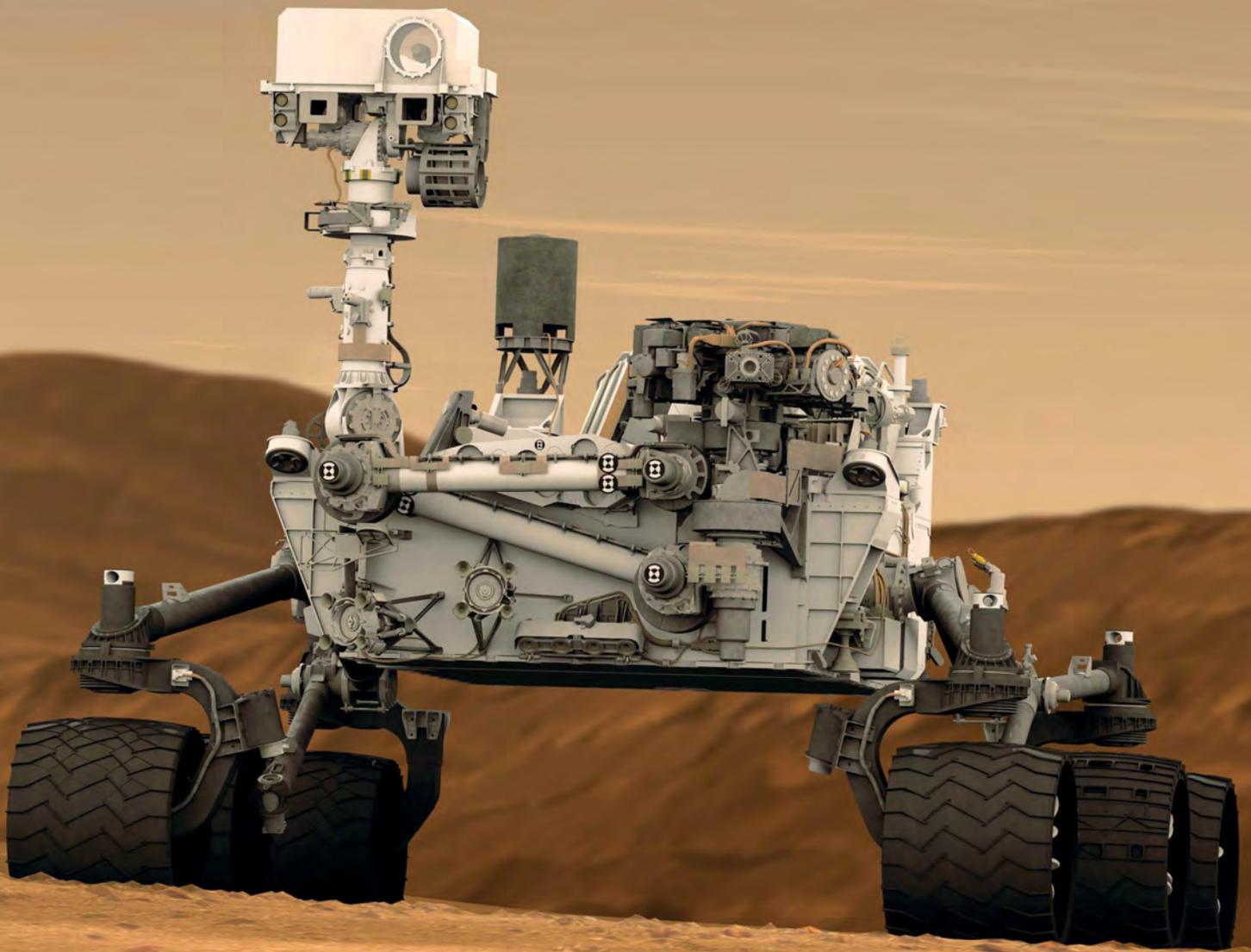


Modelo ambientado del *Curiosity*, un vehículo eléctrico todo terreno -o *rover*- no tripulado que explora la superficie de Marte desde 2012. Tiene una masa de casi 900kg, incluidos unos 80kg de instrumentos científicos, y mide 2,9m x 2,7m x 2,2m. Genera la electricidad que consume mediante el efecto Seebeck, a partir del calor desprendido del decaimiento de plutonio radiactivo. Imagen Jet Propulsion Laboratory, Caltech-NASA.



