

# Termoelectricidad

IGNACIO POGGI

ignaciop.3@gmail.com

CARLOS RÍOS CHÁVEZ

carlos\_rios\_ch@hotmail.com

Grupo 3 - Laboratorio 4, Cátedra Schmiegelow - Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

11 de marzo de 2019

## Resumen

En este trabajo se realizó la caracterización de una celda Peltier midiendo el coeficiente de Seebeck  $\alpha$ , resistencia  $R$  y conductividad térmica  $K$ ; a través de los datos obtenidos de la diferencia de temperatura, voltaje y corriente circundante entre sus dos caras. Finalmente se obtuvo el rendimiento de la celda y se comparó con el de otras máquinas térmicas.

## 1. Introducción

Se denomina termoelectricidad a un conjunto de efectos o fenómenos físicos que relacionan a la termodinámica con la electricidad. En equilibrio termodinámico, los portadores de carga en un conductor pueden generar un flujo de calor, pudiendo transformar energía mecánica en energía térmica y viceversa. Entre estos fenómenos, podemos destacar el efecto Seebeck, Peltier y Joule.

### 1.1. Efecto Seebeck

Si se tiene un circuito formado por dos metales distintos,  $A$  y  $B$ , con dos uniones a diferente temperatura,  $T$  y  $T + \Delta T$ , se establece un flujo de corriente eléctrica debido a que 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 del termopar. Este desbalance de portadores genera un campo eléctrico, que a su vez origina una fuerza termoelectromotriz  $\epsilon_{AB}$ , que depende de los metales utilizados en la unión y de la diferencia de temperatura entre las dos uniones.

Se puede definir al coeficiente Seebeck  $\alpha_{AB}$  como la relación entre  $\epsilon_{AB}$  y  $T$ , de la siguiente manera:

$$\alpha_{AB} = \frac{d\epsilon_{AB}}{dT} \quad (1)$$

La ecuación (1) puede definirse macroscópicamente como:

$$\alpha_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (2)$$

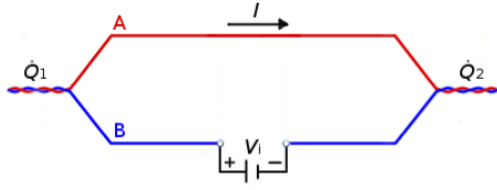
donde  $\Delta V$  y  $\Delta T$  son las diferencia de potencial neta y temperatura entre los metales  $A$  y  $B$ , respectivamente.

### 1.2. Efecto Peltier

Recíprocamente al efecto Seebeck, al circular una corriente eléctrica  $I$  por la unión entre distintos materiales, se produce una transferencia de calor, como se esquematiza en la Figura 1. La potencia calorífica intercambiada en la unión entre los puntos  $A$  y  $B$  es:

$$\dot{Q} = J\Delta T\alpha_{AB} = J\pi_{AB} \quad (3)$$

siendo  $\pi_{AB}$  el coeficiente Peltier (calor intercambiado en la unión por unidad de tiempo y de corriente que circula por la misma),  $J$  el flujo de corriente eléctrica,  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre los puntos  $A$  y  $B$ , y  $\alpha_{AB}$  el coeficiente Seebeck.



**Figura 1:** Esquema de un circuito formado por los materiales A y B con dos uniones. La circulación de corriente origina un flujo de calor, produciendo el efecto Peltier.

### 1.3. Efecto Joule

Para una caracterización completa de la celda, se deben tener en cuenta la difusión de calor a través de la misma debido al gradiente de temperatura, y la disipación por efecto Joule.

La difusión de calor del lado más caliente al frío por unidad de tiempo para cada elemento está dado por la ley de Fourier:

$$\dot{Q}_{Fourier} = -k \frac{A}{L} \Delta T \quad (4)$$

donde  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica de cada elemento por unidad de longitud,  $A$  el área,  $L$  la longitud de cada elemento y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura en los extremos (el signo negativo indica que el calor fluye en contra del gradiente de temperatura).

El efecto Joule está representado por la transformación de trabajo eléctrico en calor, debido a la resistencia  $R$  del circuito. La pérdida de energía asociada es:

$$\dot{Q}_{Joule} = I^2 R = I^2 \rho \frac{L}{A} \quad (5)$$

donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica del conductor respectivamente.

### 1.4. Celdas termoeléctricas

Una celda Peltier está compuesta por un cierto número de termopares (pares de semiconductores de tipo N y P), conectados en serie con las uniones ubicadas alternadamente sobre las dos caras. Dichas caras están recubiertas de un material cerámico, para mejorar

la disipación del calor, como muestra la Figura 2.



