

ESTUDIO DE UNA CELDA TERMOELÉCTRICA PELTIER A TRAVÉS DE LA CARACTERIZACIÓN DE TERMOCUPLAS TIPO K

Nicolás Arcuschin Moreno, Elian Urtubey, Carolina Kung¹

Informe N° 1

Grupo N° 8

Fecha: 15/02/2023

Laboratorio 4 - Verano 2023

Departamento de Física, FCEyN, UBA

Resumen

Las celdas termoeléctricas deben su funcionamiento en parte al efecto Seebeck, que abren la posibilidad de transformar energía mecánica en térmica y viceversa. Se calibró un par de termocuplas tipo K para medir la temperatura de las caras de una celda Peltier, respecto a la del ambiente. Además se estudió su tiempo de respuesta, que resultó menor al tiempo de muestreo del instrumental de medición utilizado. Luego, se estudió el comportamiento de una celda Peltier midiendo los voltajes y temperaturas en las dos caras de la celda a la vez que se hacían circular distintos valores de corriente. Con estas mediciones, se obtuvo el coeficiente de Seebeck de la celda en $(41,06 \pm 0,03) \mu V/K$. Finalmente, se buscó obtener la resistencia interna del circuito y se halló un valor de $R = (4,12 \pm 0,02) \Omega$ para temperaturas de entre $15^\circ C$ y $30^\circ C$ aproximadamente. Para temperaturas superiores se pierde linealidad pero sí se ve que la resistencia va en aumento. Además, se observó que la eficiencia de la placa es mayor al usarse como máquina frigorífica en lugar de térmica.

1. Introducción y objetivos

En equilibrio termodinámico, los portadores de carga de un material pueden transportar calor, lo cual permite transformar energía mecánica en térmica y viceversa. En particular en este trabajo se aprovechará el efecto Seebeck, que predice la existencia de una diferencia de voltaje entre dos puntas de un conductor que se encuentran a una diferencia de temperatura [1]. Esto genera una acumulación de cargas en el extremo frío y un vaciamiento de ellas en el extremo caliente que produce una fuerza termo-electromotriz ϵ entre los extremos del conductor. Se define entonces α el *coeficiente de Seebeck* como el cociente entre ϵ y la diferencia de temperatura ΔT :

$$\alpha(T) = \frac{d\epsilon}{dT}$$

En un circuito cerrado formado por un único conductor esta fuerza termo-electromotriz se cancela. Se considera entonces una juntura de dos cables compuestos por materiales A y B respectivamente en contacto con una fuente térmica. Luego, si los extremos de estos cables están a una temperatura diferente de la fuente, la diferencia de voltaje entre la punta del cable A y la punta del cable B está dada por:

$$\Delta V = \epsilon_A - \epsilon_B \approx \alpha_{AB} \Delta T \quad (1)$$

donde $\epsilon_{A,B}$ es la fuerza termo-electromotriz generada en cada material y $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$

Por otro lado, si los cables se unen en ambas puntas formando dos juntas, entonces, haciendo circular una corriente I por el circuito, se observa una transferencia de calor entre cada unión. La transferencia en cada juntura está dada por

$$\dot{Q} = \alpha_{AB} T I \quad (2)$$

donde T es la temperatura de la juntura. Notar que el signo de \dot{Q} está dado por la dirección de la corriente, por lo que si en una punta hay transferencia negativa la otra será positiva y viceversa.

1.1. Eficiencia y Rendimiento de circuito termoeléctrico

La potencia eléctrica aplicada sobre el circuito vale

$$\dot{W} = VI = I\alpha\Delta T + I^2 R \quad (3)$$

¹nicolas.arcuschin.00@gmail.com , elian.urtubey@gmail.com, carolinakung02@gmail.com

Se puede entonces calcular la eficiencia como máquina térmica y el coeficiente de rendimiento como máquina frigorífica utilizando Ec. (2) y Ec. (3):

$$\eta = \left| \frac{\dot{W}}{\dot{Q}} \right| \quad (4)$$

donde \dot{W} es la potencia eléctrica entregada al circuito y \dot{Q} es la transferencia de calor (positiva o negativa) generado por el circuito.

