

# Caracterización de una Celda Peltier

Luciano Carullo Bedia  
luchibedia@gmail.com

Tadeo Rodríguez  
tadeorodriguez842@gmail.com

Joaquín Sequeira  
joaquinsetsequeira@gmail.com

Laboratorio 4, Cátedra Cobelli, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

4 de Junio, 2024

## Resumen

Los fenómenos termoeléctricos son aquellos que relacionan termodinámica con electricidad. En este trabajo se estudiaron estos fenómenos termoeléctricos, con foco en el efecto Seebeck, utilizando una placa Peltier. Se la caracterizó, obteniendo para la placa el coeficiente Seebeck  $\alpha = (-2,07 \pm 0,02) \text{ mV/K}$  y la resistencia  $R = (1,36 \pm 0,03) \Omega$ . Además se calculó la eficiencia de la placa Peltier como máquina térmica y máquina frigorífica en función de la diferencia de temperatura.

## 1. Introducción

Los materiales termoeléctricos son aquellos en los que diferencias de temperatura producen efectos eléctricos y viceversa. Esto está presente en todos los materiales, pero es despreciable para la mayoría. Los portadores de carga del material se encuentran en equilibrio termodinámico, pudiendo también transportar calor. Esto hace posible la conversión (en ambas direcciones) de energía eléctrica en energía térmica.

Cuando en los extremos de la unión de dos materiales distintos se produce una diferencia de temperatura, ocurre el efecto Seebeck. El gradiente de temperatura  $\Delta T$  hace que los portadores de cargas positivos vayan hacia el extremo frío y los negativos hacia el caliente. Esto genera una diferencia de carga, y por lo tanto una diferencia de potencial  $V$ . La misma está dada por [1]

$$V = \alpha \Delta T .$$

dónde  $\alpha$  es el denominado coeficiente Seebeck.

El efecto Peltier es complementario al efecto Seebeck. En este fenómeno se observa que a partir de una diferencia de potencial se genera una diferencia de temperatura. En particular, si se induce una corriente continua  $I$  el flujo de calor  $\dot{Q}$  entre dos materiales se describe mediante la ecuación [1]

$$\dot{Q} = \Pi I = \alpha T .$$

Aquí  $\Pi$  es el coeficiente Peltier y  $T$  la temperatura absoluta.

En los procesos termoeléctricos aparecen otros efectos irreversibles: la difusión de calor a través del material debido al gradiente de temperatura y la disipación de calor por efecto Joule. El flujo de calor transmitido por conducción  $\dot{Q}_{cond}$  está dado por

$$\dot{Q}_{cond} = -k \frac{A}{L} \Delta T = -K \Delta T ,$$

con  $A$  el área de la sección transversal,  $L$  la longitud de los conductores,  $k$  la conductividad térmica,  $K = k \frac{A}{L}$  y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre sus extremos. El flujo de calor disipado por efecto Joule es

$$\dot{Q}_J = I^2 R ,$$

donde  $I$  es la corriente y  $R$  la resistencia del material.

Las celdas termoeléctricas funcionan como máquinas térmicas o frigoríficas basándose en efectos termoeléctricos. En particular, las celdas Peltier están diseñadas de tal forma de que si se aplica corriente eléctrica, se genere en respuesta una diferencia de temperatura entre las caras. Además, si se pone cada cara en contacto con una fuente a distinta temperatura, se produce una diferencia de voltaje. Si se asume que el efecto Joule se divide en partes iguales entre las caras de la placa, el calor intercambiado en cada cara  $\dot{Q}_i$  (siendo  $i = c$  la cara caliente y  $i = f$  la cara fría) es

$$\dot{Q}_i = I \alpha T_i - K \Delta T + \frac{I^2 R}{2} .$$

Aquí  $T_i$  es la temperatura absoluta del lado de la placa correspondiente, y  $\Delta T = T_i - T_f$  (cambia de signo al cambiar de lado).

Al conectar la celda a una fuente de corriente continua, las contribuciones al voltaje entre las caras ( $V$ ) van a corresponder al efecto Seebeck y a la ley de Ohm:

$$V = \alpha\Delta T + IR. \quad (1)$$

Si se mira la potencia entregada a la placa, se tiene

$$\dot{W} = VI = I\alpha\Delta T + I^2R.$$

Aquí se pueden observar como los efectos que participan son el Seebeck y el Joule.

