

# Termoelectricidad, la energía del desequilibrio

SANTIAGO TORNOS TEJEDOR Y ANDRÉS E. SOTELO MIEG

Los generadores termoeléctricos podrían representar en el futuro una importante fuente de energía complementaria

La termoelectricidad se considera como la rama de la termodinámica paralela a la electricidad donde se estudian fenómenos en los que intervienen el calor y la electricidad.

El fenómeno más conocido es el de la generación de electricidad mediante la aplicación de calor en la unión de dos materiales diferentes. Este fenómeno fue observado por primera vez en 1821 por el físico alemán Thomas Seebeck, y se conoce como efecto Seebeck.

## Thomas Seebeck

Thomas Johann Seebeck nació en Tallin, Estonia, el 9 de abril de 1770, en el seno de una rica familia de mercaderes. Se graduó como médico en 1802. A pesar de ello, su interés en los fenómenos físicos le empujaron a abandonar la práctica de la medicina.

En 1820 empezó a investigar experimentalmente las relaciones entre la electricidad y el calor. En 1821 formó un circuito cerrado uniendo dos alambres de dos materiales diferentes (cobre con bismuto).

Accidentalmente descubrió que si calentaba una de las uniones manteniendo la otra a temperatura ambiente, aparecía un campo magnético en las inmediaciones de los alambres, lo que se

ponía de manifiesto en la desviación que se producía en la aguja de una brújula (*figura 1*)

Siempre se ha mantenido que fue Seebeck el descubridor del efecto termoeléctrico, aunque al revisar los estudios de Alessandro Volta se ha constatado que en sus primeros trabajos pioneros sobre electricidad midió diferencias de potencial debidas a la termoelectricidad al usar contactos entre diversos metales. Sin embargo, no prestó especial atención a este fenómeno en particular.

Además, las deducciones incorrectas de este descubrimiento por parte de Seebeck fueron “el gradiente de temperaturas provoca la magnetización de los metales” y “el campo magnético terrestre es producido por la diferencia de temperaturas existente entre el ecuador y los polos”. Jamás llegó a creer que el campo magnético era una consecuencia directa de la aparición de una corriente eléctrica, en gran parte debido a su enemistad con su contemporáneo Oersted, que descubrió en 1812 la interacción existente entre una aguja imantada y un circuito eléctrico simple.

## Termopares

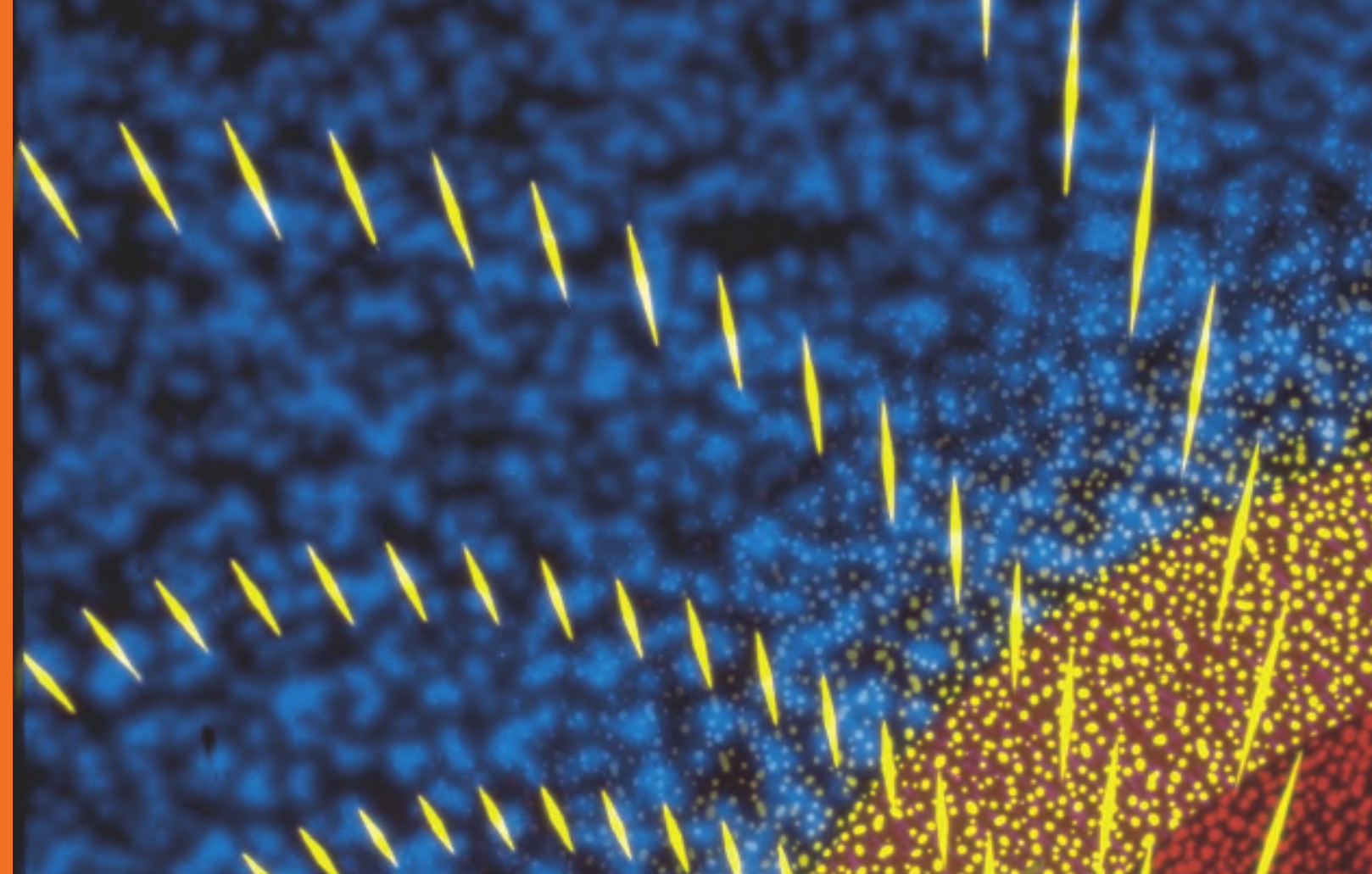
Teniendo en cuenta los descubrimientos de Seebeck, el flujo de corriente

