

Propiedades termoeléctricas de los materiales. Efecto Seebeck y Peltier. Fundamentos teóricos y propuesta experimental.

Apellidos, nombre	Rayón Encinas, Emilio (emraen@upvnet.upv.es) López Martínez, Juan (jlopezm@mcm.upv.es)
Departamento	Ingeniería Mecánica y de Materiales
Centro	Universitat Politècnica de València

1 Resumen

Durante la lectura de este artículo, descubrirás la sorprendente propiedad termoeléctrica que presentan algunos materiales y cómo se aprovecha para desarrollar sensores de temperatura, bombas de calor miniaturizadas y termopilas. Además, te proponemos una sencilla configuración experimental que te permitirá observar y analizar empíricamente los dos fenómenos termoeléctricos más importantes; el efecto Seebeck y el efecto Peltier.

Este artículo puede resultar de interés para estudiantes de Grado y Máster en los que se curse Ciencia de Materiales, electricidad, electrónica, aeronáutica, sensores y automática. Del mismo modo, este documento resultará de interés a investigadores sobre energías renovables. No se requiere de conocimientos previos, si bien convendría disponer de alguna experiencia en trabajo de laboratorio para montar el experimental propuesto.

2 Objetivos

Una vez que termines este artículo, habrás adquirido la capacidad de:

- Comprender el efecto termoeléctrico, causas y efecto.
- Distinguir entre el efecto Seebeck y el efecto Peltier.
- Montar un diseño experimental para observar la propiedad termoeléctrica por efecto Seebeck y Peltier.
- Desarrollar un termopar sencillo
- Seleccionar un sensor termopar en función de su respuesta
- Diseñar y utilizar bombas miniaturizadas de frío-calor.

3 Introducción

Los materiales metálicos aumentan su conductividad eléctrica al disminuir su temperatura, mientras que en los semiconductores ocurre lo contrario. Este fenómeno se debe a que el calor afecta a la movilidad de los electrones en el seno de un metal. En el caso de un semiconductor, el calor influye tanto en la disponibilidad como en la movilidad de sus portadores de carga eléctrica. Queda fuera del alcance de este artículo explicar en profundidad estos mecanismos. Basándonos en el cambio de resistividad/conductividad eléctrica por efecto de la temperatura, podemos crear sondas electrónicas denominadas RTD (Resistance Temperature Detector), o Detector de Temperatura Resistivo. Las sondas de temperatura resistivas más utilizadas son las Pt100, que adquieren este nombre por tratarse de sensores de platino *Pt*, cuya resistencia es de 100 ohmios a cero grados Celsius. Sin embargo, existe otro efecto de tipo termoeléctrico por el que un material es capaz de transformar calor en energía eléctrica y viceversa, abriendo un abanico de aplicaciones y posibilidades muy interesantes.

En este artículo se describirán los efectos termoeléctricos Seebeck y Peltier. Como se verá más adelante, el efecto Seebeck establece que se puede generar un potencial eléctrico inducido por un gradiente de temperatura. Este efecto se aprovecha para fabricar

termopilas y sondas de temperatura, que permiten mayor rango de medida que los mencionados RTD. Por otro lado, el proceso es reversible; si se fuerza una corriente eléctrica en un termopar, se produce frío y calor en las uniones, efecto Peltier.

4 Termoelectricidad

4.1 El Efecto Seebeck

Thomas Johann Seebeck fue un médico e investigador alemán del siglo XIX, Figura 1a. Este señor descubrió por casualidad, que uniendo por sus extremos dos barras de diferente metal en un lazo cerrado y estando una unión más caliente que la otra, se generaba espontáneamente una corriente eléctrica en el circuito. Seebeck llegó a esta conclusión indirectamente, gracias a que una brújula que tenía sobre la mesa se desviaba de su norte natural cuando el circuito adquiría la disposición descrita, ver Figura 1b.

