

Termoelectricidad: Caracterización de una celda Peltier

André Donadón, Alan Rapoport, Ezequiel Mondino

Laboratorio 4, Departamento de Física, FCEyN, UBA

2 de marzo de 2017

Resumen

En el presente trabajo se buscó obtener distintos parámetros de un dispositivo termoelectrico. El dispositivo utilizado fue una celda Peltier. En primer lugar, se observó la influencia del efecto Joule en función de la corriente eléctrica circulante. Por otra parte, se obtuvo el valor del coeficiente de Seebeck α , que resultó ser $(9822 \pm 8) \times 10^{-6} \text{ V K}^{-1}$. La resistencia de la celda mostró un comportamiento lineal y creciente en función de la diferencia de temperatura entre las placas. La conductividad entre las placas fue $\lambda = (0,86 \pm 0,14) \text{ W/(mK)}$. Por último, se midió la eficiencia de la celda como máquina frigorífica, resultando ser muy baja, con un valor del 0,65 % respecto de la máxima eficiencia posible.

I Introducción

Se definen como *efectos termoelectricos* a aquellos donde se encuentra involucrada una interacción entre fenómenos eléctricos y termodinámicos. Existen tres de ellos que son ampliamente conocidos. Uno de ellos, el *efecto Joule*, está asociado al calentamiento de un material cuando circula una corriente a través de él. La relación entre las magnitudes es

$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R, \quad (1)$$

donde Q es el calor, I es la corriente circulante y R la resistencia eléctrica del material.

Los otros dos son el *efecto Seebeck* y *efecto Peltier*. El primero consiste en la creación de una fuerza electromotriz \mathcal{E} como consecuencia de la unión de dos tipos distintos de conductores a diferentes temperaturas. Por ende, cuando ambos conductores forman un circuito se genera una corriente continua (figura 1). Se define el

coeficiente de Seebeck α_{AB} del siguiente modo:

$$\alpha_{AB} = \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial T}. \quad (2)$$

Este coeficiente dependerá de las características de los metales en cuestión A y B .

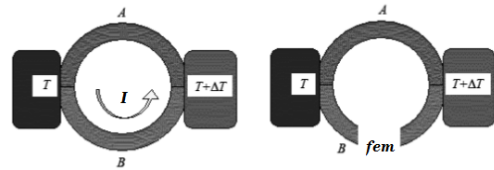


Figura 1 – Ilustración del efecto Seebeck con circuito abierto y cerrado

Por otro lado, el segundo efecto es la contraparte del primero; es decir, si se hace circular una corriente por un circuito formado por dos tipos distintos de conductores, se genera una

diferencia de temperatura entre las uniones. La potencia intercambiada esta dada por

$$\frac{dQ}{dt} = \Pi_{AB} I \quad (3)$$

donde Π_{AB} es el coeficiente de Peltier, el cual se relaciona con el coeficiente de Seebeck del siguiente modo:

$$\Pi_{AB} = \Delta T \alpha_{AB} \quad (4)$$

Notar que esta relación es valida solo cuando el coeficiente de Seebeck es independiente de la temperatura.

Estos efectos no sólo suceden para el caso de conductores, sino que también se puede reproducir para junturas de semiconductores que poseen un distintos grado de dopaje, formando lo que se conoce como *celdas Peltier*. Su composición se basa en un arreglo de semiconductores dopados, de tipo P y tipo N, conectados en serie mediante conductores de cobre. Sobre cada lado de este arreglo se encuentran capas de material cerámico, que para nuestra experiencia (celda Peltier Marlow DT3-6) estaba compuesto de óxido de aluminio (Al_2O_3). La figura 2 muestra esquemáticamente la composición de una celda Peltier tradicional.



Figura 2 – Esquema de una celda Peltier.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar una de estas celdas, es decir, obtener α_{AB} , su resistencia R , su conductividad térmica λ y su eficiencia como máquina frigorífica η .

II Régimen transitorio. Obtención de la resistencia y coeficiente de Seebeck

Para alimentar la celda con una corriente constante se empleó una fuente de corriente GW GPR-3060D, mientras que para monitorear la temperatura de cada cara se utilizaron dos sensores LM-35, ambos conectados a una fuente de tensión continua LG GP-4303D a 10 V. Los datos de la tensión en los extremos de la celda y de los LM-35 fueron tomados por un multiplexor Agilent, y adquiridos a la PC utilizando el software Matlab.