Usando la potencia entregada y disipada se puede calcular la eficiencia de la placa Peltier. Para su uso como máquina térmica

$$\eta_c = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_c} = \frac{VI}{I\alpha T_c - K\Delta T + \frac{I^2 R}{2}}. \quad (2)$$

Como máquina frigorífica,

$$\eta_f = -\frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}} = -\frac{I\alpha T_f + K\Delta T + \frac{I^2 R}{2}}{VI}. \quad (3)$$

En este trabajo se buscó caracterizar una placa Peltier, midiendo su coeficiente Seebeck, su resistencia y analizando su eficiencia. Esto requirió tener en cuenta los efectos termoeléctricos y los irreversibles.

## 2. Desarrollo experimental

Con el objetivo de caracterizar la placa Peltier, se armó el dispositivo experimental de la figura 1. Se utilizó una placa peltier TEC1-12706 con 40 mm de largo y ancho y 3,8 mm de alto. Se puso una placa Peltier sobre un dissipador y debajo de una placa de metal. Esta estructura fue fijada con tornillos. Para mejorar la conductividad térmica de la placa Peltier, se la untó con grasa siliconada. Para medir la diferencia de temperatura entre los lados de la placa Peltier, se conectó una termocupla de tipo K al dissipador y otra a la placa de metal. Cada lado estaba a su vez conectado a un multímetro de banco HP 34401A. Se conectó la placa Peltier a una fuente Agilent BS901A. También se utilizó un tercer multímetro para medir el voltaje sobre la placa. Se calibraron tanto los multímetros (figura 8) como las termocuplas (figura 9). El detalle se puede ver en el apéndice 5.1.

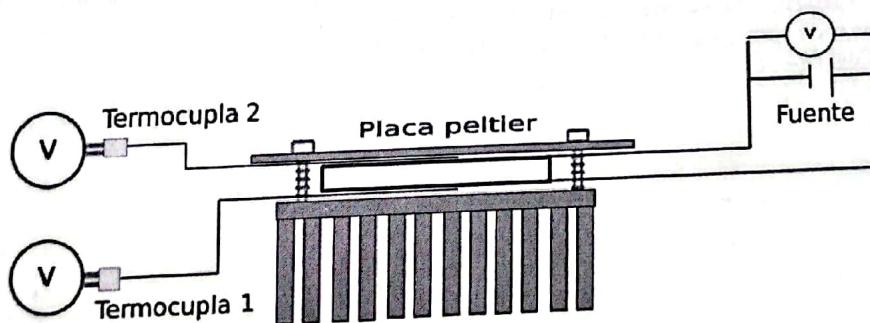


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental. La placa Peltier, representada como un rectángulo blanco, fue colocada entre un dissipador y una placa de metal. Se la fijó con dos tornillos. Se midió la temperatura en las caras superior e inferior con termocuplas conectadas a multímetros de banco. Se conectó la placa a una fuente de corriente continua, a su vez conectada en paralelo a otro multímetro para medir el voltaje sobre la celda.

Para observar el calentamiento y enfriamiento se realizó un barrido de corrientes de 0,0 A a 2,1 A, aumentando 0,3 A cada 100 s. No se tuvieron en cuenta los datos con corrientes mayores a 1,2 A porque presentaban demasiadas fluctuaciones. Esto se hizo para corrientes en ambos sentidos. A partir de lo observado en estas mediciones, se volvió a hacer el barrido, pero comenzando con corriente encendida en 0,3 A y apagando la fuente luego de enviar 1,2 A. Para cada valor de corriente no nula se midió durante 300 s, y para la corriente apagada, durante 500 s. Para estas últimas mediciones se trabajó solo con corrientes positivas.

Para analizar con precisión el efecto Seebeck, se midió mientras se enviaba una corriente de 1 A durante 1000 s. Luego se dejó enfriar y se volvió a calentar con una corriente de 1,2 A durante 100 s para luego medir el apagado durante 1000 s. Para trabajar con valores de temperatura absoluta, se utilizó un termómetro de mercurio, registrándose durante estas últimas mediciones una temperatura ambiente  $T_{amb} = (293,1 \pm 0,1)$  K.