eléctrica que aparece entre dos conductores distintos unidos, cuando se mantienen a diferentes temperaturas, es la base para la determinación de temperaturas de manera muy exacta. A la pareja de conductores que forman el circuito termoeléctrico de Seebeck se le llama termopar.

Si unimos dos aleaciones metálicas, A y B, formamos un termopar (*figura 2*). El voltaje generado al calentar la unión depende de las características de los metales usados y de la temperatura alcanzada en la unión. La propiedad fundamental para la medición exacta es que el voltaje presente una relación lineal con la temperatura.

La estructura atómica postulada por Bohr, y más tarde modificada por Schrodinger y Heisenberg, afirma que los electrones orbitan alrededor del núcleo, con un equilibrio entre la atracción electrostática y la fuerza centrífuga del propio electrón en su órbita. Las soluciones a la ecuación de onda de Schrodinger definen niveles discretos de energía en los que el electrón puede permanecer.

Las líneas de puntos de la *figura 3* representan esos niveles discretos estables, en este caso, los cinco primeros niveles para un átomo de sodio con 11 electrones. Los electrones en los prime-



ros tres niveles, al estar más cerca del núcleo, presentan una mayor atracción electrostática hacia el núcleo del átomo. El electrón del cuarto nivel, mucho más alejado del núcleo que los demás y por lo tanto menos *sujeto*, será más fácilmente desplazado.

Este último electrón en el nivel superior es conocido como el *electrón de valencia*.

Los niveles de energía permitidos para un único átomo dan lugar a bandas cuando un gran número de esos átomos forman una cadena que se repite de forma periódica en todas las direcciones. La *figura 4* muestra esta peculiaridad en un esquema sencillo de un cristal de sodio.

La aplicación de energía calorífica puede excitar a los electrones de valencia, y hacer que *salten* a un nivel energético todavía mayor completamente vacío (banda de conducción), pudiendo moverse éstos libremente, ya no sólo por sus átomos vecinos, sino por todo el cristal.

El espacio entre un nivel y otro es determinante. Si dicho espacio es muy grande, el elemento se comportará como un aislante: la energía que necesita captar el electrón es muy grande, con lo cual es muy difícil que pueda abandonar la

capa de valencia y pasar a la banda de conducción. Pero si el espacio es muy pequeño, estamos ante la presencia de un conductor: hace falta muy poca energía para conseguirlo, no sólo con el *electrón de valencia*, sino con los de varias capas incluso. Cuantos más electrones entren en juego, mejor será la conducción.

#### Efecto Joule

En el recorrido de las cargas a través del conductor se observa una pequeña pérdida de energía cinética debida a los choques que experimentan unos electrones con otros, siendo este proceso análogo al del rozamiento. Esta energía se transforma en energía calorífica, que conlleva el calentamiento del conductor.

#### Efecto termoeléctrico o efecto Seebeck

Si el conductor es calentado en un extremo, los electrones de la unión caliente incrementarán su energía respecto a los que ocupan la unión fría, creando una situación de desequilibrio. Los electrones de la unión caliente fluirán a la parte fría donde su energía disminuirá. Ésta es, esencialmente, la manera en que la transmisión de calor a través del metal está acompañada por una acumulación de cargas negativas en la unión fría, a par-

tir de la cual se crea una diferencia de potencial entre ambos extremos del conductor.

Esta diferencia de potencial continuará existiendo hasta que se llegue a un estado de equilibrio dinámico entre los electrones que fluyen por el gradiente de temperaturas de la unión caliente a la fría y la repulsión electrostática debido al exceso de carga negativa de la unión fría.

El aporte de energía calorífica en uno de los extremos nos asegura que la velocidad de transferencia de electrones de la parte caliente a la fría va a ser mayor que de la parte fría a la caliente, con una continua transmisión de calor (conducción térmica) y su correspondiente diferencia de potencial, hasta que se equilibre el gradiente de temperaturas. Una vez equilibrado, la transferencia entre ambos extremos se igualará, igualándose también tanto temperatura como potencial.