A Mediciones de la temperatura de las placas

En primer lugar, se buscó observar la evolución de la temperatura de las placas de la celda para una corriente de alimentación constante. Se encontró que, para corrientes del orden de 1 A, la celda fría siempre disminuye la temperatura, mientras que la caliente siempre la aumenta, hasta llegar a un estado estacionario. Sin embargo, para 2 A, la placa fría alcanza un mínimo de temperatura y luego comienza a aumentar, mientras que la caliente siempre tiene una tasa de crecimiento positiva. Esto se debe a que, como la potencia por efecto Joule depende del cuadrado de la corriente, al aumentar I este efecto térmico tiene una participación notable comparado con el aporte del efecto Peltier, provocando que ambas placas de la celda comiencen a calentarse. Las figuras 3 y 4 muestran estas evoluciones.

Esta experiencia también se llevó a cabo para corriente mayores a 2 A, mostrando comportamientos similares. Es decir, se obtuvo un mínimo de temperatura en la placa fría, mientras que la caliente siempre aumentó. Además, se observó que a tiempos suficientemente largos, la diferencia de temperatura entre las placas permanecía constante.

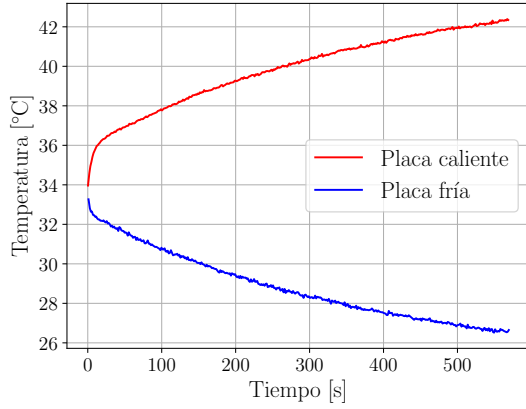


Figura 3 – Temperatura de cada placa de la celda en función del tiempo para una corriente de 1 A.

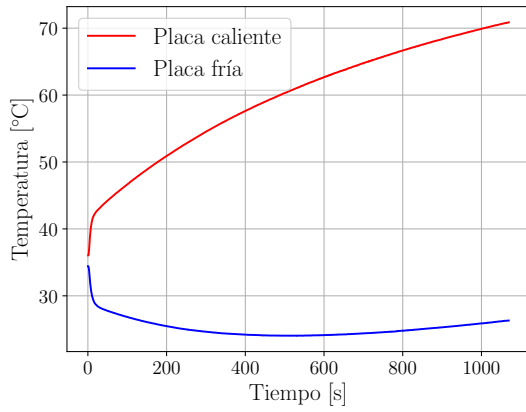


Figura 4 – Temperatura de cada placa de la celda en función del tiempo para una corriente de 1 A.

B Resistencia

Conocida la tensión en los extremos de la celda y dividiéndola por la corriente circulante puede obtenerse la resistencia R que presenta. A partir de las mediciones de la sección anterior se obtuvo la resistencia de la celda en función de la diferencia de temperatura entre las placas para una corriente de 2 A. Los resultados se exponen en la figura 5.

Puede observarse que, salvo para pequeñas diferencias de temperatura, la variación de R es lineal. Realizando un ajuste mediante el método de máxima verosimilitud se obtuvo una pendiente de $(566 \pm 1) \times 10^{-5} \Omega K^{-1}$.

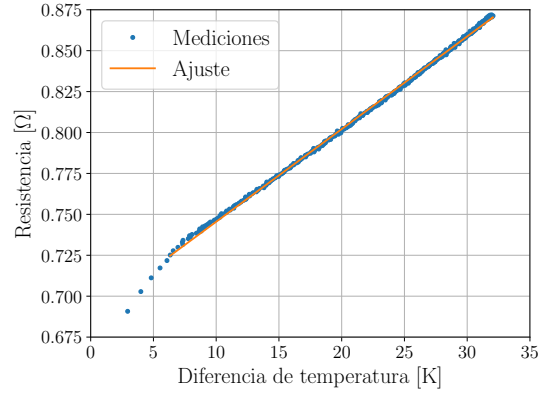


Figura 5 – Resistencia de la celda en función de la diferencia de temperatura entre las placas para una corriente de 2 A. Se observa un crecimiento lineal a partir de $\Delta T = 8^\circ C$, con una pendiente de $(566 \pm 1) \times 10^{-5} \Omega K^{-1}$.