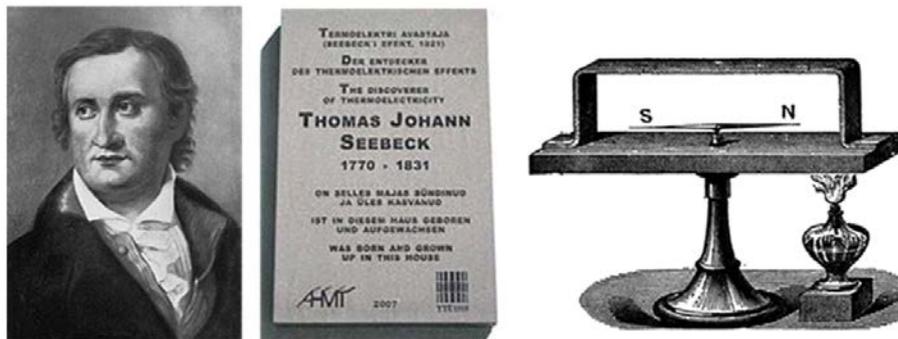


Figura 1. (a) Retrato y trabajo de Thomas J. Seebeck sobre termoelectricidad. (b) Experimento de Seebeck con el que observó un campo magnético -asociado al paso de corriente-, generado por un gradiente de temperatura.

Ayudándonos del esquema de la Figura 2 y de forma muy simplista, pero sin perder rigor, podemos decir que: El fenómeno termoeléctrico sucede cuando en un hilo o barra de metal existe un gradiente de temperatura, el cual genera una distribución heterogénea de cargas en su interior, como si de un gas clásico se tratara. En este caso, se entiende que 'el gas' corresponde a cargas eléctricas en el metal, que se redistribuyen según la temperatura de cada zona. Las partes más calientes generan una expansión *del gas eléctrico*, disminuyendo la concentración de cargas que se trasladan hacia la zona más fría y densa. La forma en que se trasladan estas cargas se explica por la aparición de *fonones*, ondas de distribución de cargas según modelos de física cuántica. Esta distribución de cargas fuera del equilibrio genera a la práctica, un potencial eléctrico.

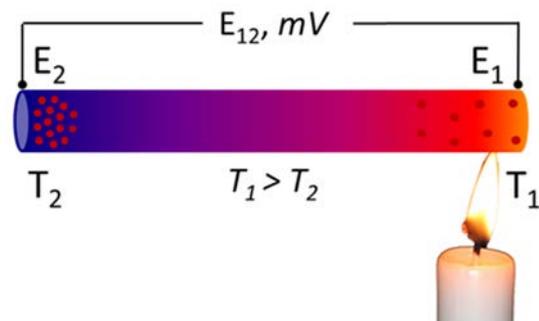


Figura 2. Representación del fenómeno termoeléctrico en un conductor metálico. El gradiente de temperatura genera una distribución desigual de la densidad de cargas -fonones-, lo que conlleva a su vez a una diferencia en el potencial eléctrico.

4.1.1. Termopares por efecto Seebeck

Hasta el momento, se ha mostrado que si un conductor metálico posee más temperatura en un extremo que en el opuesto, aparecerá una diferencia de potencial eléctrico (ΔE) de unos pocos milivoltios, entre ambos. El ΔE resultante, depende de la diferencia de temperatura (ΔT) entre dos puntos del metal y de la naturaleza del mismo (Fe, Al, Cu,...). Ahora consideremos la configuración mostrada en el esquema de la Figura 3. En este caso, utilizamos dos hilos de diferente metal que están unidos físicamente por uno de sus extremos -unión bimetálica o par metálico-. Los extremos opuestos quedan en lazo abierto. Si la unión bimetálica la exponemos a una temperatura mayor que la de los extremos libres ¿qué potencial deberíamos obtener entre los dos extremos del lazo abierto?



Figura 3. Representación de una unión bimetálica o par metálico. La unión se expone a una temperatura mayor que la del lazo abierto.

