, en las industrias siderúrgica y cementera, estos dispositivos pueden aprovechar las altas temperaturas provenientes de hornos y gases de combustión. En el sector automotriz, pueden integrarse en los sistemas de escape para disminuir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia energética de los vehículos (Bhakta & Kundu, 2024; Quan *et al.*, 2024).

Desarrollo

El calor residual como recurso energético

El calor residual es una consecuencia inevitable de las leyes de la termodinámica. Durante cualquier proceso de conversión de energía, una parte de la energía disponible no puede transformarse en trabajo útil y se disipa en forma de calor hacia el entorno. Este fenómeno ocurre en prácticamente todos los sistemas energéticos, desde motores y turbinas hasta procesos químicos industriales (Goldsmid, 2016).

En el contexto industrial, el calor residual puede clasificarse de acuerdo con su nivel de temperatura. Por ejemplo, los procesos metalúrgicos pueden generar calor residual a temperaturas superiores a 500 °C, mientras que otros procesos, como el secado industrial o los sistemas de refrigeración, generan calor a temperaturas moderadas o bajas (Iavnic *et al.*, 2023). Aunque el calor de alta temperatura puede recuperarse mediante tecnologías tradicionales, el calor de baja temperatura suele ser más difícil de aprovechar debido a limitaciones tecnológicas.

La recuperación de calor residual ha sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas debido a su potencial para mejorar la eficiencia energética de los sistemas industriales. Como se muestra en la Figura 1, una fracción significativa de la energía utilizada en los procesos industriales se pierde en forma de calor residual, el cual puede ser recuperado mediante tecnologías de conversión energética.

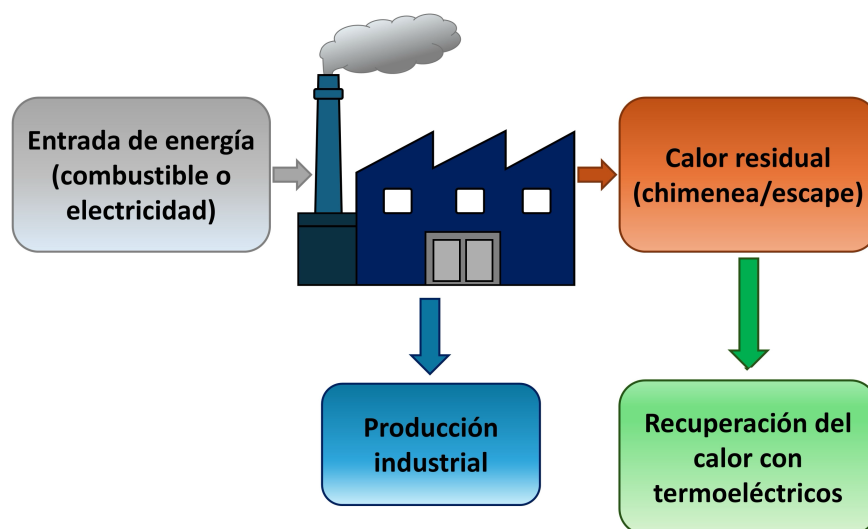


Figura 1. Diagrama conceptual del flujo de energía en procesos industriales, generación de calor residual y recuperación del calor con materiales termoeléctricos.

En muchos casos, esta energía térmica residual puede aprovecharse para generar electricidad, precalentar procesos o alimentar sistemas energéticos auxiliares (Bhakta & Kundu, 2024). Sin embargo, cuando el calor disponible se encuentra distribuido en múltiples puntos o presenta gradientes térmicos relativamente pequeños, los métodos

convencionales de recuperación energética pueden resultar poco eficientes o económicamente inviables. En este contexto, la tecnología termoeléctrica ofrece ventajas importantes, ya que permite convertir directamente gradientes térmicos en electricidad mediante dispositivos compactos y de estado sólido. Un gradiente de temperatura es la diferencia térmica entre dos regiones de un sistema; cuanto mayor es esta diferencia, mayor puede ser el flujo de calor y, en consecuencia, la generación de energía eléctrica obtenida mediante un TEG. Esta capacidad hace que estos dispositivos sean especialmente atractivos para aplicaciones donde otras tecnologías de recuperación de energía resultan poco prácticas (He & Tritt, 2017).

