

Materiales termoeléctricos: clave para la cogeneración energética

Las máquinas y los dispositivos que empleamos actualmente en diversas actividades cotidianas consumen grandes cantidades de energía. No obstante, estos aparatos no aprovechan toda la energía que se les suministra, ya que parte de ella se pierde en forma de calor. Una solución a este problema es el uso de materiales termoeléctricos, que convierten el calor en energía eléctrica de una manera limpia.

Introducción

Desde el descubrimiento del fuego comenzó una nueva era para la humanidad. La leña se convirtió en el primer combustible empleado para obtener la tan anhelada forma de energía. Esta fuente de energía permitió a las personas calentar, cocinar, iluminar y transformar. Gracias a la leña, así como al calor y la luz generados por su combustión, la calidad de vida humana mejoró. No obstante, con el crecimiento poblacional se requirieron otras fuentes de energía que fueran de fácil acceso y, sobre todo, que estuvieran disponibles en cualquier momento. De esta manera, se descubrieron nuevas fuentes de energía: algunas no renovables, como los combustibles fósiles, y otras renovables, como la energía solar, entre otras.



En especial, los combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, se convirtieron en las principales fuentes de energía; el empleo de estos combustibles trajo consigo revoluciones en la industria y la tecnología. Sin embargo, su uso excesivo ha creado problemas de escasez, debido a su naturaleza no renovable, y sobre todo problemas ambientales, como son la mala calidad del aire y el efecto invernadero. Todo esto ha impulsado el desarrollo y la aplicación de nuevas fuentes de energía, que en un pasado ya habían sido consideradas, pero que por razones económicas o de accesibilidad se habían dejado en el olvido. Así, hoy día ya es común ver aplicaciones de energías limpias y renovables; no obstante, existe un problema que no ha sido resuelto, y es que, sin importar el tipo de fuente de energía empleada, los artefactos que utilizamos en la actualidad no son totalmente eficientes.

Todas las máquinas y los dispositivos tienen pérdidas, y una buena parte de la energía que se les suministra se desperdicia (aproximadamente 60% o más); en gran medida, se pierde en forma de calor que se disipa al ambiente, por lo que es conocido como calor residual. Imaginemos un automóvil en el que por cada litro de combustible tan sólo 250 ml sirven para mover el vehículo, mientras que 400 ml se desperdician en forma de calor en el motor, y el resto (350 ml) se pierde por efecto de la fricción y el aire acondicionado. Adicionalmente, hay un sinnúmero de sistemas con el mismo problema; incluso cuando hacemos ejercicio, la temperatura corporal aumenta y se desprende energía en forma de calor, el cual no es empleado para otro fin. No obstante, no todo está perdido, pues hoy existen dispositivos que permiten

recuperar parte de ese calor residual y convertirlo en energía eléctrica, a partir del uso de los materiales termoeléctricos.

Los materiales termoeléctricos son tema de interés en el presente artículo porque representan una alternativa para reutilizar el calor residual. Entre sus características principales se encuentran: un tamaño razonablemente pequeño, la facilidad de instalación y empleo, así como un tiempo de vida amplio. Asimismo, éstos por lo general se producen con materiales amigables con el ambiente y que, además, no son tóxicos para las personas. Tan sólo imaginemos todos los beneficios que pueden aportar estos materiales; incluso algunos de ellos han sido utilizados en el espacio, y gracias a otros, más económicos, podríamos cargar la batería de nuestro teléfono celular con el calor de una taza de café, o bien con el calor que desprendemos al movernos o, mejor aún, al ejercitarnos. En la siguiente sección, definiremos qué es un material termoeléctrico y, más adelante, abordaremos sus ventajas, desventajas, aplicaciones y perspectivas a futuro.

¿Qué es un material termoeléctrico?

