

Termoelectricidad

Laboratorio 4

Objetivos

- Estudiar el funcionamiento de una celda termoeléctrica.
- Caracterizar la celda y determinar sus parámetros relevantes.
- Analizar sus cualidades como máquina térmica y frigorífica.

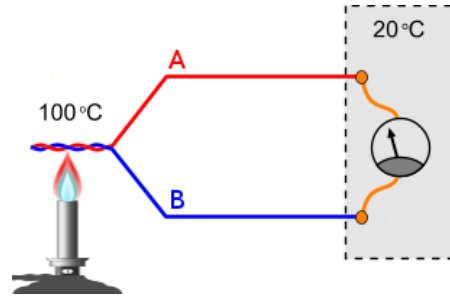


Figura 1: Termocupla formada por materiales A y B. La diferencia de temperatura entre los extremos genera una diferencia de potencial.

1. Introducción

La termoelectricidad comprende una serie de efectos en los que se observa una conexión entre la termodinámica y la electricidad. Dado que los portadores de carga dentro de un conductor se encuentran en equilibrio termodinámico, pueden transportar calor. Este acoplamiento entre el flujo de carga y de calor brinda la posibilidad de transformar energía mecánica en energía térmica y viceversa.

1.1. Efecto Seebeck

Cuando existe una diferencia de temperatura ΔT entre los extremos de un conductor, los portadores de carga difunden en contra del gradiente de temperatura. Esto produce acumulación de carga en el extremo frío y un vaciamiento del extremo caliente. El desequilibrio de portadores de carga crea un campo eléctrico, que a su vez origina una fuerza termo-electromotriz ϵ entre los extremos del conductor. La razón entre ϵ y ΔT depende de temperatura y recibe el nombre de *coeficiente Seebeck*

$$\alpha(T) = \frac{d\epsilon}{dT} \sim \pm 10^2 \mu\text{V/K}. \quad (1)$$

Si bien este efecto ocurre en *un* conductor, la fuerza termo-electromotriz se cancela en un circuito cerrado. Por este motivo, en la práctica se construyen circuitos formados por dos conductores distintos A y B conectados en serie (fig. 1). De esta manera, dado que las fuerzas termo-electromotrices de cada conductor son distintas, se obtiene una diferencia de potencial neta

$$\Delta V = \epsilon_A - \epsilon_B \approx \alpha_{AB} \Delta T, \quad (2)$$

con $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$.

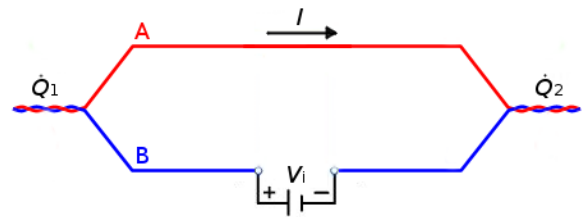


Figura 2: Circuito formado por materiales A y B con dos juntas. La circulación de corriente origina un transporte de calor.

1.2. Efecto Peltier

Al circular una corriente eléctrica I por una junta entre distintos materiales, se observa un efecto recíproco al efecto Seebeck. Esto es, se produce una transferencia neta de calor

$$\dot{Q} = \Pi_{AB} I, \quad (3)$$

donde Π_{AB} es llamado *coeficiente Peltier*. El sentido de la corriente determina el signo de \dot{Q} , es decir, que la junta se caliente o se enfríe.

En un circuito como el de la fig. 2 la corriente atraviesa dos juntas, pero lo hace en sentidos contrarios. Es decir, que remueve calor de una de las juntas y lo libera en la otra. La segunda ley de la termodinámica requiere que se cumpla la relación

$$0 \leq \dot{S} + \frac{\dot{Q}_1}{T_1} + \frac{\dot{Q}_2}{T_2}, \quad (4)$$

donde \dot{S} es la variación de entropía del sistema y $\dot{Q}_{1,2}$ es el calor entregado (= - absorbido) al medio

por las juntas a temperatura $T_{1,2}$. Es una buena aproximación práctica considerar reversibles a estos efectos, pudiendo quedarnos con la igualdad en (4). Así, despreciando la resistencia eléctrica y la conductividad térmica de los materiales A y B, en un estado estacionario ($\dot{S} = 0$), se obtiene por conservación de la energía

$$\alpha_{AB} T_i = \Pi_{AB}(T_i). \quad (5)$$

1.3. Irreversibilidad

Además de los efectos termoeléctricos, en un conductor real se deben considerar dos efectos irreversibles desde el punto de vista termodinámico: la difusión de calor a través del conductor, debido al gradiente de temperatura, y la disipación por efecto Joule. El flujo de calor que se transmite por conducción está dado por la ley de Fourier