Sin embargo, si seguimos manteniendo la diferencia de temperaturas, la situación de desequilibrio seguirá existiendo y se seguirá tratando de equilibrar esa situación mediante el transporte de electrones. Ésta es la base del efecto Seebeck.

Se puede demostrar la existencia de la termoelectricidad mediante un sencillo aparato, consistente en dos tramos de



Figura 1. Instrumento de experimentación.

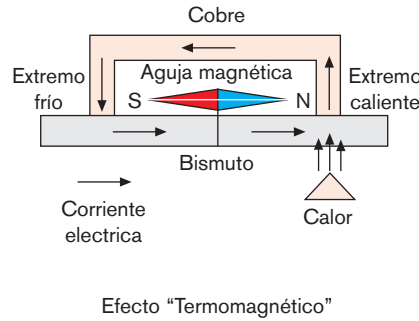


Figura 3. Niveles de energía para el átomo de sodio.

alambre de cobre unidos a un tramo de alambre de hierro mediante dos empalmes. Los otros dos tramos de cobre se conectan a un galvanómetro sensible (figura 5).

Cuando se crea una diferencia de temperaturas en las uniones, sumergiendo una unión en agua con hielo y aplicando una llama a la otra, se puede observar la medida de la corriente eléctrica generada en el galvanómetro.

La diferencia de potencial generada es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la unión caliente y la fría. El factor de proporcionalidad se llama coeficiente Seebeck ( $\alpha$ )

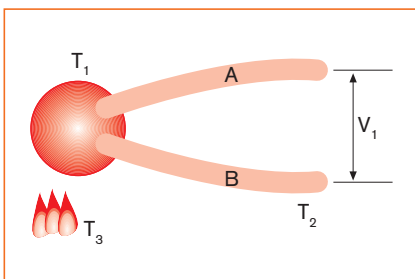
$$\Delta V = \alpha (T_c - T_b)$$

### Efecto Peltier

Si hacemos pasar una corriente eléctrica por un circuito compuesto de materiales distintos con sus uniones a la misma temperatura, se produce el efecto inverso. Se absorbe calor en una de las uniones y se desprende por la otra.

Este fenómeno, inverso al anterior, se conoce como efecto Peltier, en honor al físico francés Jean Peltier quien lo descubrió en 1834.

Figura 2. Unión termopar.



Jean Charles Athanase Peltier nació en Ham (Francia) el 22 de febrero de 1822. Ejerció como relojero hasta que se empezó a interesar por la experimentación y la observación de la naturaleza a la edad de 30 años.

En 1822 descubrió el efecto de bombeo de calor termoeléctrico, conocido popularmente como efecto Peltier. Murió en París, el 27 de octubre de 1845.

El efecto Peltier puede considerarse como el inverso del efecto Seebeck. Una corriente eléctrica de intensidad determinada a través de la unión de dos materiales conductores diferentes A y B produce o absorbe calor según la ecuación

$$W = \Pi \times I$$

donde  $W$  es el calor producido o absorbido,  $\Pi$  es el coeficiente de Peltier, e  $I$  es la intensidad eléctrica aplicada.

Para explicar el fenómeno, volvemos a imaginarnos la unión de dos materiales conductores diferentes, con distintos niveles de energía, como pueden ser un metal y un semiconductor. Los electrones fluyen de uno a otro a través de la unión hasta llegar a una situación de equilibrio. Viendo la figura 6, sólo los electrones de mayor energía del conductor pueden saltar a través de la unión al semiconductor, mientras que todos los electrones del semiconductor pueden saltar al conductor.

Los electrones del conductor que fluyen al semiconductor pueden transportar algo de energía térmica hacia fuera del material, pero es la misma ganada por los electrones del semiconductor que pasan al conductor.

Pero si ahora consideramos la situación de desequilibrio del efecto Peltier, en que introducimos una corriente eléctrica, la situación cambia.

Si la corriente eléctrica fluye del conductor al semiconductor, sigue existiendo ese transporte de energía térmica, pero como esta vez el flujo de electrones es mucho mayor que los que pasan del semiconductor al conductor, nos encontramos ante un transporte neto de energía térmica hacia fuera del conductor, lo que hace que éste se enfríe. El semiconductor se calienta, por supuesto. Otra vez más, hemos creado una situación de desequilibrio que se intenta compensar.