### 3. Resultados y discusión

Los datos del enfriamiento y calentamiento de la placa Peltier se pueden ver en la figura 2. Según la convención de corrientes elegida, para corrientes positivas se enfriaba y para corrientes negativas se calentaba. A partir de esto se eligió la convención correspondiente al coeficiente Seebeck  $\alpha$  negativo. Al hacer aumentar la corriente inducida (cada 100 s) se produce un salto en la diferencia de temperatura, que luego sigue creciendo más lentamente. El tiempo que tarda en asentarse  $\Delta T$  es mayor mientras más intensa es la corriente.

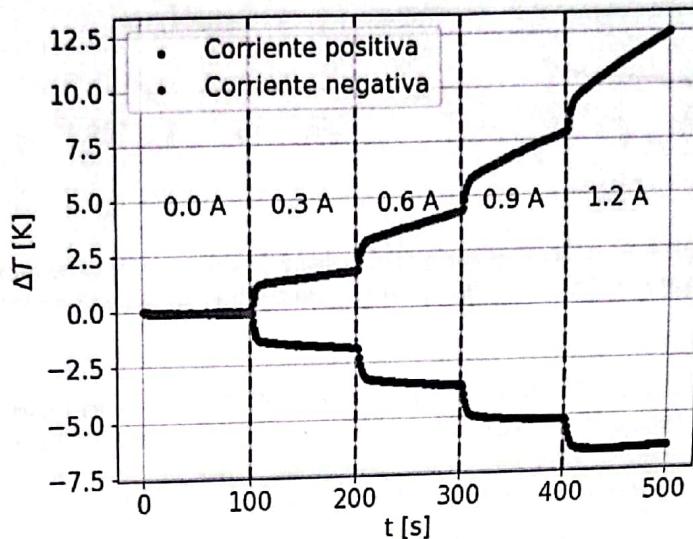


Figura 2: Diferencia de temperatura en función del tiempo para el calentamiento y enfriamiento de la placa Peltier al hacerle circular corriente. Se realizó un barrido de corrientes desde 0 A a 1,2 A, cambiando el valor cada 100 s.

Para obtener el coeficiente Seebeck se ajustó linealmente el voltaje  $V$  en función de la diferencia de temperatura  $\Delta T$  según la ecuación 1. Se analizaron los datos con corriente de 1 A encendida (figura 3) y para corriente apagada (figura 4). Del ajuste con corriente encendida también se obtuvo el valor de la resistencia de la placa. Para esto se tuvo que determinar el rango en el que valía la linealidad entre las dos variables. La determinación se puede ver en la figura 10 (corriente encendida) y en la figura 11 (corriente apagada). Esto está explicado en el apéndice 5.2. Para la corriente encendida, se obtuvo un rango lineal entre  $-3,95 \text{ K}$  y  $-3,05 \text{ K}$ . Para la corriente apagada, entre  $-1,85 \text{ K}$  y  $-1,13 \text{ K}$ .