Pablo S Cornaglia

Centro atómico Bariloche, CNEA

# En busca del calor perdido

## Efecto Seebeck y materiales termoeléctricos

**L**a generación y el uso racional de la energía eléctrica constituyen una problemática de importancia central en la Argentina y en el mundo. Los desafíos consisten en administrar bien las fuentes no renovables de energía, en disminuir los costos y en mejorar la eficiencia del uso de un recurso esencial para la actividad industrial y la calidad de vida.

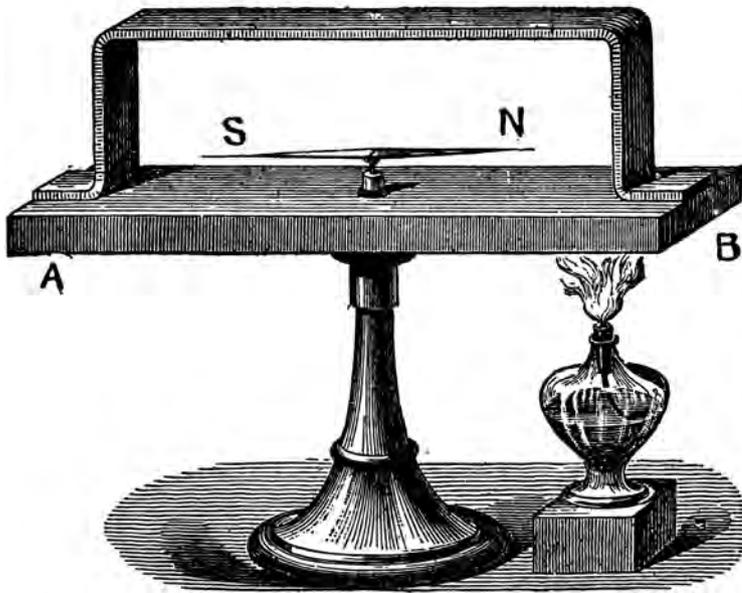
Un aspecto muy importante para mejorar la eficiencia en el uso de la energía es reducir las altas pérdidas en forma de calor residual que se producen al utilizar combustibles fósiles. En el caso de los automóviles, sus motores aprovechan menos de un tercio de la energía disponible en la nafta. Los dos tercios restantes se pierden en forma de calor en los gases del escape y en el sistema de refrigeración del propio motor. En la Argentina la mayor

parte de la energía eléctrica se genera a partir de la combustión de gas natural y las centrales térmicas más modernas solo logran aprovechar poco más de la mitad de la energía disponible del gas. Aprovechar el calor residual es un desafío para científicos y tecnólogos por motivos tanto económicos como ambientales.

En ese sentido ha resurgido el interés por los *materiales termoeléctricos*, que pueden ser utilizados para generar electricidad a partir de una fuente de calor (como el caño de escape de un auto que emite gases a alta temperatura). Los dispositivos construidos sobre la base de dichos materiales no tienen partes móviles, como las que hay en el alternador de un auto, por lo cual son silenciosos, y no necesitan mantenimiento ya que en ellos no se produce desgaste mecánico. Además, al tener un peso y tamaño reducidos, es posible utilizarlos en automóviles

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

En tiempos de crisis energética y de navegación espacial, ¿qué posibilidades pueden ofrecer nuevos materiales para transformar el calor en electricidad?



El experimento de Seebeck según una publicación de 1917 (*Hawkins Electrical Guide*, Theo Audel & Co., Nueva York). El grabado muestra cómo Seebeck colocó la aguja de una brújula (las letras S y N indican respectivamente sus polos sur y norte) dentro un anillo formado por dos placas metálicas de materiales diferentes (bismuto y cobre). Al calentar una de las uniones de las placas, indicada con la letra B, constató que la aguja se desvió de su posición inicial determinada por el campo magnético terrestre. La leyenda de la ilustración aclaraba que si las uniones de las placas están a distinta temperatura fluiría una corriente eléctrica por la placa, la que se mantendrá mientras persista la diferencia térmica.

o aviones. En los últimos años, ha resurgido la búsqueda de nuevos materiales termoeléctricos con el fin de disminuir el costo y mejorar la eficiencia de esos dispositivos, y lograr su utilización masiva.