Si invertimos el sentido de la corriente, el flujo de energía térmica tam-

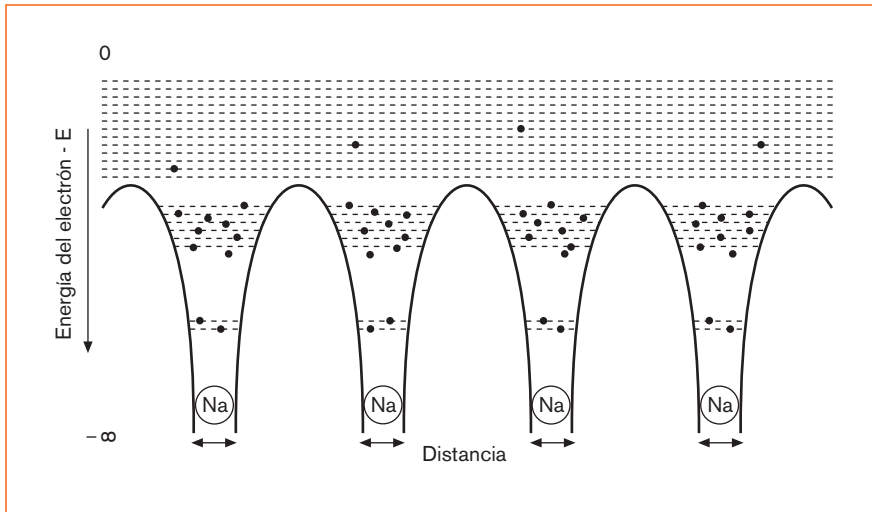


Figura 4. Fenómeno de transporte de electrones.

bién se invierte, y ahora es el semiconductor el que se enfría y el conductor el que se calienta.

### Efecto Thomson

William Thomson, más tarde conocido como Lord Kelvin, fue matemático y físico, y uno de los más importantes profesores de su época. Nació en Belfast, el 26 de junio de 1824, estudiando en las universidades de Glasgow y Cambridge. Desde 1846 hasta 1899 fue profesor de la Universidad de Glasgow. Murió el 17 de diciembre de 1907.

En el campo de la termodinámica desarrolló el trabajo realizado por Joule sobre la interacción del calor y la energía mecánica, y en la década de 1850 ambos colaboraron para investigar el fenómeno que al final se acabaría conociendo como efecto Thomson, al estudiar los procesos irreversibles en sistemas termodinámicos.

La conclusión de sus investigaciones fue la relación existente entre los coeficientes Seebeck y Peltier, siendo ésta directamente proporcional a la temperatura;

$$\Pi = \alpha T$$

A partir de estas consideraciones, trabajando teóricamente en estudios de entropía, obtuvo fórmulas explícitas para los coeficientes que han sido ampliamente verificadas experimentalmente desde entonces y consideras como correctas.

Las primeras combinaciones de materiales empleadas fueron las de hierro con cobre, hierro con constantán (aleación de cobre y níquel), cobre con constantán, y platino con aleaciones de platino y rodio.

### La figura de mérito y los semiconductores

El enfriamiento termoeléctrico no llegó a ser factible hasta los estudios de Telkes en los años 30, y de Ioffe en 1956, que

dieron lugar a la llamada figura de mérito.

Tanto para la generación de energía como para los requerimientos de enfriamiento, los materiales termoeléctricos elegidos necesitan tener un coeficiente Seebeck  $\alpha$  alto, una conductividad eléctrica  $\sigma$  elevada y una conductividad térmica  $\kappa$  lo más baja posible. La eficiencia de un material termoeléctrico depende directamente de la figura de mérito ( $Z$ ), definida como

$$Z = 2\alpha\sigma/\kappa$$

Los materiales con un valor elevado de la figura de mérito son precisamente los semiconductores, en especial los muy densamente dopados. Los más conocidos son los telururos de antimonio y bismuto.

En ese caso, el espacio entre las bandas de energía puede verse muy afectado por la inclusión (dopaje) de cantidades minúsculas de impurezas.

Cuando la impureza provoca el descenso de una banda de energía alta, el material pasa a convertirse en un donante de electrones, denominándose semiconductor tipo n. Si se produce el efecto contrario, cuando la impureza provoca el ascenso de una banda de energía baja, como es el caso del galio, el material pasa a convertirse en un receptor de electrones. Los vacíos o *huecos* de la estructura atómica actúan como si fueran cargas positivas móviles, y se denomina semiconductor tipo p.

A partir de los estudios de Ioffe y Telkes, y el desarrollo y la demanda de la industria electrónica, se dio el gran impulso a la ciencia de los materiales, siendo el descubrimiento y la constante innovación de los semiconductores lo que permitió el aumento de la eficiencia, siempre muy baja, de los generadores termoeléctricos y lograr enfriamientos con dispositivos basados en el efecto Peltier de temperatura ambiente a bajo cero. Incluso con la aparición y uso de los semiconductores no se han llegado a obtener los resultados esperados, en gran parte debido a la lenta evolución de éstos.

Figura 5.