Para estudiar los fenómenos descritos, es posible utilizar celdas termoeléctricas, que son dispositivos que funcionan como máquinas térmicas, aprovechando los efectos termoeléctricos. Las mismas están formadas por termocuplas conectadas en serie con las juntas ubicadas alternadamente sobre dos caras. Forzándoles una corriente, todas las juntas sobre una de las caras absorberán y las contrarias liberarán calor, operando como una máquina térmica o frigorífica. [2]

En este trabajo se tendrá como objetivo estudiar la transformación de energía eléctrica en térmica a través del funcionamiento de una celda termoeléctrica de Peltier. Se buscará comparar su eficiencia como máquina térmica y como máquina frigorífica (Ec. (4)) y calcular su coeficiente de Seebeck (Ec. (1)). Para ello se calibrará en primer lugar una termocupla, midiendo la diferencia de potencial que se genera en sus bornes en función de la temperatura del sensor. Además, se estudiará su tiempo de respuesta, teniendo en cuenta la importancia de que sea menor a la frecuencia de muestreo para poder apreciar las variaciones de temperatura necesarias. Luego, pasando una corriente continua a través de la célula Peltier, se enfriará una de sus caras mientras la otra se la mantendrá a una temperatura constante. Cuando se haya estabilizado la temperatura de ambas caras, se apagará la corriente y se medirá la diferencia de temperatura y voltaje que se generó entre cada una. Posteriormente se hará el mismo proceso con la dirección inversa de corriente para calentar la cara que no está a temperatura constante. Con los datos medidos se hará una regresión lineal utilizando Ec. (1) y se obtendrá el coeficiente de Seebeck de la célula de Peltier utilizada. Finalmente, se medirá para distintos valores de corriente continua la caída de tensión sobre la célula al momento en el que esta y su temperatura se estabilizan en el tiempo. Calculando la diferencia de voltaje y temperatura en el estado estacionario se calculará con Ec. (2) y Ec. (3) la eficiencia y rendimiento de la célula Peltier.

²El cloruro de sodio disuelto en agua provoca un descenso del punto de congelación que experimenta una disolución.

2. Desarrollo experimental y análisis

2.1. Caracterización de la termocupla

Se calibraron dos termocuplas tipo K. Para ello se depositó su sensor en un recipiente aislante de telgopor con agua y se las conectó cada una a un multímetro HP 34401A. Dentro del recipiente, además, se introdujo un termómetro de mercurio de rango $[-10^{\circ}\text{C}; 80^{\circ}\text{C}]$ con una mínima división de $0,2^{\circ}\text{C}$. En paralelo se conectó una resistencia de platino a cuatro puntas (TRPT100 Clase B) a un multímetro de mismo modelo que medía la temperatura ambiente. La adquisición se realizó mediante un DAC conectado a una computadora. (Fig. 1)

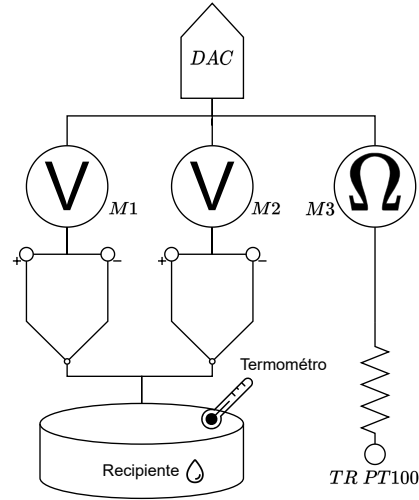


Figura 1: Diagrama experimental utilizado para calibrar las termocuplas (TC1 y TC2). Éstas se encontraban conectadas cada una a un multímetro AGILENT 34401A (M1 y M2). Se colocó el sensor de cada termocupla dentro de un recipiente de telgopor con agua que contenía el termómetro de mercurio. Paralelamente, se conectó una termorresistencia de platino (TR PT100) a cuatro puntas a un multímetro AGILENT 34401A (M3), midiendo la temperatura ambiente.