## El efecto Seebeck

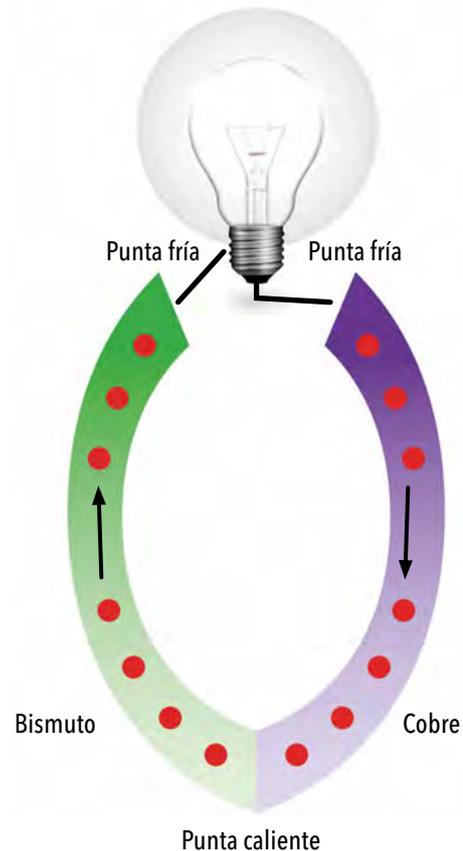
El físico alemán Thomas Johann Seebeck (1770-1831) descubrió en 1821 que, si calentaba el extremo de una brújula fabricada con dos metales diferentes, su aguja se desviaba de la dirección marcada por el magnetismo terrestre. Seebeck pensó que se trataba de un efecto magnético y postuló que el campo magnético terrestre se debe a la diferencia de temperatura entre el ecuador y los polos. A pesar de que esta suposición no se confirmó, Seebeck había descubierto la termoelectricidad, ahora también llamada *efecto Seebeck*.

Al tener un material conductor de la electricidad con temperaturas diferentes en sus extremos, se produce un desplazamiento de los electrones de un extremo al otro ocasionando una corriente eléctrica que se puede aprovechar. Dependiendo de las propiedades del material, los electrones pueden desplazarse de la parte fría a la caliente, y también puede ocurrir lo opuesto. De hecho, los materiales se pueden clasificar según la dirección neta

en que se mueven los electrones al aplicar una diferencia de temperatura entre dos extremos de una pieza de material.

El *coeficiente Seebeck* ( $S$ ) es un indicador que sirve para caracterizar a los materiales y permite cuantificar la corriente eléctrica que se produce entre los extremos de un material cuando están a temperaturas diferentes. Valores positivos de  $S$  indican que los electrones migran de la parte caliente a la fría del material y los valores negativos indican lo contrario.

Cuando se forma un circuito cerrado como el del gráfico inferior, y se unen dos materiales termoeléctricos con coeficientes  $S$  de signo opuesto, al calentar la unión entre ambos se genera una corriente que recorre el circuito. En el experimento de Seebeck, esa corriente generaba un campo magnético que desviaba la aguja de la brújula de la dirección determinada por el campo magnético terrestre. Este tipo de unión entre dos materiales termoeléctricos disímiles se llama *termopar* y es muy utilizado en los laboratorios para medir la temperatura. En este caso, conociendo el coeficiente  $S$  de los materiales y una



Esquema aclaratorio del efecto Seebeck. Una lámina de cobre (en violeta), cuyo coeficiente de Seebeck o coeficiente  $S$  tiene signo negativo, y una de bismuto (verde), con coeficiente  $S$  de signo positivo, generan un termopar. Ante una fuente de calor, los electrones se mueven en direcciones opuestas en cada lámina y dan lugar a una corriente que puede utilizarse, por ejemplo, para encender una lámpara.

punta del termopar a una temperatura de referencia conocida (por ejemplo, el punto de fusión del hielo), es posible conocer la temperatura de la otra punta midiendo la corriente (o el voltaje) que se genera.