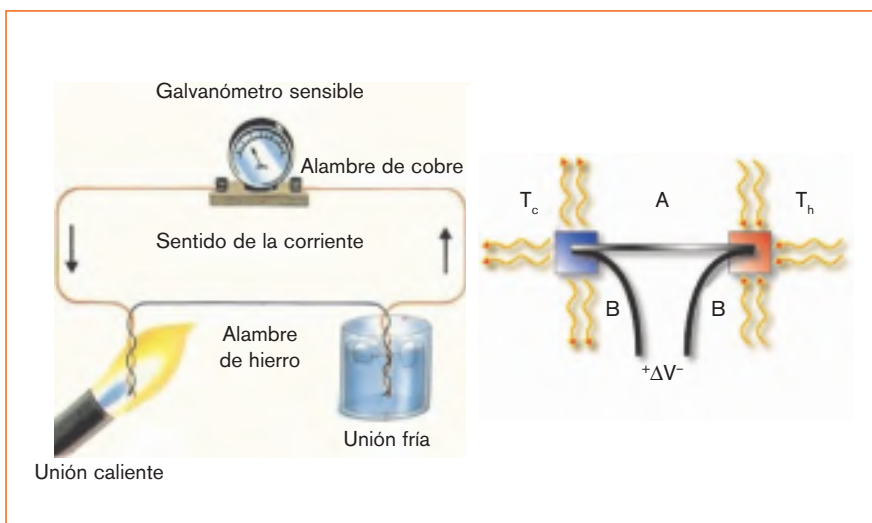
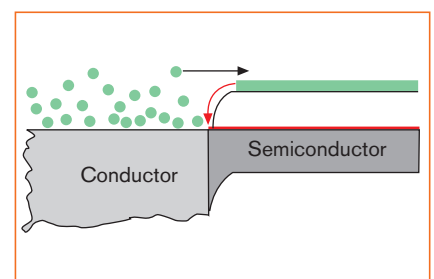


Figura 6.



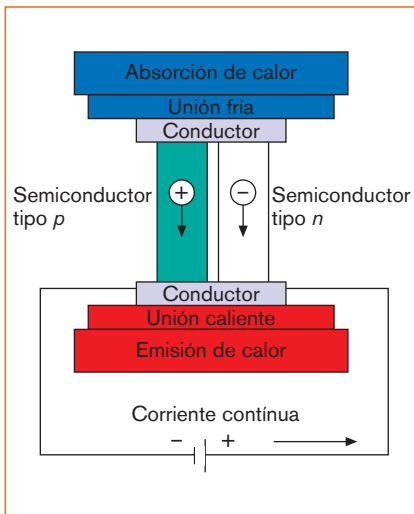


Figura 7. Dispositivo termoelectrico basico.

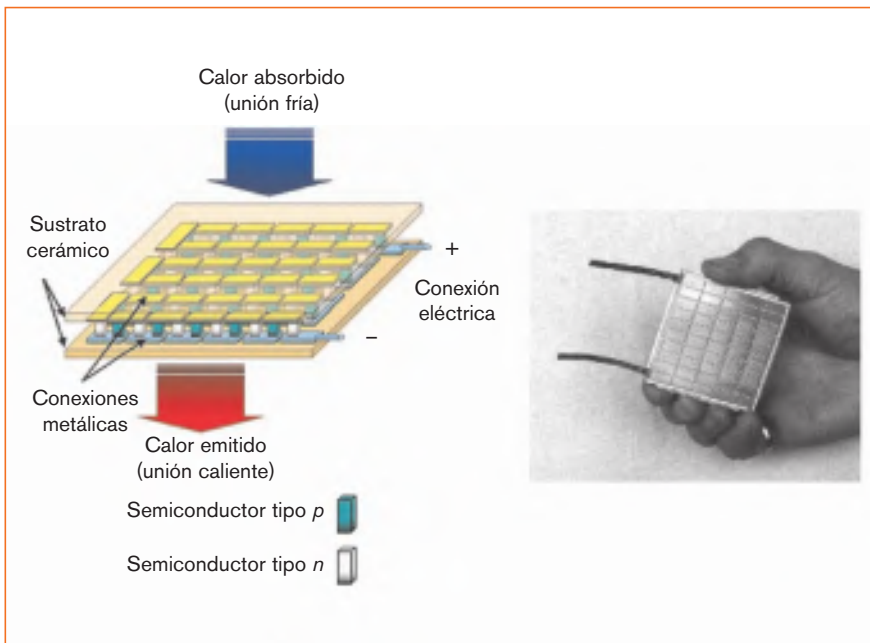
### Dispositivos termoelectricos clasicos

Un dispositivo termoelectrico basico o simple, denominado clasico, esta basado en los materiales semiconductores, y se compone de dos pequenas piezas, una del tipo semiconductor  $n$  (cargas libres) y otra del tipo semiconductor  $p$  (huecos libres), unidas en ambos extremos.

Si se somete la union a una fuente de calor, manteniendose a una temperatura, y el otro extremo a otra por debajo de la anterior, se produce una pequena fuerza electromotriz que genera una corriente electrica en el circuito, manifestandose el efecto Seebeck.

De la misma forma, y debido al efecto Peltier, si se hace pasar una corriente por el circuito, se produce un gradiente de temperaturas entre las uniones (figura 7).

Figura 8. Elemento termoelectrico (ETE).



Por supuesto, las dimensiones de un dispositivo termoelectrico son muy pequenas, del orden de milimetros. Lo que se hace es configurar un gran numero de estos dispositivos colocados en serie electricamente pero en paralelo termicamente para que actuen como una pequena bomba de calor en estado solido, aprovechando al maximo el efecto Thomson (figura 8).

Como es el caso del dispositivo basico, si mantenemos una diferencia de temperaturas entre las dos placas del modulo, el conjunto operara como un generador de corriente electrica. Y si hacemos pasar una corriente electrica, como un refrigerador.