Fundamentos de la generación termoeléctrica

La generación termoeléctrica se basa en fenómenos físicos que describen la interacción entre transporte térmico y eléctrico en materiales conductores o semiconductores. Uno de los fenómenos más relevantes es el efecto Seebeck, descubierto en el siglo XIX. Este efecto consiste en la generación de un voltaje eléctrico cuando existe una diferencia de temperatura entre los extremos de un material conductor o semiconductor, como se muestra en la Figura 2. Este fenómeno ocurre porque los portadores de carga, electrones (e^-) y huecos (h^+), se desplazan desde la región caliente hacia la región fría, provocando una acumulación de carga eléctrica entre ambos extremos del material. Como resultado, se genera una diferencia de potencial que puede aprovecharse para producir corriente eléctrica en un circuito externo (Snyder & Toberer, 2008). Por lo tanto, el efecto Seebeck permite transformar energía térmica en energía eléctrica; por ello, puede emplearse para generar electricidad a partir de fuentes de calor residual, como las producidas en procesos industriales, motores o sistemas electrónicos.

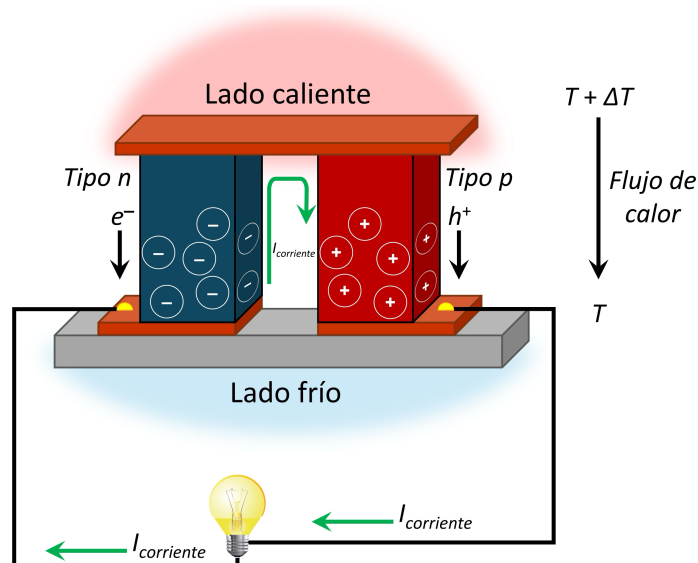


Figura 2. Esquema del funcionamiento de un módulo termoeléctrico basado en el efecto Seebeck.

Los dispositivos termoeléctricos empleados para la generación de electricidad suelen estar compuestos por pares de materiales semiconductores tipo p y tipo n , conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Cuando uno de sus extremos se expone a una fuente de calor y el otro se mantiene a menor temperatura, se establece un flujo de calor que produce una diferencia de potencial eléctrico. El desempeño de estos materiales se evalúa mediante la figura de mérito termoeléctrico, denominada zT , la cual se expresa en la Ecuación 1 (Sootsman *et al.*, 2009).

$$zT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T \quad (1)$$

Este parámetro relaciona el coeficiente Seebeck (S), la conductividad eléctrica (σ), la conductividad térmica (κ) y la temperatura (T) para estimar la eficiencia de conversión termoeléctrica. Un valor elevado de zT indica una mayor capacidad para transformar el calor en electricidad. Para maximizar este parámetro, se requiere una alta conductividad eléctrica que favorezca el transporte de electrones y una baja conductividad térmica que minimice las pérdidas de calor a través del material (Sootsman *et al.*, 2009).