## El efecto Seebeck en acción

El efecto termoelectrico es actualmente utilizado en aplicaciones espaciales para generar electricidad, ya que en esos casos la robustez y la confiabilidad del sistema son más relevantes que su costo o su eficiencia. Se lo utiliza en misiones que se alejan demasiado del Sol como para generar electricidad mediante paneles solares.

Dos ejemplos de esa utilización son la sonda *New Horizons*, que pasó en 2016 junto a Plutón y se dirige a explorar el cinturón Kuiper, y el robot *Curiosity*, un vehículo todo terreno o *rover* que desde 2012 explora el suelo de Marte. En estos casos se utilizó una batería de plutonio con termopares de aleaciones de plomo, telurio y estaño. El plutonio es radiactivo y al decaer genera calor, el cual se usa para mantener la temperatura del robot y para producir la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento utilizando el efecto termoelectrico. La batería del *Curiosity* genera 110W de potencia eléctrica a partir de 2000W de potencia térmica y se espera que dure unos diez años sin una pérdida significativa de potencia.

Así como el efecto Seebeck permite utilizar el calor para generar electricidad, también funciona de manera inversa y puede utilizarse para transferir calor de una punta a la otra del material pasándole una corriente eléctrica. Este efecto inverso, llamado *efecto Peltier* por el físico francés Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845), es la base de dispositivos de refrigeración, como algunos que enfrían

procesadores de computadoras o heladeras eléctricas para enchufar en el auto.

Los calefactores a gas natural que tienen un piloto utilizan como sistema de seguridad un termopar. Si el piloto está encendido, provee al termopar calor para generar energía eléctrica, y esta abre una válvula que deja pasar gas. Si se apaga el piloto, no se genera electricidad, la válvula se cierra, el gas no pasa, y ello evita accidentes debidos a la acumulación del combustible.



Dibujo de la sonda espacial *New Horizons* vista cuando, en 2016, pasaba cerca de Plutón y de su satélite Caronte en su camino a explorar el cinturón Kuiper. El plato antena, de 2,1m de diámetro, fue diseñado para posibilitar la comunicación con la Tierra desde un alejamiento de 7500 millones de kilómetros. Imagen Johns Hopkins University/Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute.

## Materiales termoeléctricos

La magnitud de la corriente eléctrica registrada debido al efecto termoeléctrico en un termopar depende del valor absoluto de los coeficientes  $S$  de cada material. Cuanto mayor sea el coeficiente, mayor será la corriente observada. Por lo tanto, el desarrollo de materiales procura identificar aquellos con mayor valor de  $S$ .

Sin embargo, para que un material sea útil no es suficiente con que tenga un alto coeficiente  $S$ . La mayor dificultad para desarrollar materiales termoeléctricos es mejorar la eficiencia de conversión de energía térmica en eléctrica. En otras palabras, transformar en electricidad la mayor cantidad posible del calor disponible. Para ello, la alta conductividad eléctrica del material debe combinarse con una baja conductividad térmica. Pero estas propiedades contradictorias son difíciles de obtener en un material, porque los buenos conductores eléctricos también suelen ser buenos conductores térmicos, y los buenos aisladores térmicos suelen ser aisladores eléctricos.

Los mayores avances para aumentar la eficiencia se han logrado a partir de materiales termoeléctricos conocidos a los que se les modifica la estructura en la escala microscópica para disminuir su conductividad térmica. Los procedimientos y los materiales utilizados para lograrlo son actualmente muy costosos como para



Trozo de unos 12cm del mineral escuterudita. Proviene de Marruecos. Didier Descouens, Wikimedia Commons.

una producción masiva. Sin embargo, se han desarrollado nuevos materiales con un balance razonable entre su costo y su eficiencia, como las escuteruditas (en inglés skutterudites), basadas en el mineral escuterudita. Su estructura cristalina deja espacios en los que pueden agregarse átomos, lo cual reduce fuertemente su conductividad térmica sin alterar la conductividad eléctrica.

En los últimos años, este material se ha empleado en prototipos de caños de escape de autos que transforman calor en electricidad. De este modo es posible ahorrar entre 3% y 5% de combustible.