Ademas, este tipo de celulas posee ciertas ventajas con respecto a los sistemas clasicos actuales de generacion de electricidad o refrigeracion, como pueden ser:

- Reversibilidad de los focos frio y caliente invirtiendo la polaridad de la tension de alimentacion.
- Ausencia de vibraciones, y por tanto de ruido. Silencio absoluto a pleno rendimiento. Idoneos para equipos sensibles de altas prestaciones.
- Pueden trabajar en atmosferas agresivas, sensitivas o severas para la refrigeracion convencional.
- Potencia refrigerante variable, en funcion de la tension de alimentacion.
- Ausencia de mantenimiento, al no constar de partes moviles.
- Estanqueidad de los elementos.
- Control de temperaturas de hasta  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Posibilidad de funcionamiento en cualquier posicion.

- Experimentalmente se ha demostrado que pueden trabajar mas de 100.000 horas ininterrumpidamente.

- Emision cero de componentes contaminantes de cualquier tipo, como pueden ser dióxidos o monóxidos de carbono, sulfuros o clorofluorocarbonos (CFCs).

- Reciclaje de los componentes una vez acabado el ciclo de vida util del producto.

### Aplicaciones de los materiales termoelectricos

Debido a la especial naturaleza de estos materiales, las aplicaciones son numerosas, en los siguientes campos:

#### Refrigeracion/calefaccion

Las celulas convencionales refrigerantes (calefactoras si se invierte la polaridad), llamadas sencillamente placas Peltier, son las mas utilizadas debido a que su coste en el mercado cada vez es menor, y sus aplicaciones se van incrementando dia a dia. Los semiconductores mas utilizados para su fabricacion son los telururos de bismuto y los seleniuros de antimonio.

El rendimiento de estos pequenos equipos refrigerantes, siempre muy bajo y de gran sensibilidad, depende en gran medida de su montaje.

Cuanto mas baja logremos mantener la temperatura del lado caliente, menores temperaturas obtendremos en el lado frio debido a que el salto termico permanece aproximadamente constante.

Otro de los factores que influye en gran medida en el rendimiento es la intensidad de funcionamiento optima del conjunto.

Conforme vamos aumentando la intensidad, mayor capacidad refrigerante obtenemos, pero el calentamiento del conjunto debido al efecto Joule tambien aumenta. Se llega a un punto donde un incremento de la intensidad no producirá enfriamiento, viéndose anulado e incluso superado por el efecto Joule, desperdiando de este modo energía eléctrica y disminuyendo el rendimiento.

Este nuevo tipo de dispositivos podría sustituir en bastantes casos a los sistemas de refrigeracion clasicos por compresion por el excesivo volumen y gasto energetico de éstos, eliminando así el uso de los clorofluorocarbonos (CFCs) que destruyen la capa de ozono, siendo una alternativa ecologica a éstos. En el campo de la automocion presentan una alternativa

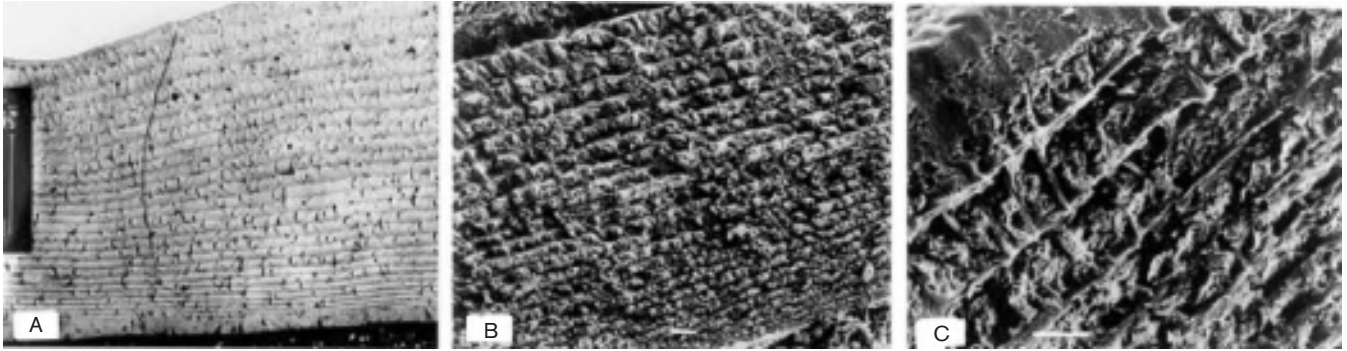


Figura 9. A: Micrografía electrónica de una célula de avispa. B y C: Escáner electrónico de secciones de la célula.

interesante, al no interferir en el rendimiento de los motores.

En sectores como las compañías petroquímicas, se observa una creciente demanda de este tipo de aplicaciones, destacando la ventaja que ofrecen de no producir ningún tipo de chispa que pueda provocar detonaciones o deflagraciones.

Sin embargo, el bajo rendimiento que poseen ha frenado sus aplicaciones en la refrigeración de espacios y su uso como aire acondicionado, a pesar de otros atractivos como la conversión inmediata en bomba de calor (reversibilidad de los focos caliente y frío) o el bajo voltaje requerido y su consiguiente ahorro energético.