Según lo que hemos comentado, cada metal generará su propio ΔE desde el extremo de la unión caliente al frío. De este modo, se genera un ΔE_{12} entre los extremos caliente-frío del metal 1 y un ΔE_{13} , entre los extremos del metal 2. Como resultado, en el lazo abierto obtendremos un $\Delta E_{23} = f(T)$ del orden de unos pocos milivoltios. Este voltaje podrá ser medido con un voltímetro convencional. Bajo esta configuración, acabamos de desarrollar un sensor de temperatura denominado *termopar*, que transforma calor en potencial eléctrico. El potencial dependerá de la temperatura, pudiendo desarrollar un termómetro electrónico. Para profundizar en este comportamiento, se propone al estudiante realizar la siguiente práctica que permite desarrollar y caracterizar diferentes pares de termopares.

REFLEXIÓN: Hemos descubierto que cuando dos metales diferentes los unimos por un extremo y esta unión se encuentra a una temperatura diferente a la del opuesto, obtendremos un potencial espontáneo $\Delta E_{13} = f(T)$ en el lazo abierto.

¿Qué piensas que ocurriría si ambos hilos fueran el mismo metal? ¿Qué potencial obtendrías en ese caso? Si consigues responder a esta pregunta, entenderás la necesidad de utilizar hilos de naturaleza diferente.

En el caso del experimento de Seebeck en el que observó la desviación natural de una brújula, el circuito termopar se encontraba en una configuración en serie con otra unión bimetalica. Ambas uniones, aunque con los mismos metales combinados, se encontraban a diferente temperatura. El resultado de esta configuración, es un potencial diferencial entre ambos termopares, generando la corriente espontánea en el lazo cerrado. El mismo esquema experimental que el ilustrado de la Figura 1.

4.1.2. Desarrollo y caracterización de termopares

La primera tarea consiste en obtener cables o hilos de diferentes metales. Se recomienda por facilidad de adquisición en ferreterías especializadas; el aluminio (Al), cobre (Cu), hierro (Fe) y acero inoxidable (Fe-C-Ni-Cr), que se pueden encontrar en forma de alambres para soldadura. Para un laboratorio especializado también es posible obtener hilos de aleación de constantán, de cromel y de alumel. Los alambres se cortarán en trozos de unos 40 cm de longitud. Con ayuda de alicates o una herramienta similar, se trenzará uno de los extremos de un hilo con el otro de diferente metal -por ejemplo, alambre de aluminio con alambre de acero inoxidable-. Los extremos opuestos quedarán libres y separados (lazo abierto), según se muestra en el esquema de la Figura 3.

Posteriormente, se introducirá la unión trenzada en un vaso de precipitado con agua fría o con hielo, tal y como muestra el esquema de la Figura 4. Es preferible utilizar agua destilada, pero con agua de grifo funciona adecuadamente. El vaso se coloca sobre una placa calefactora. Se procederá a registrar la temperatura del agua con un termómetro convencional. Puedes experimentar en un rango de unos 5° hasta los ~80 °C. Evita superar esta temperatura máxima porque el agua comenzará a evaporar, aumentando el riesgo de quemadura y degradación de los materiales. Utilizando un multímetro configurado para medir el voltaje en corriente continua (DC), se registrará el potencial del lazo abierto ΔE_{13} a intervalos de unos 5°.