Materiales termoeléctricos

El desarrollo de materiales termoeléctricos eficientes constituye uno de los aspectos más importantes para mejorar el desempeño de los TEG. Para lograr una alta eficiencia, los materiales deben combinar tres propiedades fundamentales: alta conductividad eléctrica, baja conductividad térmica y un elevado coeficiente Seebeck (Poudel *et al.*, 2008). Entre los materiales termoeléctricos más estudiados se encuentran los compuestos basados en telururos de bismuto,

telururos de plomo, skutteruditas y aleaciones tipo Half-Heusler. Estos materiales han demostrado propiedades termoeléctricas prometedoras en diferentes rangos de temperatura, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones energéticas (Wang *et al.*, 2024). La Tabla 1 muestra una comparación de algunos de los materiales termoeléctricos más representativos utilizados actualmente en investigación y aplicaciones tecnológicas.

Tabla 1. Comparación de materiales termoeléctricos representativos.

Material termoeléctrico	Fórmula química	Rango de temperatura de operación (K)	zT máximo reportado (aprox.)	Ventajas principales	Limitaciones	Referencias
Telururo de bismuto	Bi ₂ Te ₃	300–500	1.0–1.5	Alta eficiencia cerca de temperatura ambiente; ampliamente utilizado en módulos comerciales	Contiene telurio (elemento escaso); rendimiento disminuye a altas temperaturas	(Aminorroaya <i>et al.</i> , 2023; Gayner <i>et al.</i> , 2023)
Telururo de plomo	PbTe	600–900	1.4–1.7	Excelente desempeño a temperaturas medias; buena estabilidad térmica	Toxicidad del plomo; costo de algunos dopantes	(Jood <i>et al.</i> , 2018; Pei <i>et al.</i> , 2011)
Skutteruditas	CoSb ₃ y dopados	600–900	1.0–1.9	Alta movilidad electrónica; buen desempeño a temperaturas medias	Complejidad en la síntesis; optimización estructural necesaria	(Ji <i>et al.</i> , 2026; Liu <i>et al.</i> , 2020; Rogl <i>et al.</i> , 2014)
Aleaciones Half-Heusler	HfNiSn, TiNiSn	700–1000	1.0–1.5	Alta estabilidad térmica y mecánica; adecuadas para aplicaciones industriales	Conductividad térmica relativamente alta	(Ojha <i>et al.</i> , 2024; Snyder & Toberer, 2008)
Silicio-Germanio	SiGe	300–1200	0.5–1.3	Gran estabilidad a temperaturas elevadas; utilizados en aplicaciones espaciales	Eficiencia moderada comparada con otros materiales	(Nandihalli <i>et al.</i> , 2022; Yi & Yu, 2015)
Materiales nanoestructurados	Diversas composiciones	300–900	0.4–2.3	Reducción de conductividad térmica mediante dispersión de fonones	Procesos de fabricación complejos	(Boro <i>et al.</i> , 2026; Bos <i>et al.</i> , 2026)
Polímeros termoeléctricos	PEDOT:PSS y derivados	300–450	0.3–0.8	Flexibilidad mecánica; bajo costo; potencial para electrónica flexible	Baja eficiencia comparada con materiales inorgánicos	(See <i>et al.</i> , 2010; Wang <i>et al.</i> , 2020)

Además, en los últimos años, los avances en nanotecnología han permitido mejorar significativamente el desempeño termoeléctrico mediante la introducción de estructuras nanométricas que reducen la conductividad térmica sin afectar significativamente la conductividad eléctrica. Estas estrategias permiten incrementar el valor de *zT* y, con ello, mejorar la eficiencia de conversión energética (Singh *et al.*, 2024). Al mismo tiempo, el uso de técnicas de aprendizaje automático y modelado computacional ha comenzado a desempeñar un papel importante en el descubrimiento de

nuevos materiales termoeléctricos. Estas herramientas permiten analizar grandes bases de datos de materiales y predecir propiedades termoeléctricas potenciales, acelerando el desarrollo de compuestos con mejores características de desempeño (Barua *et al.*, 2025).