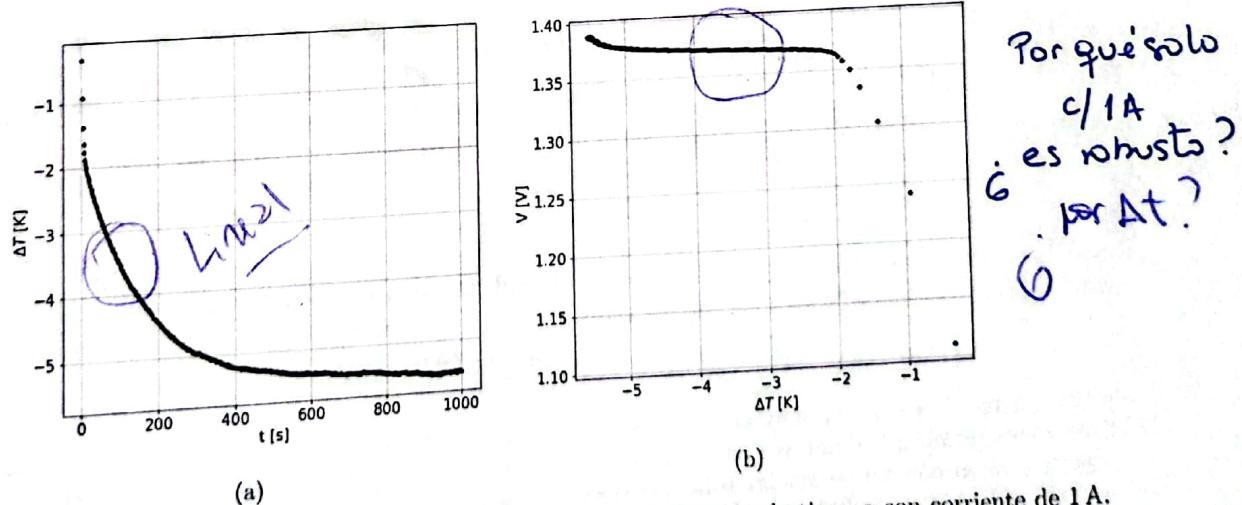


Figura 3: (a) Diferencia de temperatura entre los lados de la placa en función de tiempo con corriente de 1 A. (b) Voltaje sobre la placa en función de la diferencia de temperatura en todo el rango medido. De estos datos se extrajo el rango lineal.

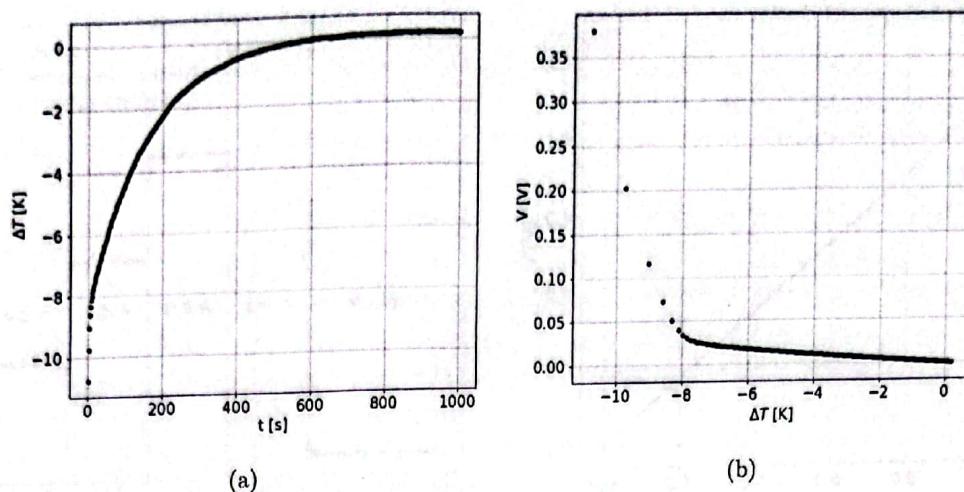


Figura 4: (a) Diferencia de temperatura entre los lados de la placa en función de tiempo con corriente apagada. (b) Voltaje sobre la placa en función de la diferencia de temperatura en todo el rango medido. De estos datos se extrajo el rango lineal.

Los datos y ajustes están en la figura 5. Para la corriente encendida (figura 5 (a)) se obtuvo un  $\chi^2/\nu = 0,4$ , indicando que los errores estaban sobreestimados. Además, el p-valor fue de 0,99998, por lo que no se puede rechazar la hipótesis de que el modelo ajusta los datos. Para el coeficiente Seebeck, se obtuvo  $\alpha = (-2,07 \pm 0,02) \text{ mV/K}$ . Para medir la resistencia, se usó la ordenada del origen y se la dividió por la corriente de 1 A según la ecuación 1, llegando a  $R = (1,36 \pm 0,03) \Omega$ . Para la corriente apagada (figura 5 (b)) se obtuvo un  $\chi^2/\nu = 28,8$ , y el p-valor fue de 0. A partir de esto último se puede rechazar la hipótesis de que el modelo ajusta los datos. Se observan fluctuaciones alrededor de la recta. Se puede considerar que también estaban presentes con la corriente encendida, pero al trabajar en voltajes mucho más bajos su peso pasaba a ser mayor. El coeficiente Seebeck resultó  $\alpha = (-2,71 \pm 0,02) \text{ mV/K}$ . No se pudo medir la resistencia para estos datos ya que la corriente (y por lo tanto también la ordenada del origen) era nula.