Las temperaturas de las termocuplas fueron calculadas interpolando linealmente los valores de voltaje y temperatura indicados en su *datasheet*. Luego se sumó el valor de la temperatura ambiente medida con la termorresistencia de platino, dado que en el *datasheet* la temperatura de referencia de las termocuplas era 0°C . La temperatura ambiente obtenida fue $(30 \pm 1)^{\circ}\text{C}$.

Se añadió hielo con sal al agua ² para bajar su temperatura y luego se agregaron medidas de agua caliente hasta obtener una temperatura de aproximadamente 70°C . Se registró el valor de voltaje dado por cada termocupla y la temperatura del termómetro antes de añadir cada medida de agua.

En segundo lugar, se estudió el tiempo de respuesta de una de las termocuplas calibradas. Para ello se conectó la termocupla a un multímetro HP 34401A y se utilizaron dos recipientes; uno con agua caliente (aproximadamente 60°C) y otro con agua fría (aproximadamente 15°C). Además se utilizó una resistencia de platino conectada a un multímetro AGILENT 34401A para medir la temperatura ambiente como en el setup experimental anterior (Fig. 1). Posteriormente se posicionó el sensor de la termocupla en uno de los recipientes y se adquirió la diferencia de voltaje medida en el multímetro con un sensor DAC conectado a una computadora (Fig. 2).

El tiempo de respuesta de la termocupla se midió moviendo el sensor entre el recipiente caliente y el frío, y viceversa, en intervalos fijos de tiempo mientras que se registraba la diferencia de potencial que se generaba. Se buscó que el voltaje medido se estabilizara previo a moverlo de recipiente.

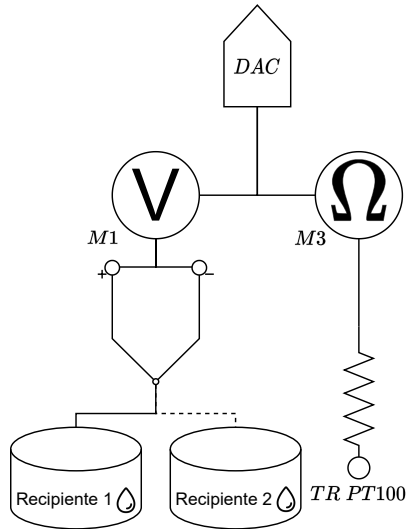


Figura 2: Digrma experimental utilizado para medir el tiempo de respuesta en una termocupla (TC1). Ésta se encontraba conectada a un multímetro HP 34401A (M1). A su vez, el sensor de la TC 1 se colocaba alternadamente entre el Recipiente 1, con agua caliente, y el Recipiente 2, con agua fría. Por otra parte se conectó una termorresistencia (TR PT100) conectada a un multímetro AGILENT 34401A (M3) que medía la temperatura ambiente en el laboratorio.

2.2. Resultados caracterización de la termocupla

Se midió la diferencia de voltaje obtenida de las termocuplas TC1 y TC2 a medida que se variaba la temperatura del agua en el recipiente. A su vez, se registró el valor de temperatura del agua que marcaba termómetro de mercurio (Fig. 3).

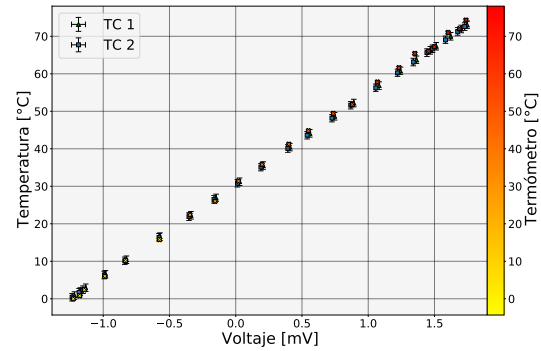


Figura 3: En verde y en azul, las mediciones de temperatura de la termocupla 1 y 2 respectivamente. En el gradiente de color, las temperaturas medidas con el termómetro de mercurio centradas en el valor de voltaje promedio de las termocuplas.