Aplicaciones actuales y potenciales

Los TEG ya se utilizan en diversas aplicaciones donde se requiere una generación de energía confiable y con bajo mantenimiento. Uno de los ejemplos más conocidos es su uso en exploración espacial, donde los TEG de radioisótopos han proporcionado energía eléctrica a sondas espaciales durante décadas (Kyrimis *et al.*, 2025). En el ámbito industrial, estos dispositivos pueden instalarse en superficies calientes, sistemas de escape o equipos térmicos para recuperar parte de la energía térmica desperdiciada durante los procesos productivos, así como integrarse en dispositivos electrónicos y redes de sensores autónomos (Jiang *et al.*, 2024; Xiao *et al.*, 2023). Como se ilustra en la Figura 3, estas tecnologías permiten aprovechar el calor residual en diferentes contextos, desde procesos industriales hasta dispositivos electrónicos e infraestructura de sensores para el Internet de las Cosas (IoT).

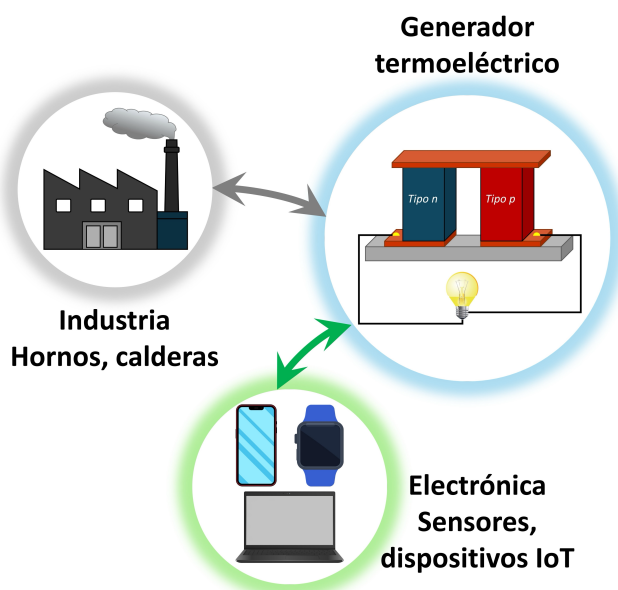


Figura 3. Ejemplos de aplicaciones de recuperación de calor residual mediante generadores termoeléctricos.

En el sector del transporte, varios estudios han investigado la posibilidad de integrar módulos termoeléctricos en los sistemas de escape de vehículos para aprovechar el calor generado por los motores de combustión interna. Este enfoque podría contribuir a mejorar la eficiencia energética de los vehículos y reducir el consumo de combustible (Quan *et al.*, 2024). También existen aplicaciones emergentes en dispositivos electrónicos autónomos, sensores industriales y sistemas de generación distribuida de energía, donde pequeños TEG pueden suministrar energía eléctrica a partir de gradientes térmicos presentes en el entorno.

También existen diversas tecnologías para recuperar calor residual, cada una con diferentes rangos de operación y niveles de eficiencia. Aunque los TEG no son la única alternativa para recuperar calor residual, representan una de las tecnologías más versátiles cuando se dispone de fuentes de calor dispersas, gradientes térmicos moderados o espacios reducidos, ya que pueden operar sin partes móviles y con requerimientos mínimos de mantenimiento. La Tabla 2 presenta una comparación general de algunas de las tecnologías más utilizadas para la recuperación de calor residual.

Por ejemplo, los ciclos Rankine orgánicos son ampliamente utilizados en plantas industriales para recuperar calor de media temperatura mediante turbinas y fluidos orgánicos; los motores Stirling permiten alcanzar altas eficiencias térmicas en sistemas de combustión externa; mientras que los generadores termo-fotovoltaicos convierten radiación térmica en electricidad utilizando celdas fotovoltaicas especializadas (Eyidogan *et al.*, 2016; Schneider *et al.*, 2020; Usman *et al.*, 2022). Estas tecnologías pueden ser más eficientes que los TEG en ciertas aplicaciones, aunque suelen requerir sistemas mecánicos más complejos y mayores costos de mantenimiento.