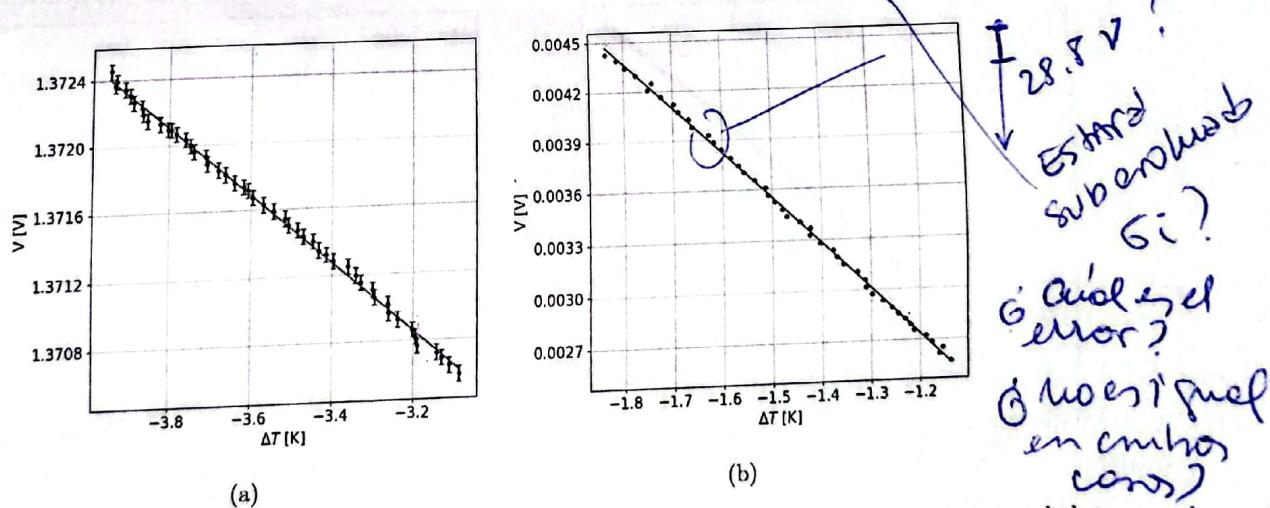
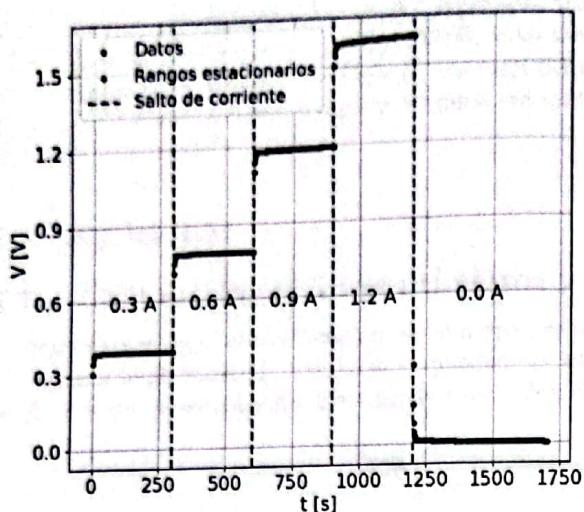
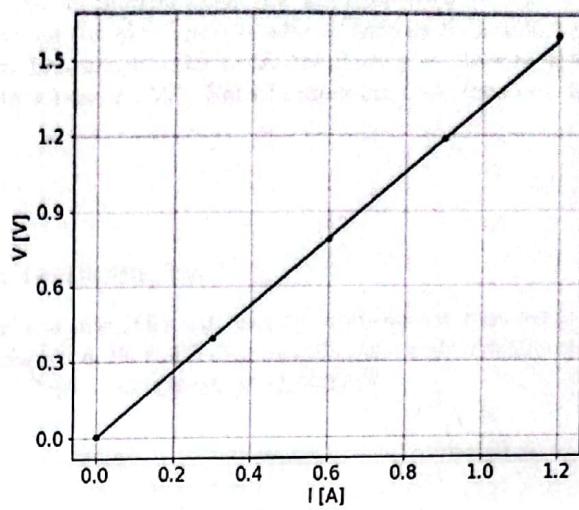


Figura 5: Voltaje sobre la placa Peltier ajustado en función de la diferencia de temperatura entre sus lados para: (a) Corriente de 1 A, se obtuvo  $\chi^2/\nu = 0,4$ ,  $\alpha = (-2,07 \pm 0,02) \text{ mV/K}$  y  $R = (1,36 \pm 0,03) \Omega$ . (b) Corriente apagada, se obtuvo  $\chi^2/\nu = 28,8$  y  $\alpha = (-2,71 \pm 0,02) \text{ mV/K}$ .