**Figura 2:** Esquema de una celda Peltier. Se observan los componentes semiconductores en el interior de la misma y las caras cerámicas a distinta temperatura.

Si ambas caras de la celda se encuentran en contacto con reservorios a distintas temperaturas, se manifiesta el efecto Seebeck, por lo tanto puede ser utilizada como generador de electricidad. Análogamente, al hacer pasar una corriente  $I$  por la misma, las uniones sobre una de las caras absorberán y las contrarias liberarán calor (efecto Peltier), operando como una máquina frigorífica o una fuente de calor.

Por último, para calcular el rendimiento de la celda como máquina térmica, utilizando las ecuaciones (3) y (5) se obtiene que el calor intercambiado en cada una de las caras (en régimen estacionario) es:

$$\dot{Q}_i = \pm I \alpha T_i - K(T_i - T_j) + \frac{I^2 R}{2} \quad (6)$$

donde  $\alpha$  y  $K$  contienen la contribución de todos los elementos conductores al efecto Peltier y a la difusión de calor, y  $i = \{1, 2\}$ . De la misma forma, la potencia eléctrica aplicada está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{W} = VI = I \alpha \Delta T + I^2 R \quad (7)$$

Mediante las ecuaciones (6) y (7), se puede obtener la eficiencia y el rendimiento de la celda como máquina térmica con las siguientes expresiones:

$$\eta = \frac{-\dot{W}}{-\dot{Q}_c} \quad (8)$$

$$COP = \frac{-\dot{Q}_f}{+\dot{W}} \quad (9)$$

siendo  $\dot{Q}_f$  y  $\dot{Q}_c$  el calor intercambiado por la cara fría y caliente, respectivamente.

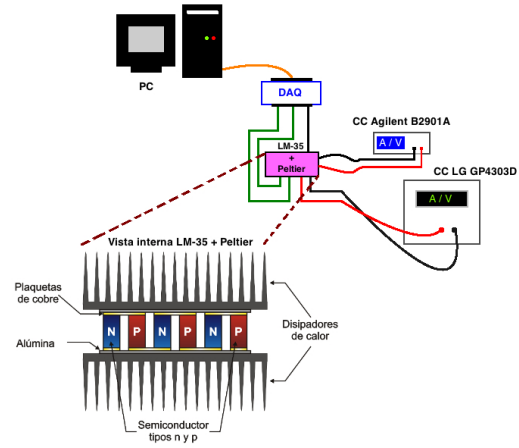
## 2. Dispositivo experimental

Los instrumentos de laboratorio utilizados fueron:

- PC con software MATLAB para la adquisición y análisis de los datos.
- Placa de adquisición de datos National Instruments NI-USB 6120.
- Celda Peltier Marlow Industries DT3-6.
- Dos sensores de temperatura LM-35.
- Generador de corriente continua LG GP4303D.
- Unidad de medición de corriente/voltaje Agilent B2901A.
- Cables Banana-Banana y Banana-Cocodrilo.

El armado experimental consistió en una celda Peltier; en cada una de sus caras se ubicaron dos sensores de temperatura LM-35, los cuales estaban dentro de un hueco en dos cubos de aluminio que actuaban como disipador de calor. La celda fue alimentada con el generador de corriente/voltaje, el cual también permitió la obtención del voltaje y corriente circulando por el circuito compuesto por la celda.

A su vez, se tomaron las mediciones de los sensores LM-35 a través de la placa de adquisición de datos hacia una PC; lo que permitió determinar la temperatura de cada sensor. La relación entre voltaje de salida y temperatura medida en cada uno de ellos es de 10 mV/°C, su rango de medición es de -55 °C (-550 mV) a 150 °C (1500 mV) y la precisión a temperatura ambiente es de 0,5 °C. En la siguiente figura se muestra un esquema del dispositivo utilizado:



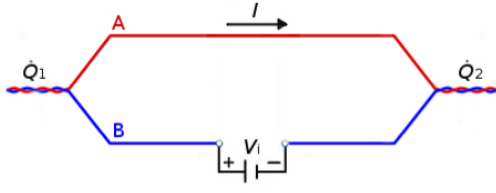
**Figura 3:** Esquema del dispositivo experimental utilizado. Se puede apreciar el esquema interno donde se encuentra ubicada la celda Peltier.