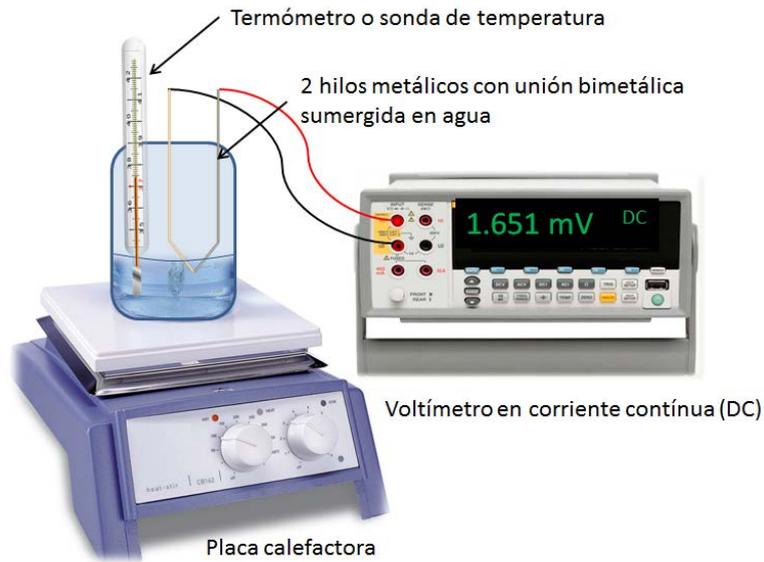


Figura 4. Esquema del experimento para determinar la respuesta de un termopar formado por dos alambres de diferente metal.

Este experimento se puede repetir para probar diferentes pares de metales con el fin de comparar la respuesta de cada termopar. El mejor modo de observar y comparar los resultados obtenidos es mediante una gráfica [1]. Con los datos registrados, se representará el voltaje frente a la temperatura. La Figura 5, muestra los resultados obtenidos por estudiantes de 2 tipos de termopares, preparados en la misma sesión. Al cociente $\Delta E/\Delta T$ o pendiente de la respuesta, se le denomina *termopotencia Seebeck* y determina la eficiencia termoeléctrica del par metálico.

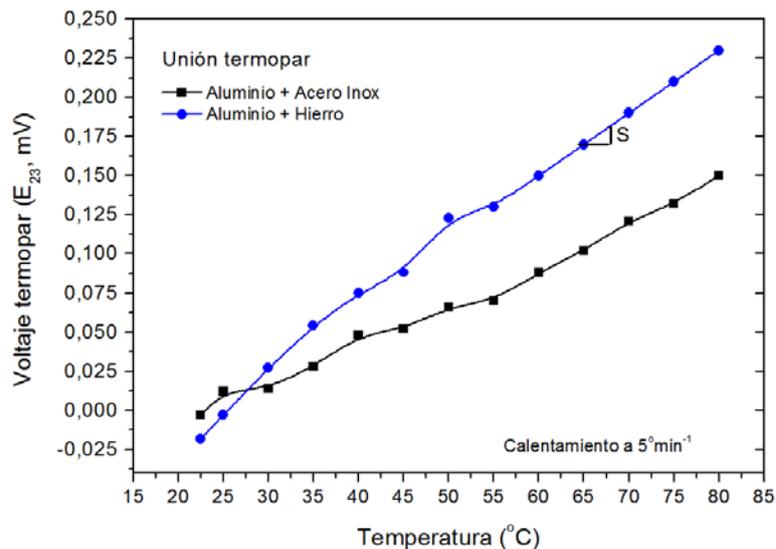


Figura 4. Respuesta de voltaje termopar frente a la temperatura.

TAREA EXPERIMENTAL: Desarrolla uno o varios termopares utilizando combinaciones de diferentes metales. Sigue las tareas descritas en este artículo para realizar todo el experimental y posterior análisis. Toma las precauciones oportunas para evitar quemaduras y evita sobrepasar los 80°C. Representa el potencial eléctrico frente a la temperatura de ensayo. Después, calcula la termopotencia para cada par metálico ensayado.

Para diseñar un termopar es deseable; (i) una respuesta $\Delta E/\Delta T$ lo más lineal posible, así como, (ii) el mayor valor posible de termopotencia -coeficiente Seebeck-. Mayores coeficientes aseguran una respuesta de mayor sensibilidad y resolución de medida para la electrónica de registro. Es decir, una respuesta más pronunciada, abarata la electrónica necesaria para la conversión analógico-digital de las señales voltaje-temperatura. El tipo de termopar más utilizado se fabrica con uniones cobre-constantan, capaces de ofrecer 45 mV por cada grado kelvin. En todo caso, la elección del par metálico vendrá determinado principalmente, por el rango de temperatura al que estará expuesto el sensor.