Aparte del gran mercado comercial con aplicaciones específicas que está apareciendo, las placas Peltier se comercializan con bastante buen precio desde hace ya más de una década. Es el cliente quien busca aplicaciones al producto, o necesita sus características frente a una necesidad creada, en un "hágalo usted mismo". Cualquier demanda de refrigeración más o menos puntual a pequeña escala puede ser resuelta fácilmente, y con una baja demanda de energía, con este tipo de sistemas.

### Generadores

Sin embargo, las células basadas en el efecto Seebeck son de gama alta y mucho mayor precio, con aplicaciones menos precisas, que prometen ser importantes en un futuro no muy lejano. Su principal función es la de recuperar energía perdida de los focos calientes, como puede ser un tubo de escape o turbinas de cogeneración.

El conjunto de células Seebeck que forman el módulo termoelectrico se sitúa entre la fuente de calor y el foco de pérdidas de ésta. La diferencia de temperaturas genera la energía eléctrica.

La primera aplicación de estos generadores termoelectricos se remonta a los

años 70 por parte del Jet Propulsion Laboratory de la NASA para la exploración espacial.

Para misiones de larga distancia, consideradas éstas las que van más allá del planeta Marte, la luz del Sol es demasiado débil para poder ser aprovechada por los paneles solares de las sondas. En su lugar, la generación de energía proviene de la conversión del calor de la desintegración radioactiva del plutonio 238 ( $^{238}\text{Pu}$ ) usando parejas de termopares de semiconductores.

Estos generadores denominados RTG (Radioisotope Thermoelectric Generators o Generadores Termoelectricos de Radioisótopos) fueron usados en las misiones Apollo, Pioneer, Viking, Voyager, Galileo y Cassini, y se siguen usando todavía en la actualidad.

La sonda Voyager I todavía sigue funcionando gracias a estos RTG, y sigue mandando información científica a la Tierra (la cual tarda ocho horas en llegar) después de más de 25 años de ininterrumpidas operaciones a través del espacio profundo tras su viaje por el Sistema Solar, siendo el objeto fabricado por el hombre que más lejos ha llegado en la historia de la humanidad.

Las primeras aplicaciones comerciales de estos dispositivos fueron en sectores de productos químicos, extracción y refinerías de petróleo, empresas con tecnologías de biomasa y, más recientemente, el mundo de la automoción por la gran presencia de ciclos diésel, turbinas de cogeneración y procesos con gran desaprovechamiento de energía térmica. A pesar de los óptimos resultados en baja potencia y el significativo ahorro final, su baja eficiencia ha frenado su desarrollo.

Actualmente, el principal uso de estas células es en la generación de energía a bajas potencias, con el objetivo de sustituir a las pilas comerciales a largo plazo solucionando los problemas de éstas de

agotamiento, vertido y contaminación. También podrían llegar a sustituir a pequeños paneles solares en aplicaciones puntuales.

Pero desde hace ya algún tiempo lo que se está intentando es implantar el uso de estos dispositivos en la industria, en forma de generadores de alta potencia. El gran atractivo es evidente: producir energía eléctrica con un gasto cero de combustible al aprovechar focos de calor desperdiciados en procesos de fabricación se podría considerar el sueño de todo ingeniero.

### Sensores térmicos

Como bien hemos explicado, los dispositivos termoelectricos de semiconductores no son más que asociaciones de termopares, una de las formas más precisas de medir la temperatura, por lo que el desarrollo de sensores térmicos a partir de éstos era más que evidente.

Como ejemplos de algunas aplicaciones en este campo, sin extendernos demasiado, podemos citar sensores de flujo de calor a temperaturas criogénicas, sensores ultrasónicos asociados a intensidad, sensores de temperatura sin contacto por infrarrojos, sensores de flujos de fluido, e incluso la detección del punto de rocío o condensación del agua atmosférica.

### Nuevos materiales termoelectricos: óxidos

La gran limitación que poseen los dispositivos clásicos vistos hasta ahora radica en el rendimiento, todavía muy bajo, y a su falta de eficacia a temperaturas mayores de 600 °C.

A pesar del gran salto que se produjo con la aparición de los semiconductores y la optimización de este tipo de materiales mediante el dopaje selectivo a nivel atómico, llegando a producir rendimientos del doble del hasta entonces conocido, las propiedades tóxicas de los compuestos de telururos y seleniuros,

tanto en el ser humano como en el medio ambiente, crea limitaciones muy concretas para su uso público.

Por todas estas razones, la búsqueda de nuevos materiales con propiedades termoeléctricas se ha situado a la cabeza de las investigaciones de universidades de todo el mundo.

Teniendo en cuenta la teoría termoelectrónica, los óxidos se consideraron desde el principio como inapropiados, al tener una muy baja movilidad electrónica. Pero la aparición en 1997 de un nuevo compuesto oxidado de altas prestaciones termoeléctricas (hasta diez veces lo esperado) ha modificado el patrón de búsqueda en este campo.