Los datos obtenidos en esta primera parte (voltaje, corriente y temperaturas) permitieron obtener el coeficiente de Seebeck  $\alpha$ , la resistencia  $R$ , el valor de corriente  $I_{máx}$  para el cual la celda llega al máximo rendimiento, y la conductividad térmica  $K$ .

Finalmente, para obtener la eficiencia y el rendimiento de la celda Peltier como máquina térmica, calculando la potencia entregada a la misma y la absorbida por la cara fría. La primera se obtuvo como la corriente circulante por la tensión entre las placas y para la segunda se colocó una muestra de agua, midiendo el cambio de temperatura en el tiempo de la misma.

## 3. Resultados y análisis

Para poder estimar la frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo, en primer lugar se utilizó el generador de funciones para realizar manualmente un barrido de frecuencias y el osciloscopio para poder visualizar la amplitud de la onda y obtener la campana de resonancia de dicho cristal, como muestra la siguiente figura:

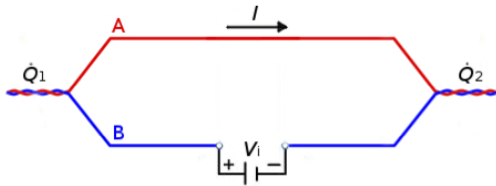


**Figura 4:** Campana de resonancia obtenida mediante un barrido de frecuencias manual con el osciloscopio.

Luego, se pudo calcular la frecuencia de resonancia y el ancho de la campana, dando como resultado  $\omega_r = (50108 \pm 7)$  Hz y  $\Delta\omega = (6,15 \pm 0,10)$  Hz respectivamente. Con estos datos, se obtuvo el factor de mérito del circuito,  $Q = 8147 \pm 70$ .

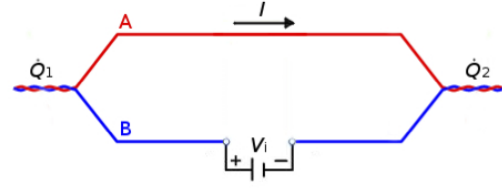
Además, se intentó calcular la frecuencia de antirresonancia utilizando este método; pero al aumentar la escala en el gráfico anterior en la zona correspondiente a dicha frecuencia ( $50,025 \text{ kHz} < \omega_a < 50,03 \text{ kHz}$ ), notamos que por la baja resolución del osciloscopio no se pudo obtener un valor confiable para  $\omega_a$ .

Posteriormente se analizaron los datos obtenidos por el amplificador lock-in. Se realizaron varios barridos de frecuencia con distintos niveles de resolución en la variación de la frecuencia, procurando que el barrido sea fino en los rangos que más nos interesaron, es decir cerca a la resonancia y la antirresonancia, previamente estimadas. Se trabajó con todas las mediciones en una sola base de datos y para determinar la frecuencia de resonancia se utilizaron tres métodos, el primero consistió en ajustar la curva de voltaje a una curva lorentziana, ajuste del cual se obtuvo que  $\omega_r = (50097,85 \pm 0,01)$  Hz (la bondad del ajuste fue  $R^2 = 0,992$ ), como muestra la Figura 5:

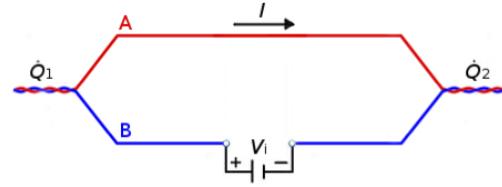


**Figura 5:** Ajuste a una función lorentziana del voltaje con respecto a la frecuencia.

El segundo método consistió en encontrar la frecuencia para la cual la transferencia de energía es máxima considerando que la transferencia es directamente proporcional al voltaje registrado, Figura 6. Se obtuvo que  $\omega_r = (50097,9 \pm 0,3)$  Hz y en el caso de la antirresonancia se determinó la frecuencia en la cual la transferencia de energía es mínima, obteniéndose que  $\omega_a = (50284,4 \pm 0,3)$  Hz, Figura 7.

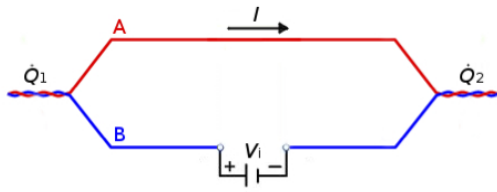


**Figura 6:** Detalle de la campana de resonancia, donde la línea punteada indica el voltaje máximo y la línea horizontal indica los puntos para los cuales el voltaje máximo se reduce a la mitad.