Existen multitud de termopares, siendo útiles para medir temperaturas criogénicas o de miles de grados positivos. Los termopares comerciales se codifican con colores y letras para poder distinguirse sin lugar a error. En realidad, los termopares comerciales tienen en cuenta otras consideraciones que no han sido descritas en este artículo, por quedar fuera del alcance del mismo. Por ejemplo, debe de tenerse en cuenta, la necesidad de estabilizar o compensar la temperatura del lazo abierto, así como otros efectos inducidos por la conexión con otros hilos de acoplamiento, medida y conversión. La finalidad de este artículo docente es demostrar el efecto de una manera sencilla pero eficaz, animando al estudiante a que investigue con mayor profundidad sobre este tema, si la resulta de interés.

TAREA PARA REFLEXIONAR

Imagina que trabajamos en un laboratorio de I+D+i de una empresa que fabrica radiadores eléctricos. ¿Cuál de los dos pares metálicos de la Figura 4, utilizarías para fabricar **la sonda del termostato** que controla la temperatura del radiador? ¿Por qué tomas esta decisión?



4.1.3. Las Termopilas

Si la unión bimetálica genera un potencial de unos pocos milivoltios al calentar uno de sus extremos, ¿qué ocurrirá si disponemos de varias uniones en serie a la misma temperatura? La respuesta es sencilla, se obtiene un potencial eléctrico mayor, resultando de la suma de cada potencial de unión. Con esta configuración estarías diseñando una termopila, pequeños dispositivos de película delgada que adheridos a una superficie caliente son capaces de generar energía eléctrica.

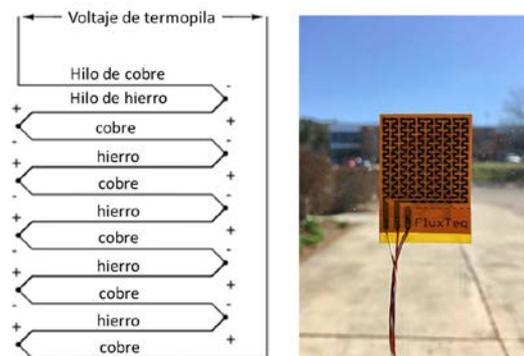


Figura 5. a.) Uniones bimetálicas en serie, aumentan el voltaje de la termopila. (b) Fotografía de una termopila de capa delgada de la empresa Flux Teq.

INVESTIGA: Si el voltaje suministrado por una termopila aumenta al poner uniones termopares en serie, ¿Qué configuración podríamos adquirir para aumentar la intensidad de corriente (potencia) utilizando varias termopilas y así poder aprovechar el calor del sol o de otra fuente calórica para generar energía limpia?

4.2 El Efecto Peltier

Se ha descrito la posibilidad de generar un potencial eléctrico al someter una unión bimetálica a una temperatura diferente que la de su otro extremo abierto. En este punto, es fácil preguntarse si el efecto Seebeck es reversible, es decir: ¿Si hago circular corriente por el lazo bimetálico, seré capaz de aumentar la temperatura o enfriar sus extremos? La respuesta es sí, y a este fenómeno se le conoce con el nombre de *efecto Peltier* en honor a su descubridor, el francés Jean Peltier.