Tabla 2. Comparación de tecnologías de recuperación de calor residual

Tecnología	Principio de funcionamiento	Rango de temperatura (K)	Eficiencia (%)	Ventajas	Limitaciones	Referencias
Generadores termoeléctricos	Conversión directa de gradientes térmicos en electricidad mediante el efecto Seebeck	300–900	5–10	No tienen partes móviles; bajo mantenimiento; funcionamiento silencioso; diseño compacto	Eficiencia moderada; costo de algunos materiales	(Goldsmid, 2016; Rowe, 2018)
Ciclo Rankine orgánico	Conversión de calor en energía mecánica mediante expansión de un fluido orgánico en una turbina	350–650	10–20	Tecnología madura; adecuada para calor de media temperatura	Requiere equipos voluminosos; mantenimiento mecánico	(Eyidogan <i>et al.</i> , 2016; Forman <i>et al.</i> , 2016; Hung <i>et al.</i> , 1997)
Ciclo Kalina	Uso de una mezcla amoníaco-agua como fluido de trabajo para mejorar la eficiencia termodinámica	400–700	15–25	Alta eficiencia en algunos rangos de temperatura	Sistema complejo; alto costo de implementación	(Panchal & Shah, 2022; Shen <i>et al.</i> , 2025)
Ciclo Brayton	Conversión térmica basada en turbinas de gas	>700	30–50	Alta eficiencia en aplicaciones industriales de gran escala	Requiere altas temperaturas; sistemas complejos	(Besarati & Goswami, 2017; Choi <i>et al.</i> , 2023)
Motores Stirling	Motor térmico de combustión externa basado en ciclos de expansión y compresión de gas	500–1000	20–30	Alta eficiencia teórica; operación silenciosa	Costos elevados; sistemas mecánicos complejos	(Dai <i>et al.</i> , 2021; Schneider <i>et al.</i> , 2020)
Generadores termo-fotovoltaicos	Conversión de radiación térmica en electricidad mediante celdas fotovoltaicas	>800	15–30	Alta densidad energética en condiciones óptimas	Materiales costosos; requiere temperaturas muy altas	(Usman <i>et al.</i> , 2022)

Contribución a la sostenibilidad energética

El aprovechamiento del calor residual mediante la tecnología termoeléctrica puede favorecer significativamente la optimización de la eficiencia energética de los sistemas industriales. Al recuperar parte de la energía que normalmente se perdería durante los procesos productivos, se puede reducir el consumo de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la generación de energía (IEA, 2024b).

Además, esta tecnología se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular, ya que permite transformar pérdidas energéticas en recursos útiles. En lugar de liberar el calor residual al ambiente, los sistemas termoeléctricos permiten transformarlo en energía eléctrica aprovechable que puede utilizarse dentro del mismo proceso industrial o integrarse a sistemas energéticos distribuidos.

Retos tecnológicos

A pesar de sus ventajas, la tecnología termoeléctrica aún enfrenta diversos desafíos que limitan su implementación a gran escala. Entre los principales retos se encuentran la baja eficiencia de algunos materiales termoeléctricos, el alto costo de elementos como el telurio y el germanio, la disponibilidad limitada de materias primas críticas y las dificultades para integrar estos dispositivos en procesos industriales reales (Zebarjadi *et al.*, 2012).

Otro desafío importante es la estabilidad térmica de los materiales durante su operación prolongada a altas temperaturas. Algunos compuestos pueden degradarse o perder eficiencia debido a fenómenos como oxidación, difusión atómica o fatiga térmica, lo que reduce la vida útil de los dispositivos (Bos *et al.*, 2026). Asimismo, la implementación industrial de los TEG exige optimizar factores como el contacto térmico, la disipación de calor y la compatibilidad con las condiciones específicas de operación de cada proceso.