Como ya mencionamos, un material termoeléctrico es aquel que tiene la capacidad de convertir el calor en energía eléctrica, y su funcionamiento se debe al efecto del mismo nombre. Imaginemos un alambre de metal que contiene electrones, los cuales pueden moverse libremente y de manera aleatoria; mientras no se caliente o se haga pasar una corriente por el alambre, los electrones no tendrán una dirección definida. Ahora pensemos que se calienta el



alambre por uno de sus extremos; entonces, los electrones comenzarán a moverse del lado caliente hacia el extremo frío, derivado de que los electrones del lado caliente poseen una mayor energía. Esta vez imaginemos que se une otro alambre de un diferente metal al extremo caliente; lo que ocurrirá es un movimiento de electrones derivado de los diferentes coeficientes Seebeck de los materiales. El coeficiente Seebeck es un indicador que sirve para caracterizar a los materiales termoeléctricos y que permite cuantificar la corriente eléctrica que se produce entre los extremos de un material cuando están a diferentes temperaturas (Cornaglia, 2018). Derivado de esto, un metal se comportará como positivo y el otro como negativo, y se creará una corriente de electrones; dicho de otra manera, se producirá una corriente eléctrica. Este fenómeno, descubierto por Thomas J. Seebeck, consiste en generar un voltaje cuando hay una diferencia de temperatura a cada lado de dos metales unidos por el extremo caliente.

El efecto termoeléctrico se describe por medio de tres efectos en conjunto: el efecto Seebeck (que ya describimos), el efecto Peltier y el efecto Thomson. De manera resumida, el efecto Peltier consiste en el efecto inverso del efecto Seebeck; en este caso, se puede suministrar una corriente eléctrica a uno de los extremos de los materiales y liberar calor en uno de los extremos mientras que se enfría el otro extremo. Por otra parte, el efecto Thomson relaciona a los efectos Seebeck y Peltier, y consiste en que un conductor por el que circula una corriente libera calor, que es proporcional a la corriente. Ahora bien, el sentido del flujo de los electrones —es decir, la corriente— se puede modificar; esto se logra mediante el cambio de polaridad de la corriente, lo cual altera la dirección del flujo y permite absorber calor en vez de liberarlo. Este fenómeno es de mucha utilidad para enfriar. Así, se absorbe calor si la corriente eléctrica y el calor fluyen en direcciones opuestas, y se libera calor si fluyen en la misma dirección (Medrano, 2002).

Estos efectos se producen también en los materiales semiconductores (elementos o compuestos que se comportan como conductores o como aislantes dependiendo de factores como el campo eléctrico y el campo magnético). Los materiales semiconductores

tipo n tendrán como portadores mayoritarios a electrones y los materiales tipo p se caracterizarán por la ausencia de electrones, también llamados huecos, por lo que se producirá una corriente de electrones (electricidad) del semiconductor con mayor número de electrones hacia el que tiene deficiencia de éstos (huecos). De esta manera se puede generar electricidad, en el caso del efecto Seebeck, y se puede enfriar mediante el efecto Peltier, como se observa en la Figura 1.

La aplicación de los tres efectos permite generar electricidad, calentar y enfriar, aunque no al mismo tiempo. No obstante, no cualquier metal o semiconductor puede ser un material termoeléctrico, ya que debe cumplir con dos características: ser un buen conductor de electricidad y un mal conductor de calor. Estas características se integran en un factor llamado ZT , el cual representa la eficiencia y es conocido como figura de mérito. La figura de mérito divide la conductividad eléctrica de un material entre su conductividad térmica, y multiplica el cociente por su temperatura de operación y por su coeficiente de Seebeck al cuadrado. Entonces, entre mayor sea la conductividad eléctrica y menor sea la conductividad térmica de un material, mayor será el valor de ZT y, por lo tanto, tendremos un mejor material termoeléctrico.