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k \frac{A}{L} \Delta T, \quad (6)$$

donde A y L son el área de la sección transversal y la longitud de los conductores, k es su conductividad térmica, y ΔT , la diferencia de temperatura entre sus extremos. El signo negativo indica que el calor fluye en contra del gradiente de temperatura. Por otro lado, la disipación por efecto Joule es la transformación irreversible de trabajo eléctrico en calor, debido a la resistencia eléctrica R del circuito. La pérdida de energía asociada es

$$\dot{Q}_{\text{Joule}} = I^2 R = I^2 \rho L/A, \quad (7)$$

donde ρ es la resistividad eléctrica del conductor.

2. Celdas termoeléctricas

Las celdas termoeléctricas son dispositivos que funcionan como máquinas térmicas, aprovechando los efectos termoeléctricos. Las mismas constan de un gran número de termopares conectados en serie con las juntas ubicadas alternadamente sobre dos caras (fig. 3). De esta manera, si ambas caras se encuentran en contacto con reservorios a distintas temperaturas, pueden utilizarse como generadores eléctricos, de una tensión igual a la suma de las fuerzas termo-electromotrices de todos los termopares. Por otro lado, forzándoles una corriente, todas las juntas sobre una de las caras absorberán y las contrarias liberarán calor, operando como una máquina frigorífica o bomba calorimétrica.

A partir de las relaciones descriptas en la introducción y asumiendo que el calor generado por efecto Joule se distribuye equitativamente entre ambas

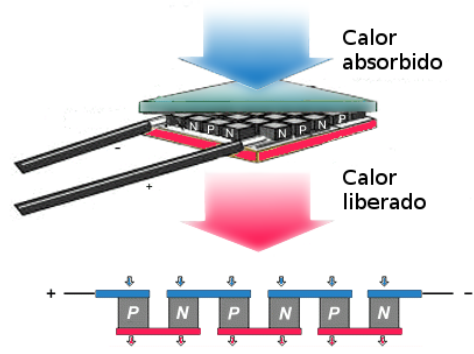


Figura 3: Esquema de una celda termoeléctrica formada por semiconductores tipo N y tipo P.

caras, se obtiene que el calor intercambiado en cada cara ($i, j = 1, 2; i \neq j$) de la celda en régimen estacionario es

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \pm I \alpha T_i - K (T_i - T_j) + \frac{I^2 R}{2} \\ &= C_i (T_i - T_{\text{amb}}), \end{aligned} \quad (8)$$

donde α y K contienen la contribución de todos los elementos conductores al efecto Peltier y a la difusión de calor, y C_i es un coeficiente asociado al intercambio de calor por convección con el entorno a temperatura T_{amb} . Del mismo modo, la potencia eléctrica aplicada vale

$$\dot{W} = V I = I \alpha \Delta T + I^2 R. \quad (9)$$

Utilizando las expresiones (8) y (9) pueden evaluarse la eficiencia como máquina térmica y el coeficiente de rendimiento como máquina frigorífica

$$\eta = \frac{-\dot{W}}{-\dot{Q}_c} \quad (10)$$

y

$$COP = \frac{-\dot{Q}_f}{+\dot{W}}, \quad (11)$$

donde \dot{Q}_c (\dot{Q}_f) es el calor intercambiado por la cara caliente (fría). Los signos se indicaron de manera explícita de acuerdo con la convención adoptada.

3. Guía de trabajo

A continuación se brindan algunas ideas disparadoras para iniciar los experimentos y discutir sus resultados. Los detalles, variantes y extensiones quedan a (buen) criterio de los experimentadores.

1. Adopte una convención de signos para las corrientes, tensiones, flujos de calor, etc. y determine el signo de α consistentemente.

2. Para caracterizar la celda deberá determinar los valores numéricos de α y R . Piense en qué condiciones pueden medirse independientemente. ¿Es una buena aproximación haberlos considerado independientes de la temperatura?
3. ¿Se le ocurre cómo determinar experimentalmente K y ambos C_i ? ¿Puede estimar sus valores a partir de la geometría y los materiales utilizados?
4. Estudie el funcionamiento de la celda como máquina térmica y como máquina frigorífica. ¿Qué puede decir de la eficiencia?

Referencias

- D. M. Rowe (Ed.). *CRC Handbook of Thermoelectrics*. CRC Press, 1995.
- L. D. Landau, E. M. Lifschitz. *Course of Theoretical Physics*, vol. 8: Electrodynamics of Continuous Media, §26. Pergamon Press, 1984.