Actualmente, la investigación se orienta al desarrollo de materiales más abundantes, sustentables y económicamente viables, así como al diseño de dispositivos con mayor eficiencia y una gestión térmica optimizada.

Conclusiones

La recuperación de calor residual representa una estrategia prometedora para optimizar el aprovechamiento energético de los sistemas industriales y reducir su impacto ambiental. En este marco, la tecnología termoeléctrica ofrece una alternativa atractiva para transformar directamente gradientes térmicos en energía eléctrica mediante dispositivos compactos y confiables.

Los avances recientes en ciencia de materiales, nanotecnología y modelado computacional están impulsando mejoras significativas en el desempeño de los materiales termoeléctricos. A medida que continúe el desarrollo de nuevos materiales y diseños de dispositivos más eficientes, los TEG podrían desempeñar un papel clave en la transición hacia sistemas energéticos más eficientes y sustentables.

Bibliografía

- Aminorroaya, S., Santos, R., Fortulan, R., Gazder, A. A., Malhotra, A., Vashae, D., Serhienko, I., & Mori, T. (2023). Room-temperature thermoelectric performance of n-type multiphase pseudobinary $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{S}_3$ compounds: Synergic effects of phonon scattering and energy filtering. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(15), 19220–19229. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c01956>
- Barua, N. K., Lee, S., Oliynyk, A. O., & Kleinke, H. (2025). Thermoelectric material performance (zT) predictions with machine learning. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(1), 1662–1673. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c19149>
- Besarati, S. M., & Goswami, D. Y. (2017). Supercritical CO_2 and other advanced power cycles for concentrating solar thermal (CST) systems. In *Advances in concentrating solar thermal research and technology* (pp. 157–178). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100516-3.00008-3>
- Bhakta, S., & Kundu, B. (2024). A review of thermoelectric generators in automobile waste heat recovery systems for improving energy utilization. *Energies*, 17(5), 1016. <https://doi.org/10.3390/en17051016>
- Boro, P. R., Deka, R., Sarmah, P., Borthakur, P. P., & Medhi, N. (2026). Nanostructured semiconductors for enhanced waste heat-to-electricity conversion. *The 5th International Online Conference on Nanomaterials*, 21. <https://doi.org/10.3390/materproc2025025021>
- Bos, J.-W. G., Mohanty, T., Sparks, T. D., Xie, W., Weidenkaff, A., Grasso, S., Zhang, R., Reece, M. J., Wang, T., Son, J. S., Akbar, S., Nandhakumar, I., Tuley, R., Koz, C., He, R., Ying, P., Bahrami, A., Pacheco, V., Nielsch, K., ... Funahashi, R. (2026). 2026 roadmap toward sustainable thermoelectrics. *Journal of Physics: Energy*, 8(1), 011502. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ae2d98>
- Choi, S., Son, I., & Lee, J. (2023). Comparative performance evaluation of gas Brayton cycle for micro-nuclear reactors. *Energies*, 16(4), 2065. <https://doi.org/10.3390/en16042065>
- Dai, Z., Wang, C., Zhang, D., Tian, W., Qiu, S., & Su, G. H. (2021). Design and analysis of a free-piston Stirling engine for space nuclear power reactor. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 637–646. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.011>
- Eyidogan, M., Canka Kilic, F., Kaya, D., Coban, V., & Cagman, S. (2016). Investigation of organic Rankine cycle (ORC) technologies in Turkey from the technical and economic point of view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 885–895. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.158>
- Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- Gayner, C., Menezes, L. T., Natanzon, Y., Kauffmann, Y., Kleinke, H., & Amouyal, Y. (2023). Development of nanostructured Bi_2Te_3 with high thermoelectric performance by scalable synthesis and microstructure manipulations. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(10), 13012–13024. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c21561>
- Goldsmid, H. J. (2016). *Introduction to thermoelectricity* (Vol. 121). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
- He, J., & Tritt, T. M. (2017). Advances in thermoelectric materials research: Looking back and moving forward. *Science*, 357(6358). <https://doi.org/10.1126/science.aak9997>