Para medir la resistencia de la placa con otro método, se buscó usar la ecuación 1 con  $I$  como variable independiente. Se usaron los datos del barrido de corrientes de la figura 6 (a) y se tomó el promedio del voltaje en el rango estacionario, donde pasaba a ser constante. Se ajustaron estos valores en función de la corriente, como se puede ver en la figura 6 (b). Este ajuste se basa en la aproximación de  $\Delta T = \text{cte}$  para las distintas corrientes. Si bien esto no ocurre, las variaciones que genera en el voltaje son más de un orden de magnitud menores a la contribución del término  $IR$ . Teniéndolo en cuenta, se obtuvo  $\chi^2/\nu = 12,9$ , y el p-valor fue de 0. Para la resistencia, se llegó a  $R = (1,31 \pm 0,02) \Omega$ . Este valor no presenta diferencias significativas con el obtenido en el método anterior.



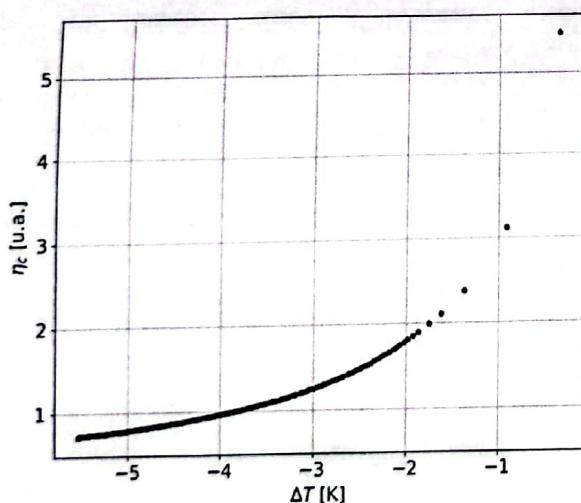
(a)



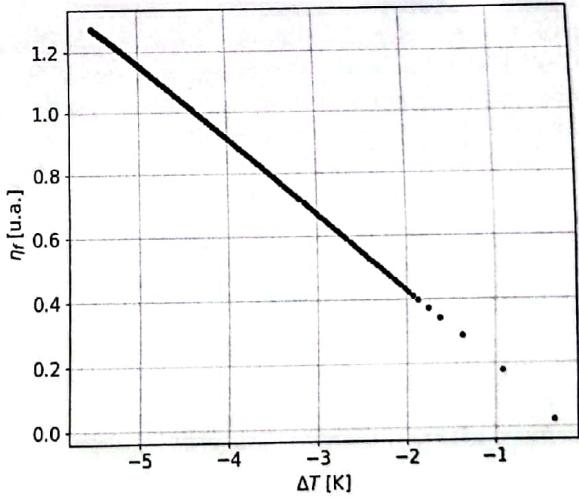
(b)

Figura 6: (a) Voltaje sobre la placa Peltier en función del tiempo para un barrido de corrientes de 0,0 A a 1,2 A. En rojo los rangos tomados como estacionarios para el voltaje. (b) Voltaje sobre la placa Peltier ajustado linealmente en función de la corriente enviada desde la fuente, con  $\frac{\Delta^2}{\nu} = 12,9$  y  $R = (1,31 \pm 0,02) \Omega$ .