Se observa que los valores medidos por las termocuplas coinciden con los del termómetro de mercurio hasta alrededor de los 50°C. Luego, se va perdiendo la linealidad, ya que las termocuplas comienzan a tener una tendencia a medir por debajo de la temperatura del termómetro. Aunque el efecto es leve, puede ser relevante tenerlo en consideración a la hora de estudiar las mediciones tomadas por las termocuplas a temperaturas altas.

A continuación se midió la temperatura de una de las termocuplas utilizadas a medida que se la cambiaba de un recipiente con agua fría a un recipiente con agua caliente (Fig. 4). Se puede advertir que la termocupla no registra los valores intermedios de temperatura al cambiarla de recipiente por lo que el multímetro utilizado tarda mas en medir el voltaje de la termocupla que ésta en cambiar de temperatura. Esto significa que el tiempo de respuesta de la termocupla no será un problema al utilizarla con la celda Peltier ya que en cada medición de temperatura se tendrá siempre el valor de temperatura real de la termocupla y no una transición.

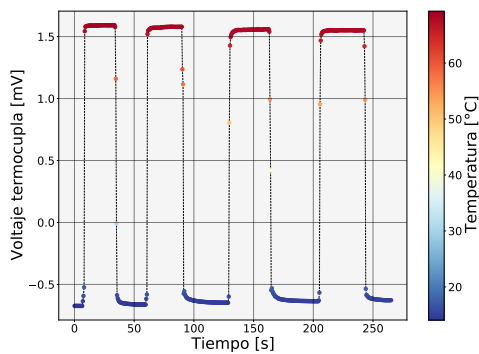


Figura 4: Valores de voltaje y su equivalente temperatura registrados por la termocupla TC 1 al cambiarla de un recipiente con agua fría ($\approx 15^\circ\text{C}$) a otro con agua caliente ($\approx 70^\circ\text{C}$). Se observa que el multímetro utilizado no alcanza a resolver los cambios bruscos de temperatura de la termocupla, por lo siempre se está midiendo la temperatura de la termocupla en un valor estable.

2.3. Estudio de celda termoeléctrica

Se estudió el funcionamiento de una celda Peltier TEC1-12706. Para ello, se pegó la celda Peltier con una pasta térmica de silicona sobre un soporte de aluminio diseñado para disipar calor y se colocó entre ellos (junto con el pegamento) una de dos termocuplas. Por encima de la celda Peltier se pegó una placa cuadrada también de aluminio con la misma pasta térmica, dejando del mismo modo la otra termocupla entre la celda y la placa. Por último, se atornilló la placa metálica superior al bloque colocado abajo con tornillos aislantes (para que no transmitan calor ni corriente) y se sumergió parcialmente el bloque de aluminio en un recipiente con agua para mejorar la disipación de calor. De este modo, la cara inferior de la celda Peltier estaba siempre a una temperatura cercana a la del agua, lo que significa que la diferencia de temperatura esperada se vería reflejada únicamente en la placa superior.

Luego se conectó la celda Peltier a un generador AGILENT B2901A. A su vez, las termocuplas (caracterizadas en la Sección 2.2) que estaban en contacto con las caras de la celda se conectaron cada una a un multímetro HP 34401A que medía su voltaje. Se adquirieron los datos del multímetro utilizando un DAC. Este sistema se esquematiza en la Figura 5.