Este nuevo compuesto es el  $\text{NaCo}_2\text{O}_4$ , que presenta un conjunto de propiedades inusuales. Sus uniones estructurales son a nivel iónico (en contraposición con los semiconductores termoeléctricos, que son covalentes). Similitudes con los semiconductores demostraron que este nuevo óxido de cobalto se asemeja en funciones a los tipo p.

Además, presenta propiedades magnéticas muy peculiares. A bajas temperaturas se comporta de forma antiferromagnética, pero sus electrones no se encuentran fijos en su estructura pudiéndose desplazar a lo largo de todo el material y contribuyendo así a sus propiedades termoeléctricas.

Posteriores investigaciones también demostraron que el poder termoelectrónico se anulaba aplicando un campo magnético al material, bloqueando el movimiento de los electrones y, de esta manera, el transporte de energía.

A partir de este descubrimiento, numerosos materiales oxidados a partir de compuestos de cobalto han presentado también las mismas propiedades.

La teoría clásica de bandas no puede explicar el porqué de estos fenómenos. Para explicar esto, se han propuesto dos modelos diferentes. En el primero de ellos, se tiene en cuenta la degeneración de la energía en los spines asociados a los diferentes electrones de valencia. En el segundo, se hace referencia a un modelo doble de bandas; una pequeña banda de conductores ligeros responsable de las propiedades metálicas coexiste con otra de conductores pesados asociados a la energía de los orbitales atómicos, creando picos de distribución de una y otra a lo largo de todo el material.

A pesar de todo, los fenómenos no son explicados en su totalidad, y muchas propiedades magnéticas y metálicas carecen todavía de explicaciones factibles.

De momento, el uso de estos óxidos impide la propia oxidación de los compuestos a altas temperaturas (al estar ya oxidados), siendo muy apropiados para fines industriales y aeronáuticos. Además, la estabilidad de estos compuestos es más elevada que la de los semiconductores, y sus propiedades mecánicas son superiores, por no hablar de la ausencia de elementos tóxicos.

### La termoelectricidad en la naturaleza

Investigadores de la Universidad de Tel Aviv, Israel, tras el estudio de la vida social de determinadas avispas de la zona durante el verano del 2003, llegaron a una contradicción interesante. Mientras que la temperatura ambiente estaba a más de 60 °C, las avispas que buscaban comida en realidad se encontraban a una temperatura muy por debajo de la ambiental, a pesar de la intensa actividad muscular.

Se llegó a la conclusión de que estos insectos deberían poseer algún tipo de bomba de calor, accionada a través de reacciones electroquímicas en su cuerpo, o a algún tipo de panel fotovoltaico a escala celular. Esto explicaría por qué las avispas permanecen activas incluso en los días más calurosos.

Tras la disección de una avispa, se llegaron a localizar varias células que actuaban de esta forma, observándose la similitud con los dispositivos termoeléctricos (figura 9).

### Conclusiones

La creciente demanda de energía en todo el mundo ha creado una situación de búsqueda constante de nuevas fuentes alternativas, teniéndose en cuenta además el aspecto ecológico de las mismas. Aunque en el momento actual todavía no hay aplicaciones específicas a gran escala, en un futuro a no tan largo plazo la generación de energía mediante módulos termoeléctricos podría llegar a ser una muy importante fuente de energía alternativa.

A la ciencia se le presentan ahora nuevos retos. El encontrar explicaciones para los fenómenos de los óxidos termoeléctricos, que se hallan envueltos en un profundo misterio, y hallar sus respectivos tipos *n* para fabricar nuevos dispositivos con los atractivos ya descritos y superiores rendimientos.

El tiempo dirá hasta qué punto el ingenio humano es capaz de resolver estas nuevas incógnitas para continuar desvelando el mundo que nos rodea.

### Bibliografía

- [http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat\\_en/kap\\_2/advanced/t2\\_3\\_2.html](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_2/advanced/t2_3_2.html)
- Información científica de los efectos Seebeck y Peltier <http://www.jce.divched.org/Journal/Issues/1996/Oct/abs940.html>
- Journal of Chemical Education. Universidad de Wisconsin (Octubre 1996, Vol. 73-10, páginas 940 y siguientes) <http://www.uni-konstanz.de/physik/Jaeckle/papers/thermopower/thermopower.html>
- Departamento de Física de la Universidad de Konstanz (Alemania) <http://www.nasa.gov>
- RTGs en distintas misiones espaciales <http://www.tf.chiba-u.jp/~shin/pdf/proc98.pdf>
- Universidad de Chiba, Japón, óxidos termoeléctricos <http://faculty.web.waseda.ac.jp/terra/index-e.html>
- Laboratorio Terasaki, Japón (primera síntesis del  $\text{Na}_2\text{Co}_2\text{O}_4$  y propiedades) <http://physicsweb.org/article/news/7/6/2>
- Physics web (termoelectricidad en la naturaleza, Junio 2003, artículo 90)

## AUTORES

**Santiago Tornos Tejedor**  
Ingeniero técnico industrial.

**Andrés E. Sotelo Mieg**  
Doctor en Ciencias Químicas y profesor de Materiales en la EUTI de Zaragoza.