Algunos de los compuestos que se emplean actualmente para producir materiales termoeléctricos incluyen aleaciones de bismuto y antimonio, bismuto y telurio, así como antimonio y telurio para temperaturas bajas (hasta 823 °C). Por otra parte, las aleaciones con estaño se emplean para temperaturas intermedias (973 °C), mientras que las aleaciones de silicio y germanio se usan en temperaturas altas (1 273 °C).

Para poder emplear los materiales termoeléctricos se requiere que se estructuren en módulos. En la Figura 2 se muestra un módulo termoeléctrico, que se construye con los materiales termoeléctricos como las aleaciones anteriormente mencionadas. El módulo consiste en un soporte —que puede ser de vidrio, cerámica o un polímero— sobre el cual se colocan los materiales termoeléctricos, positivos y negativos, y se unen con contactos metálicos. Por último, se instala otro soporte para proteger a los ma-

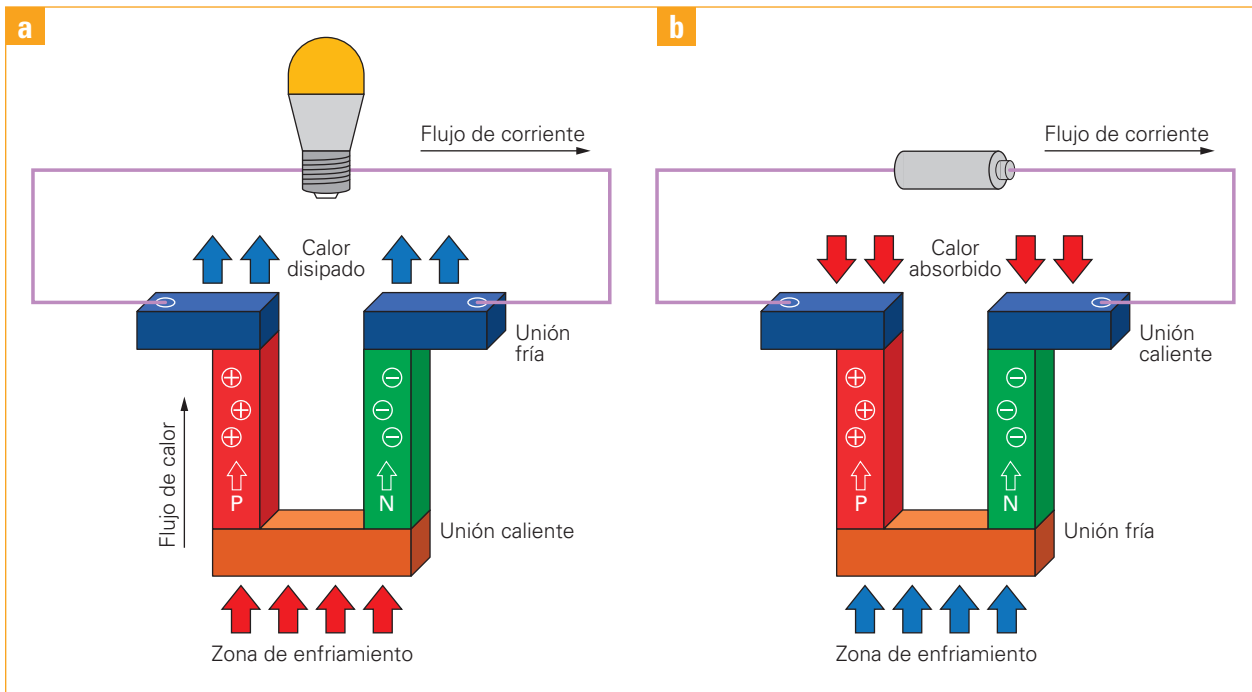


Figura 1. Esquema del a) efecto Seebeck; y b) efecto Peltier, en materiales semiconductores.