C Coeficiente de Seebeck

Si se alimenta la celda con una corriente determinada hasta que sus placas alcancen una cierta diferencia de temperatura y luego se apaga la corriente, debido al efecto Seebeck se generará una diferencia de potencial entre sus placas, que irá variando a medida que su temperatura evoluciona hacia la del ambiente. Podemos entonces obtener el coeficiente de Seebeck α_{AB} a partir de la relación $\mathcal{E} = \alpha_{AB} \Delta T$ (suponiendo α_{AB} constante).

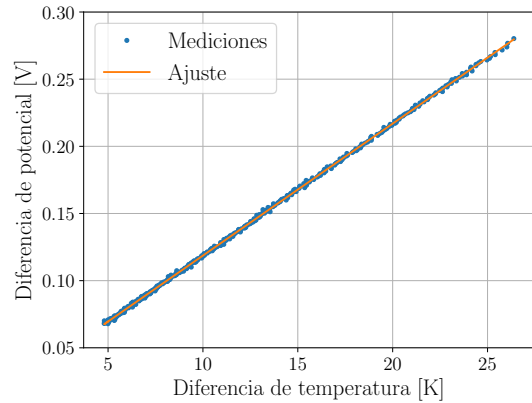


Figura 6 – Tensión entre las placas en función de la diferencia de temperatura para una corriente nula. Se observa una relación lineal creciente, con una pendiente de $(9822 \pm 8) \times 10^{-6} V K^{-1}$.

En la figura 6 se puede observar dicha relación. Se verifica claramente que, para el intervalo de temperaturas de trabajo, α es, en buena aproximación, constante.

Mediante un ajuste de los datos, se obtuvo que la pendiente de la recta obtenida, correspondiente al valor de α , es de $(9822 \pm 8) \times 10^{-6} \text{ V K}^{-1}$.

III Conductividad térmica y eficiencia como máquina frigorífica

La figura 7 muestra las componentes de potencia que entran y salen de un dispositivo termoeléctrico con coeficiente de Seebeck α , cuando circula una corriente I a través de él, con una diferencia de temperatura entre las caras caliente y fría igual a ΔT . La potencia térmica que entra en el dispositivo por la cara fría es

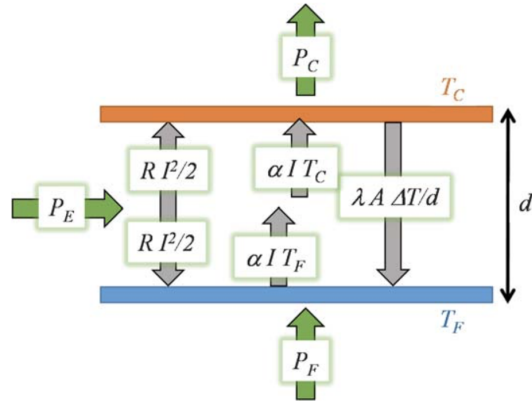


Figura 7 – Esquema de las potencias absorbidas y entregadas por cada placa de la celda.

$$P_F = \alpha I T_F - \frac{I^2 R}{2} - \frac{\lambda A}{d} \Delta T, \quad (5)$$

siendo λ el coeficiente de conductividad térmica, A el área de las caras y d la distancia de separación de las mismas.

Por otra parte, la potencia térmica que sale del dispositivo por la cara caliente está dada por

$$P_C = \alpha I T_F + \frac{I^2 R}{2} - \frac{\lambda A}{d} \Delta T. \quad (6)$$

De esta forma, una vez alcanzado el estado estacionario, la potencia eléctrica entrando en el dispositivo puede obtenerse como

$$P_E = VI = P_C - P_F = \alpha I T_F + I^2 R. \quad (7)$$

Luego, la eficiencia de un dispositivo termoeléctrico como enfriador puede definirse entonces como

$$\eta = \frac{P_F}{P_E} = \frac{\alpha I T_F - \frac{I^2 R}{2} - \frac{\lambda A}{d} \Delta T}{\alpha I T_F + I^2 R}. \quad (8)$$