Para calcular la eficiencia de la placa Peltier se utilizó el valor de la conductividad térmica  $k = 0,8 \text{ W/Km}$  [1] (tomando el obtenido en la referencia y dividiendo por el tamaño según las especificaciones). Pasando a la placa utilizada en el experimento,  $K = 0,337 \text{ W/K}$ . Se usaron los datos de la figura 3, tomando los valores obtenidos para  $\alpha$  y  $R$ . Para la máquina térmica, la eficiencia  $\eta_c$  según la ecuación 2 se puede ver en la figura 7 (a). Para la máquina frigorífica, la eficiencia  $\eta_f$  está dada por la ecuación 3 y los datos se muestran en la figura 7 (b). La máquina térmica funciona mejor para menores diferencias de temperatura, y la frigorífica para mayores.



(a)



(b)

Figura 7: (a) Eficiencia de la placa Peltier como máquina térmica en función de la diferencia de temperatura entre los lados. (b) Eficiencia de la placa Peltier como máquina frigorífica en función de la diferencia de temperatura entre los lados.

#### 4. Conclusiones

Se pudo caracterizar correctamente la placa Peltier, obteniendo con los datos de corriente encendida  $\alpha = (-2,07 \pm 0,02) \text{ mV/K}$  y  $R = (1,36 \pm 0,03) \Omega$ . Para la corriente apagada, los datos presentaron fluctuaciones que perturbaban la linealidad, resultando en un ajuste no bondadoso. Con esos datos se obtuvo  $\alpha = (-2,71 \pm 0,02) \text{ mV/K}$ , presentando diferencias significativas con el resultado anterior. Al analizar el voltaje como función

de la corriente, la aproximación de  $\Delta T$  constante resultó en un modelo lineal que no ajustaba a los datos. De todas formas, se llegó a  $R = (1,31 \pm 0,02) \Omega$ , valor coincidente con el del primer ajuste. Esto es atribuible a que la contribución del término de Seebeck era muy pequeña. Se tomó el valor de  $K$  tabulado y se observó que la eficiencia de la celda como máquina térmica era más alta a menor  $|\Delta T|$ . Para la máquina frigorífica, era más alta para mayor  $|\Delta T|$ .

## 5. Apéndice

### 5.1. Calibración de los multímetros y las termocuplas

Para caracterizar el ruido de los multímetros, se midió durante 150 s con los tres multímetros desconectados del sistema experimental. Los datos se pueden ver en la figura 8. Se tomó el promedio para cada multímetro y se obtuvo que presentaban offsets no despreciables, de  $-0,2 \text{ mV}$ ,  $-0,006 \text{ mV}$  y  $-0,002 \text{ mV}$ .

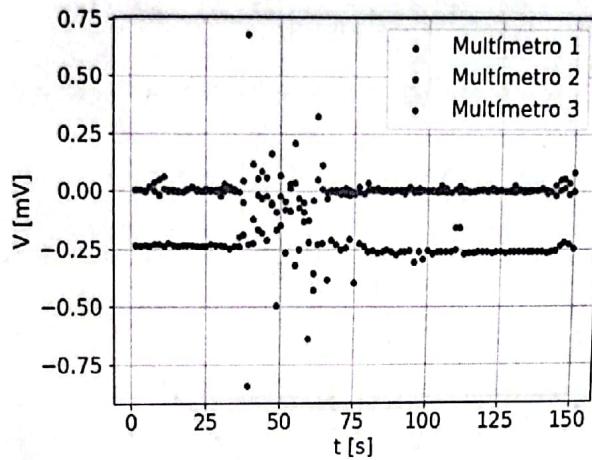


Figura 8: Datos de la calibración de los multímetros con la entrada desconectada.

Para calibrar las termocuplas, se pusieron las tres en el mismo punto y se midió durante 100 s. Teniendo en cuenta los offsets de cada multímetro, los datos se pueden ver en la figura 9. En este caso el objetivo era medir diferencias de temperatura, entonces no era necesario que se anulasen los tres valores, sino que fuesen iguales entre sí. A partir de esto, se tomó como referencia el valor de la segunda termocupla. Promediando las mediciones de cada una, se obtuvo una diferencia de  $0,4 \text{ mV}$  entre la primera y la segunda; y de  $0,3 \text{ mV}$  entre la tercera y la primera. Finalmente no se realizaron mediciones con una tercera termocupla.