Al igual que el efecto Seebeck, este fenómeno se explica por la difusión de cargas de manera heterogénea dentro del material. En este caso, partículas de un '*gas frío*' se mezcla con otro más caliente y menos denso, por efecto de forzar una corriente entre ambas uniones. En este caso se utiliza una unión de tipo semiconductor en vez de metálica (uniones de semiconductor tipo-n, con uniones tipo-p). Un dispositivo Peltier se fabrica mediante baterías en paralelo de centenares de uniones semiconductoras a modo de sándwich, con el fin de obtener potencias apreciables Figura 6a. Las células Peltier se alimentan mediante corriente continua, en el rango de entre los 6 a 24 V. Invertiendo la polaridad se consigue seleccionar qué superficie es la que

enfria y cuál calienta. Se suministran en diferentes tamaños, formas y potencias, siempre mostrando dos caras planas para el intercambio de calor, Fig. 6b.

En una célula Peltier, el calor de una de las caras es transferido a la opuesta, funcionando como una bomba de calor. Para mejorar la eficiencia de una Peltier hay que procurar disponer de un buen disipador en la superficie que genera el calor. Además, ambas caras deben de tener un buen contacto físico con el medio que se pretenda calentar o enfriar, para este fin se suele usar una pasta especial que mejora la transferencia térmica. Con estos pequeños dispositivos se pueden alcanzar temperaturas criogénicas y de hasta unos cientos de grados.

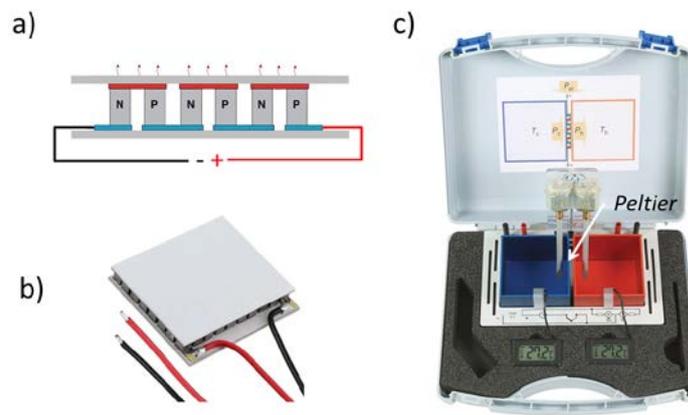


Imagen 6. a) esquema de uniones Peltier, b) Célula Peltier comercial, c) Kit educativo para observar el funcionamiento de una bomba de calor Peltier. Dos cubetas están unidas a las dos caras de una célula Peltier. La temperatura de una de las celdas disminuye mientras la opuesta se calienta. Sistema comercial de 3B Scientific.

CURIOSIDAD: Las pequeñas neveras portátiles que se conectan al sistema eléctrico del coche, enfrían mediante células Peltier. Se debe de tener especial cuidado en no dejar el contacto del vehículo encendido con el motor parado, dado que estas celdas consumen varios amperios en corriente continua.

5 Conclusiones

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto que al calentar uniones bimetálicas se produce un potencial eléctrico espontáneo. A este fenómeno de convertir calor en potencial eléctrico se le conoce como Efecto Seebeck y es aprovechado para el desarrollo de sensores eléctricos de temperatura, comúnmente denominados termopares. Los termopares se encuentran en prácticamente todos los electrodomésticos conocidos, en hornos industriales, sistemas de climatización y en todos aquellos lugares donde sea necesario medir y controlar la temperatura. Además de la explicación teórica, se ha propuesto una sencilla configuración experimental para poner a prueba el fenómeno Seebeck. Utilizando alambres de diferentes metales es posible desarrollar un sencillo termopar. Además, te proponemos experimentar con termopilas, dispositivos generadores de energía renovable y limpia. Finalmente, se describe el efecto Peltier, por el que se fabrican pequeñas bombas de frío-calor que podrás incluir en pequeños espacios donde se requiera calefacción o refrigeración inteligente.



6 Bibliografía

[1] <https://riunet.upv.es/handle/10251/145265>

[2] https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_termoel%C3%A9ctrico

[3] Introduction to Thermoelectricity. H. Julian Goldsmid. Springer Series in Materials Science book ,SSMATERIALS, volume 121. 2010. DOI 10.1007/978-3-642-00716-3