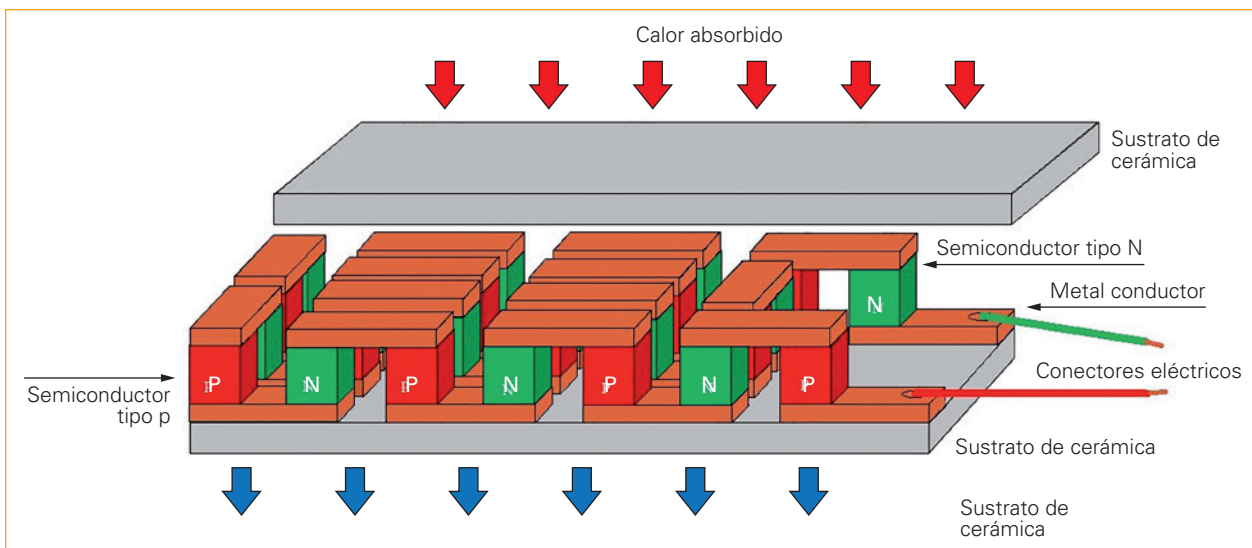


Figura 2. Módulo termoeléctrico sobre un sustrato rígido de cerámica.

teriales y contactos (en forma de emparedado) y se conectan los cables que permiten transmitir la energía eléctrica que se genera. Estos módulos pueden ser rígidos o flexibles, dependiendo de la temperatura de operación y de los materiales empleados; por ejemplo, un módulo rígido estaría construido sobre soportes de cerámica.

Con ayuda de los módulos termoeléctricos es posible suministrar energía a dispositivos celulares, e incluso a las sondas espaciales. Además de las aplicaciones mencionadas anteriormente, existen muchas otras con potencial para ser utilizadas en nuevos procesos y dispositivos. No obstante, las aplicaciones comerciales se han visto limitadas debido a que

los materiales termoeléctricos presentan algunos inconvenientes, sobre todo por los costos y eficiencias, como se explica en la siguiente sección.

Ventajas y desventajas

Entre las ventajas de los materiales termoeléctricos se encuentran su bajo costo, sus tamaños relativamente pequeños, así como su capacidad de generar electricidad de manera “limpia”, esto es, sin la emisión de gases de efecto invernadero. Además, algunos de los materiales con los que se fabrican son amigables con el ambiente y no son tóxicos para las personas, como lo son algunos óxidos metálicos. Los materiales termoeléctricos, así como los módulos, no requieren de un combustible para producir electricidad, ya que aprovechan el calor que desechan otras máquinas y dispositivos. En cuanto a las aplicaciones en refrigeración, dichos materiales no requieren de gases altamente tóxicos, tuberías ni compresores, en comparación con los refrigeradores tradicionales. Además, los módulos fabricados con materiales termoeléctricos no poseen partes móviles, por lo que no existe desgaste por fricción ni es necesario usar lubricantes. Tampoco emiten vibraciones ni ninguna clase de ruido, como los generadores mecánicos empleados para aprovechar la energía eólica. Esto deri-

va en otra ventaja: el amplio tiempo de vida útil que tienen, ya que pueden operar a altas temperaturas sin la necesidad de un refrigerante y, por lo regular, son resistentes al impacto.