## Sistemas moleculares

Una ruta alternativa para construir materiales termoeléctricos más eficientes es ir de lo microscópico a lo macroscópico. Esto es, considerar los elementos más pequeños con los que podemos trabajar, átomos o moléculas, y analizar sus propiedades termoeléctricas. De esta manera, es posible identificar sistemas que permitirán diseñar materiales desde sus componentes elementales con las propiedades termoeléctricas deseadas.

En los últimos años se ha logrado medir las propiedades eléctricas y termoeléctricas de moléculas. Para lograrlo se coloca una molécula entre dos electrodos y se mide la corriente eléctrica que circula a través de la molécula. Si los electrodos están a temperaturas diferentes, puede generarse una corriente a través de la molécula debido al efecto termoeléctrico. Sometiendo la molécula a campos magnéticos o eléctricos externos, o a tensiones mecánicas como estirla separando los electrodos, es posible modificar sus propiedades termoeléctricas. En definitiva, cambiar el coeficiente de Seebeck, y su conductividad térmica y eléctrica.

## Efecto Seebeck de espín y espintrónica

Las posibilidades de controlar la termoelectricidad en moléculas conectadas a electrodos incluyen también al espín electrónico, una propiedad de los electrones por la cual se comportan como pequeños imanes. Al igual que un imán, el espín tiene asociado un polo norte y un polo sur magnéticos, y se puede modificar la dirección en que apuntan esos polos acercando, por ejemplo, otro imán.

En sistemas moleculares es posible lograr que el coeficiente Seebeck para los electrones que tienen una orientación de espín dada sea igual en módulo pero opuesto en signo a los electrones con la otra orientación. En esas

condiciones, cuando se calienta uno de los electrodos, los espines con una orientación de espín se mueven hacia el otro electrodo a través de la molécula, y un número igual de electrones con espín opuesto se mueve en la dirección contraria. Este tipo de manipulación de los electrones según su espín se ha propuesto como base para diseñar componentes electrónicos para computación que resulten más rápidos y tengan menor consumo eléctrico que los actuales.

## Síntesis y perspectivas

La termoelectricidad es un fenómeno que permite, mediante el uso de materiales termoeléctricos, obtener energía eléctrica a partir de una fuente de calor. También permite refrigerar sin necesidad de utilizar fluidos que circulan, como en las heladeras convencionales.

En los últimos años se ha logrado mejorar las propiedades de materiales termoeléctricos, disminuir su costo y aumentar su eficiencia. El desarrollo de nuevos materiales termoeléctricos aún más económicos y eficientes permitiría acercarnos a su uso masivo y así recuperar en parte las enormes pérdidas que se producen en la generación de electricidad, en procesos industriales y en los automóviles.



Thomas Johan Seebeck (1770-1831) y Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845), descubridores de los efectos termoeléctricos que llevan sus nombres.

En la actualidad, numerosas líneas de investigación buscan ese objetivo. Algunas se han centrado en el estudio de las propiedades termoeléctricas de moléculas, los componentes más pequeños que es posible manipular, para construir materiales con las propiedades deseadas. **CH**

### LECTURAS SUGERIDAS

**ARES JR et al.**, 2012, 'Termoelectricidad: orígenes, fenomenología y materiales alternativos', *Revista Española de Física*, 26: 36.

**BALSEIRO CA & USAJ G**, 2004, 'Conducción electrónica en sistemas nanoscópicos: transportando electrones en circuitos de escala molecular', *CIENCIA HOY*, 84: 24.

**CORNAGLIA PS**, 2009, 'Transistores moleculares', *Desde la Patagonia difundiendo saberes*, 6: 38.

**CORNAGLIA PS**, 2015, 'Transporte electrónico a través de moléculas', *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 67: 18-25.

Experimento de Seebeck en [https://youtu.be/JQUY\\_bs59a4](https://youtu.be/JQUY_bs59a4)



### Pablo S Cornaglia

Doctor en física, UNCuyo.

Investigador independiente del Conicet en el Centro Atómico Bariloche.

Profesor adjunto, Instituto Balseiro, UNCuyo.

[pablo.cornaglia@cab.cnea.gov.ar](mailto:pablo.cornaglia@cab.cnea.gov.ar)