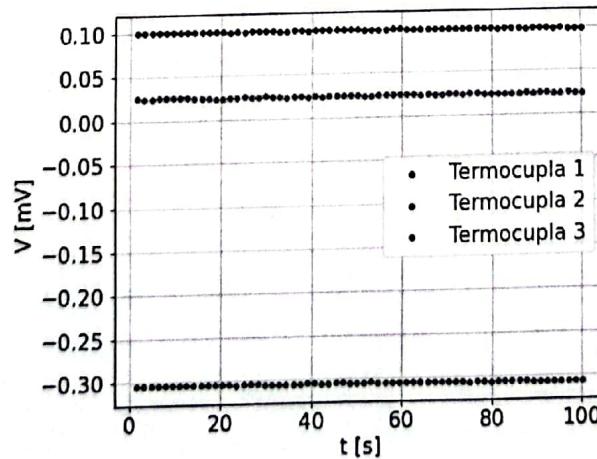


Figura 9: Datos de la calibración de las termocuplas midiendo en el mismo punto.

### 5.2. Cálculo del rango lineal del voltaje respecto a la diferencia de temperatura

Para definir el rango en el que el voltaje sobre la placa Peltier era lineal con la diferencia de temperatura entre sus lados se tomaron intervalos de distinta amplitud. Para los mismos se ajustó y se observó la linealidad

y el comportamiento de los residuos, llegando finalmente a los rangos de la figura 10 (corriente encendida) y de la figura 11 (corriente apagada). Se observa que los residuos son del mismo orden de magnitud, pero los datos con la corriente apagada son mucho menores que con la corriente encendida.

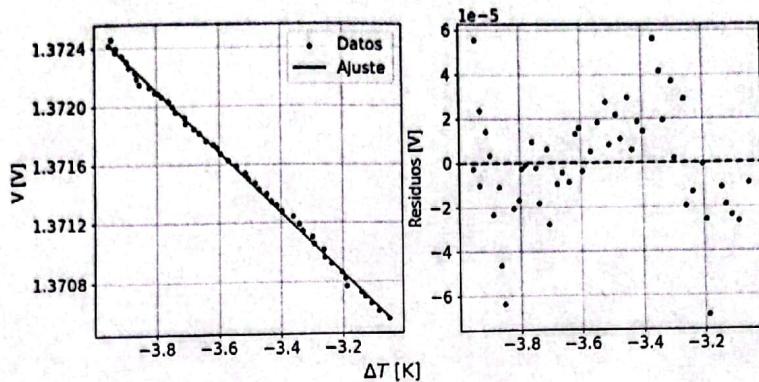
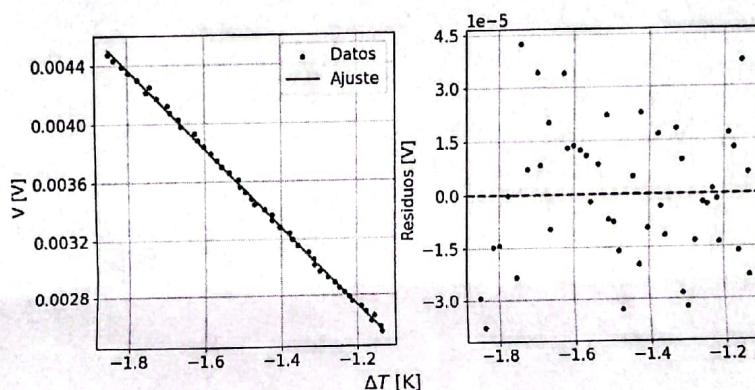


Figura 10: Ajuste y residuos del voltaje en función de la diferencia de temperatura para el rango lineal con la corriente encendida.

tiene  
estructura.  
El lust no es  
tipo Gaussiano.



Ajado de nubes  
yo a lo grande  
más por el 2º  
ajuste q' para  
primero.

Figura 11: Ajuste y residuos del voltaje en función de la diferencia de temperatura para el rango lineal con la corriente apagada. Se observa que los residuos son del mismo orden de magnitud que en el caso anterior, con datos mucho menores.

## Referencias

- [1] Yaakov Kraftmakher. «Simple experiments with a thermoelectric module». En: *European Journal of Physics* 26.6 (ago. de 2005), pág. 959.

$$\chi^2/V = 28.8 = \frac{\sum \frac{(y_i - y_f)^2}{\sigma_i^2}}{V}$$