A Experimento y medición

Para poder hallar λ y η , en primer lugar se buscó medir la potencia absorbida por la cara fría. Para ello, se colocó un frasco pequeño con agua en contacto con la placa, y se midió el tiempo Δt que tardaba el líquido entre el comienzo y el final de su congelamiento. Así, a partir de la relación

$$Q = mL \quad (9)$$

se obtuvo el calor Q entregado por la cara fría en el intervalo δt , siendo m la masa del agua y L el calor latente de fusión. De esta forma, la potencia absorbida es igual a

$$P_F = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{mL}{\Delta t}. \quad (10)$$

Las mediciones fueron realizadas con una corriente de 2 A, dado que ya se tenía caracterizado el comportamiento resistivo de la celda para esa corriente.

Para asegurarse de que la cara fría alcanzara una temperatura inferior a los 0°C de manera de ser capaz de congelar el agua, se colocó la cara caliente sobre un disipador, y éste en un baño de agua con hielo. Si bien la cara caliente no llegó a alcanzar los 0°C del agua, su temperatura disminuyó considerablemente, con lo cual la cara fría, para mantener la diferencia de temperaturas correspondiente al estado estacionario para $I = 2 \text{ A}$, disminuyó su temperatura por debajo de los 0°C , alcanzando los -15°C . A su vez, todo el sistema se colocó dentro de un recipiente de poliestireno expandido (Telgopor) con el fin de hacer descender la temperatura del

ambiente y lograr que la transferencia de calor entre el agua del frasco y el aire tuviese una menor influencia.

La temperatura de la placa caliente fue medida mediante un sensor LM-35, mientras que las temperaturas correspondientes a la placa fría y al agua en el frasco se monitorearon con termocuplas tipo K, cuyas tablas de relación entre la tensión entregada y temperatura sensada se pueden encontrar en las referencias [2].

B Temperatura del agua en función del tiempo

En la figura 8 puede apreciarse la temperatura del agua hielo en función del tiempo. En principio se esperaba obtener una curva decreciente hasta los 0 °C, luego una constante a esa temperatura (transición de fase agua-hielo) y luego nuevamente un decrecimiento de la temperatura del hielo, tal como predicen los modelos termodinámicos usuales [3]. Sin embargo, la evolución observada es sustancialmente distinta.

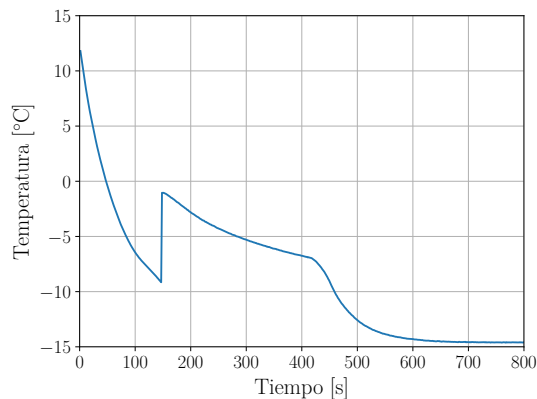


Figura 8 – Temperatura del agua-hielo en función del tiempo.

En un principio, la temperatura del agua descendiendo tal como se lo esperaba. Sin embargo, este descenso sigue por debajo de los 0 °C, hasta que en un momento ocurre un salto positivo hasta cerca de los 0 °C. Luego, un posterior decrecimiento paulatino, y a partir de cierto instante se produce un descenso más pronunciado.

La explicación más satisfactoria de este fenómeno es que se ha producido lo que se conoce

como *sobreenfriamiento del agua*. Este fenómeno se produce cuando el agua está libre de impurezas y el enfriamiento se realiza en ausencia de perturbaciones mecánicas. El agua se enfría a una temperatura inferior a los 0 °C sin sufrir transformación de fase, hasta que alguna inestabilidad provoca la formación del primer cristal de hielo, para que luego se genere un efecto en cadena y toda el agua se cristalice. En este caso, el agua pierde energía cinética a medida que baja su temperatura. Cuando se cristaliza, aumenta su energía cinética hasta alcanzar los 0 °C, a cambio de disminuir su energía potencial, provocando un ordenamiento de sus moléculas para comenzar a formar su estado sólido. Luego, el posterior decremento de energía sigue solidificándola, hasta llegar a convertirse totalmente en hielo. En ese momento, toda posterior pérdida de energía se traduce en un descenso de su temperatura.