- Hung, T. C., Shai, T. Y., & Wang, S. K. (1997). A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, 22(7), 661–667. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(96\)00165-X](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(96)00165-X)
- Iavnic, T., Puiu, D., & Popescu, A. (2023). Energy recovery from ice waste heat using thermoelectric generators. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi. Machine Constructions Section*, 69(4), 21–35. <https://doi.org/10.2478/bipcm-2023-0032>
- International Energy Agency. (2023). *World energy outlook 2023*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- International Energy Agency. (2024a). *Energy efficiency 2024*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>
- International Energy Agency. (2024b). *Energy technology perspectives 2024*. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2024>
- Ji, D., Haile, N. F., Li, X., Li, B., Rezek, M., Cantwell, W., & Zheng, L. (2026). Band degeneracy and convergence in high performing thermoelectric materials. *Applied Energy*, 404, 127182. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127182>
- Jiang, Y., Wang, Y., Yan, J., Shen, L., & Qin, J. (2024). Research on the performance of thermoelectric self-powered systems for wireless sensor based on industrial waste heat. *Sensors*, 24(18), 5983. <https://doi.org/10.3390/s24185983>
- Jood, P., Ohta, M., Yamamoto, A., & Kanatzidis, M. G. (2018). Excessively doped PbTe with Ge-induced nanostructures enables high-efficiency thermoelectric modules. *Joule*, 2(7), 1339–1355. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.04.025>
- Kyrimis, S., Lallemand, E., Stiewe, C., Ziolkowski, P., Cowley, A., Müller, E., & de Boor, J. (2025). Performance improvement of radioisotope thermoelectric generators (RTGs) by design optimization. *Energy Conversion and Management: X*, 28, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101395>
- Liu, Z.-Y., Zhu, J.-L., Tong, X., Niu, S., & Zhao, W.-Y. (2020). A review of CoSb₃-based skutterudite thermoelectric materials. *Journal of Advanced Ceramics*, 9(6), 647–673. <https://doi.org/10.1007/s40145-020-0407-4>
- Nandihalli, N., Gregory, D. H., & Mori, T. (2022). Energy-saving pathways for thermoelectric nanomaterial synthesis: Hydrothermal/solvothermal, microwave-assisted, solution-based, and powder processing. *Advanced Science*, 9(25). <https://doi.org/10.1002/adv.202106052>
- Ojha, A., Sabat, R. K., & Bathula, S. (2024). Advancement in half-Heusler thermoelectric materials and strategies to enhance the thermoelectric performance. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 171, 107996. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107996>
- Panchal, J., & Shah, M. (2022). A Kalina cycle for low and medium enthalpy abandoned oil and gas reservoirs incorporated with solar technology for power production. In *Utilization of thermal potential of abandoned wells* (pp. 297–314). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90616-6.00015-4>
- Pei, Y., LaLonde, A., Iwanaga, S., & Snyder, G. J. (2011). High thermoelectric figure of merit in heavy hole dominated PbTe. *Energy & Environmental Science*, 4(6), 2085. <https://doi.org/10.1039/c0ee00456a>
- Poudel, B., Hao, Q., Ma, Y., Lan, Y., Minnich, A., Yu, B., Yan, X., Wang, D., Muto, A., Vashae, D., Chen, X., Liu, J., Dresselhaus, M. S., Chen, G., & Ren, Z. (2008). High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys. *Science*, 320(5876), 634–638. <https://doi.org/10.1126/science.1156446>
- Quan, R., Liu, D., Li, X., Chang, Y., & Wan, H. (2024). Performance evaluation and energy management of an automobile exhaust thermoelectric generator for ISG mild HEV application. *Applied Thermal Engineering*, 243, 122556. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122556>