Las ventajas presentadas anteriormente nos harían pensar que los materiales termoeléctricos podrían ser fácilmente comercializables; sin embargo, también existen algunas desventajas. Por ejemplo, en la fabricación de estos materiales se utiliza el telururo de plomo, compuesto de plomo y telurio, dos elementos tóxicos y de difícil reciclaje. Por otro lado, algunos materiales termoeléctricos, aunque no son tóxicos, presentan una baja eficiencia, por lo que sus aplicaciones en refrigeración y generación de electricidad están limitadas actualmente.

Cabe mencionar que la principal desventaja es la eficiencia. Algunos investigadores consideran que la eficiencia más alta de estos materiales hasta el momento es de 6%; es decir, de toda la cantidad de calor que reciben, 94% lo desperdician. Además, los materiales con las mayores eficiencias son más costosos, como los empleados en las sondas espaciales. Si bien las eficiencias son relativamente bajas en comparación con otros tipos de generadores eléctricos, las aplicaciones actuales son diversas; no obstante, con ayuda de nuevas investigaciones se pretende ampliar la gama de estos materiales y dispositivos, como se discutirá a continuación.

Aplicaciones

La aplicación más importante de los materiales termoeléctricos es la generación de energía eléctrica, a partir del efecto Seebeck. Por ejemplo, algunos vehículos aprovechan el calor residual de los escapes y motores para generar electricidad, al igual que algunos aviones; además, existen sistemas que pueden aprovechar el calor de una taza de café o incluso el calor corporal para cargar dispositivos como un teléfono celular. En México existen aplicaciones en estufas ecológicas para aprovechar el calor de las chimeneas y las paredes de las mismas estufas. Otras aplicaciones incluyen calderas, chimeneas de incineradores, intercambiadores de calor, calentadores y paneles solares. Por esta razón, un material termoeléctrico puede ser



Sonda New Horizons.

un complemento a otras fuentes de energía para generar electricidad de una manera limpia y renovable.

Respecto a la generación de electricidad, los materiales termoeléctricos tienen una aplicación muy interesante: la generación de electricidad para dispositivos de exploración espacial, ya que se aprovecha el calor derivado de los materiales fisibles presentes en las sondas espaciales (por lo general, plutonio). Su uso permite que las sondas espaciales no dependan de paneles solares en regiones del Sistema Solar donde la radiación emitida por el Sol no es suficiente. Ejemplos de estas aplicaciones son la sonda New Horizons y el robot Curiosity (Cornaglia, 2018).

Otra aplicación es la medición de temperatura con materiales termoeléctricos llamados termopares, los cuales aprovechan el efecto Seebeck. Éstos tienen dos metales, en forma de alambres, que se unen por uno de sus extremos, como se observa en la Figura 3. La unión de ambos metales produce una diferencia de potencial (es decir, una tensión eléctrica) en el orden de los milivoltios (como referencia, una pila AA genera 1 500 mV) en función de la temperatura, por lo que se conoce como unión caliente. En cambio, la unión fría se encuentra en los extremos no unidos de los materiales, y es donde se mide el potencial generado en la unión caliente mediante un instrumento que convierte dicho potencial en una lectura de temperatura, en unidades como °C, °F, K o R. Los termopares son ampliamente utilizados en la industria debido a que son baratos, son fáciles de instalar, usan conectores estándar y tienen un amplio intervalo de medición; sin embargo, cuando se requieren precisiones por debajo de 1 °C, son poco exactos.