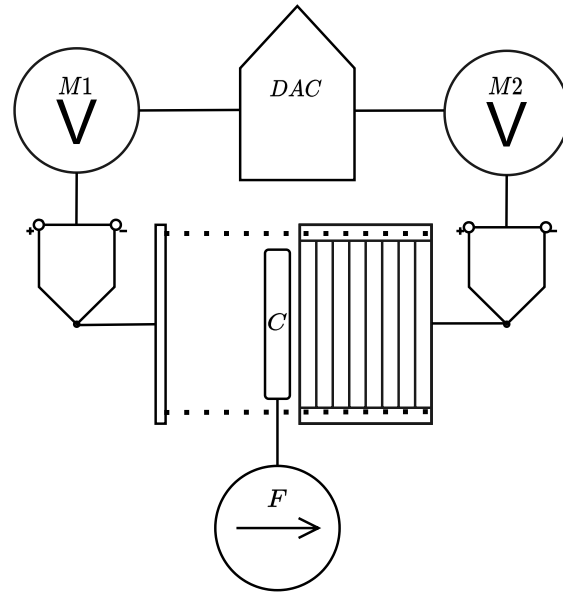


Figura 5: Diagrama experimental utilizado para obtener el rendimiento y la eficiencia de la celda Peltier. Se conecta una termocupla a una placa de aluminio (izq.) y otra a un bloque disipador de temperatura (der.). Entre ellas se posiciona la célula Peltier (C) la cual recibe corriente continua de una fuente AGILENT B2901A (F). Las puntas de ambas termocuplas están en contacto con una cara de la celda. Tanto la placa de aluminio como el bloque disipador se embadurnan con pasta térmica con el fin de hacer mas rápida la transferencia de calor. Además, la placa está atornillada al bloque con tornillos aislantes fijando la celda en su lugar. Las termocuplas a su vez se conectan, cada una, a un multímetro HP 34401A (M1 y M2) los cuales están conectados a un DAC que envía los datos por conexión GPIB a una computadora.

En primer lugar se le envió una corriente continua a la celda Peltier y se midió la diferencia de voltaje de las termocuplas en función del tiempo. En paralelo se obtuvo la diferencia de voltaje entre las placas en función del tiempo obtenida por el generador. Adicionalmente, un termómetro de mercurio permitía conocer el valor de la temperatura ambiente al momento de medir, que se encontraba aproximadamente entre 31.3°C y 32.1°C .

Se calentó la cara superior utilizando valores de corriente de 0.2 A, 0.5 A, 0.8 A, 1.1 A y 1.4 A. Una vez finalizada la última medición, la placa superior quedó a la temperatura máxima alcanzada (alrededor de 90°C) y se cortó la circulación de corriente (lo cual permite deshacerse de la disipación de calor debido a efectos óhmicos). De este modo, se tomó una medición del enfriamiento de la cara superior en función del tiempo.

Luego, se realizaron las mismas mediciones (para los mismos valores de corriente) intercambiando los cables que salían de la placa, es decir, haciendo circular la corriente en sentido opuesto: ahora la cara superior se enfriaba. Análogamente al caso anterior, una vez finalizada la última medición se registró el calentamiento de la cara superior (llegando hasta la temperatura ambiente) sin

circulación de corriente.

Es relevante mencionar que la temperatura que se medía con la termocupla en cada placa es la de una pequeña parte de su superficie. Para el modelo del análisis, se asumirá homogeneidad de temperatura sobre el total de la cara.

2.4. Resultados estudio de una célula termoeléctrica

Se graficó, representativamente, el voltaje de cada termocupla en función de del tiempo para una corriente de 500 mA, con una circulación tal que calentaba la cara superior (Fig. 6). Se distingue que el comportamiento de la celda es el esperado: la temperatura de la cara superior va en aumento (lo cual se aprecia en el aumento del voltaje medido por *TC1* hasta su estabilización cerca de los 0,4 mV) mientras que la de la cara inferior se mantiene estable (aunque presenta una leve disminución).