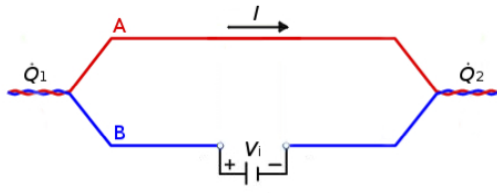


**Figura 7:** Detalle del intervalo donde se produce la antirresonancia indicada por la línea punteada.

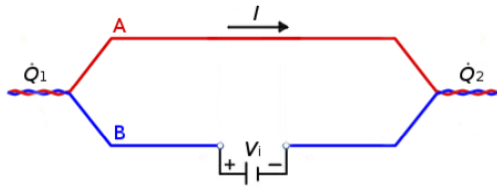
El último método que utilizamos consistió en analizar la fase en función de la frecuencia, considerando que cuando la fase llega a cero de forma descendente corresponde a la fase en la frecuencia de resonancia y que cuando la fase pasa por cero de forma ascendente es que corresponde a la frecuencia de antirresonancia. Se obtuvo que la frecuencia de resonancia es  $\omega_r = (50097,25 \pm 0,05)$  Hz y que  $\omega_a = (50284,65 \pm 0,05)$  Hz, en la Figura 8 se ve la curva completa mientras que en las Figuras 9 y 10 se ven en detalle los puntos donde la diferencia de fase pasa por cero.



**Figura 8:** Diferencia de fase entre la señal de entrada al piezoeléctrico y la señal de salida con respecto a la frecuencia.



**Figura 9:** Detalle de la diferencia de fase en el intervalo donde se produce la resonancia indicada por la línea punteada.



**Figura 10:** Detalle de la diferencia de fase en el intervalo donde se produce la antirresonancia indicada por la línea punteada.

Para obtener  $\Delta\omega$  se calcularon las frecuencias para las cuales la amplitud máxima se había reducido a la mitad, figura 6, eso nos dio una idea del ancho de la campana  $\Delta\omega = (5,90 \pm 0,01)$  Hz. Si comparamos el valor de la frecuencia de resonancia con el ancho de la campana obtenemos el factor de mérito, el cual cuanto más grande es, nos indica que más aguda es la campana y que por lo tanto el material es más útil como resonador en una frecuencia específica; en este caso se encontró que el factor de mérito es  $Q = 8491 \pm 5$ .

Los parámetros del circuito que modela el comportamiento del piezoeléctrico fueron determinados mediante las ecuaciones (??), (??), (??) y (??), obteniéndose que la resistencia es  $R = (13,65 \pm 0,09) \text{ K}\Omega$ , la inductividad  $L =$

$(3161 \pm 5) \text{ H}$ , la capacitancia es  $C = (0,126 \pm 0,004) \text{ pF}$ ; y que la capacitancia producida por la capa de oro que envuelve al piezoeléctrico es de  $C_2 = (16,9 \pm 0,5) \text{ pF}$ .

## 4. Conclusiones

Se puede observar que los distintos métodos para determinar la frecuencia de resonancia varían en décimas de Hz, por lo cual consideramos que la experiencia tuvo bastante precisión pues se trabajó con frecuencias del orden de los kHz; incluso en un primer barrido manual con el osciloscopio.

Sobre la frecuencia de antirresonancia pudimos notar que es preciso un instrumento lo bastante sensible como para poder determinarla, pues el barrido que se realizó con el osciloscopio registraba bastante ruido por lo que no se pudo trabajar con esos datos para determinar dicha frecuencia, mientras que con los datos obtenidos con el amplificador lock-in se pudo obtener un perfil de la curva de voltaje mucho más limpio en comparación al del osciloscopio y más aun tomando en cuenta el registro de la diferencia de fase que nos permitió el amplificador.

El alto factor de mérito que obtuvimos nos indica que la campana es bastante aguda, es decir que el ancho de la campana es pequeño en comparación a la altura; por lo cual concluimos que el ancho de banda en el cual resuena material piezoeléctrico es más estrecho, o visto de otra manera, posee una baja tasa de pérdida de energía en relación a la almacenada por el mismo.

## 5. Bibliografía

- [1] R. K. Nagle, E. B. Saff, A. D. Snider,  
*Ecuaciones diferenciales y problemas con  
valores en la frontera*, 4<sup>ta</sup> edición, Pearson  
Educación México, 2005, pág. 285
- [2] <http://materias.df.uba.ar/labo4Ba2016c1/files/2014/03/Piezo.pdf>