Por lo recién mencionado, puede estimarse que el tiempo de congelamiento del agua comienza en el instante correspondiente a la intersección entre la curva de temperatura y la línea horizontal que pasa por el pico de la curva, momento de inicio de la cristalización. Por otra parte, el tiempo de finalización de la solidificación se estima en la región donde la pendiente de la curva aumenta considerablemente en módulo.

Sin embargo, caben destacar dos observaciones. La primera es que la región de solidificación no parece producirse exactamente a 0 °C, sino levemente por debajo. Esto probablemente se deba a la inexactitud de la termocupla (ya que si bien se midió el *offset* de la misma, las fluctuaciones que tenía eran grandes) y a que la termocupla inevitablemente estaba en contacto con el frasco, lo cual probablemente haya afectado a la medición. La segunda observación es que la región de solidificación no es constante, sino que hay un decrecimiento de la temperatura. De nuevo, es probable que esto se deba al contacto entre el vidrio y la termocupla y a la inhomogeneidad de la temperatura del agua.

Con todas las consideraciones mencionadas, se estima que el tiempo de congelamiento es $\Delta t = (363,6 \pm 1,4)s$, donde la incerteza asignada es el período con el que fue muestreada la temperatura.

C Conductividad térmica

Para hallar la conductividad térmica λ de la placa, basta con reemplazar los valores medidos de Δt y m (cuyo valor fue $(0,5275 \pm 0,0001)$ g, medido con balanza de precisión) para hallar P_F . Por otra parte, de la ecuación (5) se tiene que

$$\lambda = \left(\alpha I T_F - \frac{I^2 R}{2} - \frac{m L}{\Delta t} \right) \frac{d}{A} \frac{1}{\Delta T} \quad (11)$$

El valor de I (2 A) se lo midió con multímetro, mientras que las temperaturas de las placas caliente y fría se midieron con el LM-35 y con termocupla K, respectivamente. De esta forma, a partir de los resultados de la resistencia en función de ΔT para $I = 2$ A se obtuvo el valor de R .

Reemplazando todos los valores obtenidos con sus respectivos errores, se obtiene finalmente $\lambda = (0,86 \pm 0,14)$ W/(mK). Este valor es relativamente bajo, comparable con las conductividades térmicas de materiales como el ladrillo y el vidrio [1].

D Rendimiento

Ahora es inmediato calcular el rendimiento de la placa η . Basta con reemplazar los resultados obtenidos en la ecuación (8). Se obtuvo una eficiencia como máquina frigorífica de $\eta = 0,054 \pm 0,002$.

En el caso de que el dispositivo fuese una máquina frigorífica ideal (es decir, con $\lambda = 0$ y sin efecto Joule), se tendría

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (12)$$

En este caso, dado que $T_F = 258$ K y $T_C = 289$ K, se tiene $\eta_{\text{ideal}} = 8,3$. Por lo tanto, el dispositivo tiene una eficiencia del 0,65 % respecto de la máxima posible. Esto indica que no sería eficiente para tal uso.

IV Conclusiones

Resultó interesante observar el rol que juega el efecto Joule, provocando que a la hora de alimentar la celda con corrientes mayores a 2 A la placa fría alcance un mínimo de temperatura y luego comience a aumentar junto con la caliente.

Con respecto a los parámetros de la celda, cabe aclarar que su resistencia y eficiencia dependen de la corriente utilizada como alimentación, por tanto estos valores pueden diferir para otro valor de corriente.

Se observó que, cuando la diferencia de temperatura entre las placas es mayor a 8 °C, la resistencia conlleva una variación lineal y creciente con este ΔT .

Pudo verificarse que el coeficiente de Seebeck puede asumirse constante en el rango de temperatura en el que se trabajó.

Finalmente, la celda demostró tener una baja conductividad térmica, comparable con la del ladrillo o el vidrio. Sin embargo, a pesar de que su eficiencia como máquina frigorífica disminuye conforme aumenta λ , dicha eficiencia resultó ser muy baja.

Referencias

- [1] http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb03_conductividad.php.
- [2] ARIAN: *Tablas de termocuplas y Pt100*. <http://www.arian.cl/downloads/nt-003.pdf>, visitado el 26 de febrero de 2017.
- [3] Callen, H. B.: *Thermodynamics*. Wiley, 1970.