- Rogl, G., Grytsiv, A., Rogl, P., Peranio, N., Bauer, E., Zehetbauer, M., & Eibl, O. (2014). n-type skutterudites (R,Ba,Yb)₃Co₄Sb₁₂ (R = Sr, La, Mm, DD, SrMm, SrDD) approaching ZT ≈ 2.0. *Acta Materialia*, 63, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.09.039>
- Rowe, D. M. (2018). *Thermoelectrics handbook*. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420038903>
- Schneider, T., Müller, D., & Karl, J. (2020). A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110288>
- See, K. C., Feser, J. P., Chen, C. E., Majumdar, A., Urban, J. J., & Segalman, R. A. (2010). Water-processable polymer-nanocrystal hybrids for thermoelectrics. *Nano Letters*, 10(11), 4664–4667. <https://doi.org/10.1021/nl102880k>
- Shen, S., Alamri, S., Ahmad, S. F., Thaljaoui, A., Ooi, J. B., Khan, M. S., Ghachem, K., & Kolsi, L. (2025). Modeling of new tri-generation system based on triple organic Rankine cycle, Kalina cycle and absorption chiller with heat recovery parameter. *Case Studies in Thermal Engineering*, 76, 107401. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107401>
- Singh, R., Dogra, S., Dixit, S., Vatin, N. I., Bhardwaj, R., Sundramoorthy, A. K., Perera, H. C. S., Patole, S. P., Mishra, R. K., & Arya, S. (2024). Advancements in thermoelectric materials for efficient waste heat recovery and renewable energy generation. *Hybrid Advances*, 5, 100176. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100176>
- Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2008). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105–114. <https://doi.org/10.1038/nmat2090>
- Sootsman, J. R., Chung, D. Y., & Kanatzidis, M. G. (2009). New and old concepts in thermoelectric materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(46), 8616–8639. <https://doi.org/10.1002/anie.200900598>
- Usman, M., Kazim, A. H., Shabbir, A., Abbasi, M. S., & Sarwar, J. (2022). Efficiency enhancement of thermophotovoltaic cells with different design configurations using existing photon recycling technologies. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.917419>
- Vaqueiro, P. (2024). Advanced thermoelectric materials and devices. *ACS Applied Electronic Materials*, 6(5), 2797–2798. <https://doi.org/10.1021/acsaem.4c00811>
- Wang, D., Ding, J., Ma, Y., Xu, C., Li, Z., Zhang, X., Zhao, Y., Zhao, Y., Di, Y., Liu, L., Dai, X., Zou, Y., Kim, B., Zhang, F., Liu, Z., McCulloch, I., Lee, M., Chang, C., Yang, X., ... Zhu, D. (2024). Multi-heterojunctioned plastics with high thermoelectric figure of merit. *Nature*, 632(8025), 528–535. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07724-2>
- Wang, X., Suwardi, A., Lim, S. L., Wei, F., & Xu, J. (2020). Transparent flexible thin-film p-n junction thermoelectric module. *npj Flexible Electronics*, 4(1), 19. <https://doi.org/10.1038/s41528-020-00082-9>
- Xiao, D., Sun, P., Wu, J., Zhang, Y., Wu, J., Liu, G., Hu, H., Hu, J., Tan, X., He, S., & Jiang, J. (2023). Thermoelectric generator design and characterization for industrial pipe waste heat recovery. *Processes*, 11(6), 1714. <https://doi.org/10.3390/pr11061714>
- Yi, S., & Yu, C. (2015). Modeling of thermoelectric properties of SiGe alloy nanowires and estimation of the best design parameters for high figure-of-merits. *Journal of Applied Physics*, 117(3). <https://doi.org/10.1063/1.4906226>
- Zebarjadi, M., Esfarjani, K., Dresselhaus, M. S., Ren, Z. F., & Chen, G. (2012). Perspectives on thermoelectrics: From fundamentals to device applications. *Energy & Environmental Science*, 5(1), 5147–5162. <https://doi.org/10.1039/C1EE02497C>