Por último, otra de las aplicaciones es la refrigeración. Los materiales termoeléctricos son útiles para enfriar, dado que aprovechan los efectos Peltier y Thomson. Este tipo de refrigeración es empleada en procesos que requieren precisión y estabilidad, como en las pruebas de vida de anaquel de medicamentos y alimentos (pruebas de estabilidad). Además, los equipos emiten menos cantidad de ruido y vibraciones, al no tener componentes como los compresores de los equipos de refrigeración tradicional; también se evita el uso de gases refrigerantes, los cuales dañan la capa de ozono. Por lo general, los equipos de

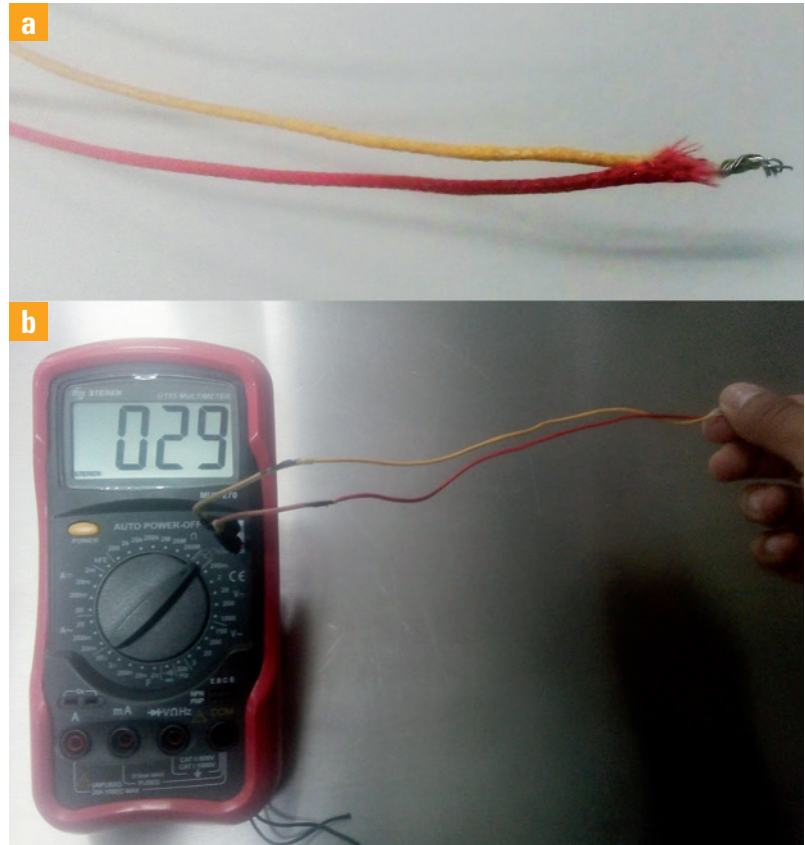


Figura 3. Esquema de un termopar: a) unión caliente; y b) medición de temperatura en °C.

refrigeración que se basan en efectos termoeléctricos cuentan con varios módulos en la parte trasera, lo cual permite enfriar o calentar dependiendo de la dirección del flujo de corriente eléctrica, que les confiere su exactitud.

Perspectivas a futuro

El principal inconveniente de los materiales termoeléctricos es la eficiencia. Se considera que un buen material termoeléctrico debe tener la conductividad eléctrica del oro, la plata o el cobre, y una conductividad térmica como la del bismuto (el peor conductor térmico). Sin embargo, hasta el momento no existe ningún material que cumpla con estas características. Los semiconductores son los materiales más propicios para aplicaciones termoeléctricas, así como algunos polímeros.

Si recordamos la figura de mérito ZT , ésta debe tener un valor de 1 para que un material se consi-

dere “bueno” y pueda tener aplicaciones en la vida cotidiana. Sin embargo, los materiales con valores de $ZT = 3$ son los más atractivos para competir con la refrigeración tradicional, lo cual permitirá su uso como material de construcción en refrigeradores domésticos. En cuanto a la generación de electricidad, es necesario contar con materiales con valores de $ZT = 2$, para lograr competir con los generadores de electricidad convencionales.

Por lo anterior, tanto en universidades como en centros de investigación se trabaja en la síntesis de materiales con los que se puedan construir módulos termoeléctricos para aplicaciones de generación de electricidad, calor y refrigeración. Algunos países con investigaciones en este campo son: Estados Unidos de América, Japón, Alemania, China, Corea del Sur e India, entre otros. En el caso de México, los esfuerzos de investigación se han centrado en la búsqueda de nuevos materiales termoeléctricos, entre ellos algunos polímeros. En particular, en la Universidad Autónoma de Querétaro se trabaja con óxidos metálicos a los cuales se agregan impurezas con elementos como el bismuto, así como con compuestos a base de cobre.

Conclusiones

Los materiales termoeléctricos son una alternativa a las bajas eficiencias que tienen las máquinas y los dispositivos empleados actualmente; en ellos, las eficiencias se ven mermadas por las pérdidas de energía en forma de calor, el cual podría aprovecharse para generar energía eléctrica por medio de los materiales termoeléctricos. Las ventajas de estos materiales incluyen: cero emisiones de gases de efecto invernadero, amplios intervalos de vida, bajo costo, tamaño reducido, así como fácil instalación. No obstante, el principal problema es su baja eficiencia, por lo que se realizan esfuerzos para resolver este problema y permitir su empleo en la generación de electricidad y refrigeración comercial.

Los materiales termoeléctricos tienen un futuro prometedor; sin embargo, es necesario que surjan más investigaciones que se centren en la búsqueda de materiales más eficientes, baratos y amigables con

el ambiente. Tal vez alguien que está leyendo este artículo, en un futuro, se dedique a realizar investigación sobre los materiales termoeléctricos.

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca proporcionada a Daniel Trejo Zamudio para la realización de sus estudios de posgrado.

Daniel Trejo Zamudio

Universidad Autónoma de Querétaro.
dteza15d.t@gmail.com

José Santos Cruz

Universidad Autónoma de Querétaro.
jsantos@uaq.edu.mx

Referencias específicas

- Cornaglia, P. S. (2018), “En busca del calor perdido: efecto Seebeck y materiales termoeléctricos”, *Ciencia Hoy*, 160:20-25. Disponible en: <<https://cienciahoy.org.ar/en-busca-del-calor-perdido-efecto-seebeck-y-materiales-termoelectricos/>>, consultado el 9 de septiembre de 2019.
- Fitriani, R. Ovik, B. D. Long, M. C. Barma, M. Riaz, M. F. M. Sabri, S. M. Said y R. Saidur (2016), “A review on nanostructures of high-temperature thermoelectric materials for waste heat recovery”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:635-659.
- Guarneros-Aguilar, C., F. López-Huerta y F. Caballero-Briones (2018), “Dispositivos termoeléctricos: generando electricidad usando el calor residual”, *Materia, Ciencia y Nanociencia*, 1:27-36. Disponible en <<https://www.uv.mx/veracruz/microna/files/2019/06/A4.-Dispositivos-Termoelectricos-Generando-Electricidad-Usando-el-Calor-Residual.pdf>>, consultado el 9 de septiembre de 2019.
- Medrano Guerrero, S. (2002), “Termopares”, *La Guía MetAs*, 7:1-4. Disponible en: <<http://www.metas.com.mx/guiametas/La-Guia-MetAs-02-07-TC.pdf>>, consultado el 9 de septiembre de 2019.
- Zhang, X. y L. D. Zhao (2015), “Thermoelectric materials: Energy conversion between heat and electricity”, *Journal of Materiomics*, 1:92-105. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmat.2015.01.001>>, consultado el 9 de septiembre de 2019.