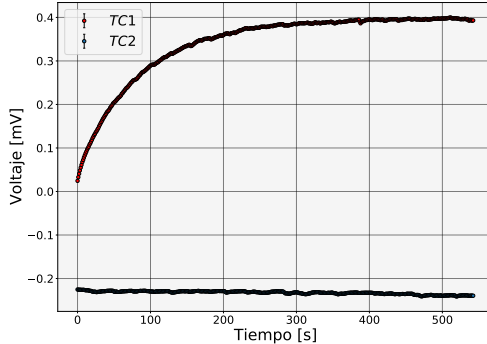


Figura 6: Voltaje en función del tiempo medido en ambas caras de la celda por las termocuplas Peltier donde circula una corriente de 500 mA, circulando de forma tal que la temperatura está en aumento en la cara superior. Esto se ve en el aumento del voltaje que mide la termocupla 1 (*TC1*), que se estabiliza alrededor de 0,4 mV. Por otro lado, la medición de voltaje de la termocupla 2 (*TC2*) en la cara inferior se mantiene estable, con una leve disminución a lo largo del tiempo.

Además, también representativamente, se graficó el calentamiento de la cara superior de la celda, partiendo de una temperatura menor a la del ambiente, sin circulación de corriente. Se observa que la diferencia de temperatura entre las termocuplas disminuye hasta estabilizar su voltaje en el mismo valor, la temperatura de equilibrio del sistema (Fig. 7).

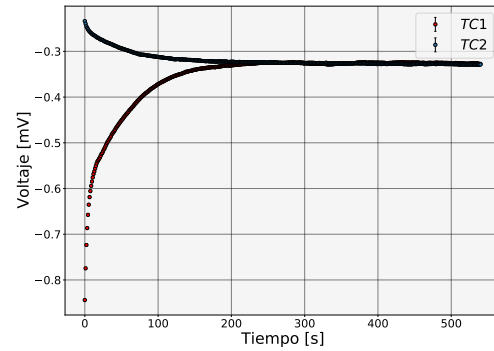
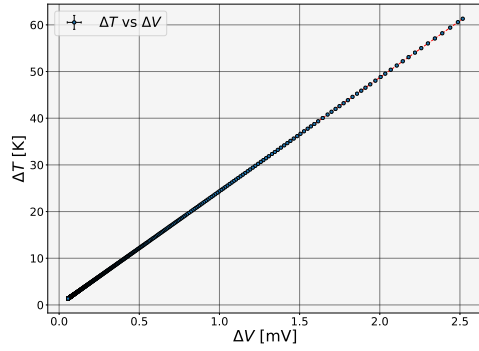
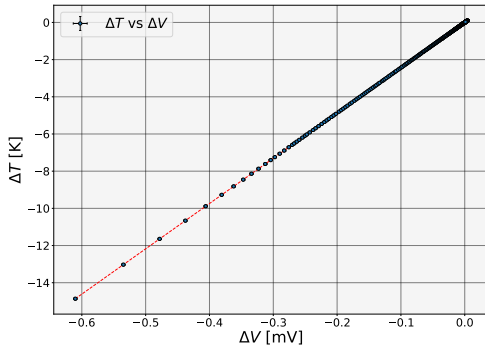


Figura 7: Calentamiento de la cara superior de la celda Peltier sin circulación de corriente luego de haberla enfriado (*TC 1*). Se observa cómo ambas termocuplas se estabilizan en el mismo voltaje, perdiendo la diferencia de temperatura que habían adquirido por la circulación de corriente.

Posteriormente se graficó la diferencia de temperatura entre las dos caras de la celda en función de la diferencia de voltaje obtenida de la fuente generadora de corriente al apagar su circulación (Fig. 8a y Fig. 8b). El valor del coeficiente de Seebeck se obtuvo como la inversa de la pendiente obtenida por el ajuste lineal sobre los datos con Ec. (1). Para ambos casos el valor obtenido para el coeficiente de Seebeck es indistinguible uno del otro. Se reporta el valor promedio en $\alpha = (41,06 \pm 0,03) \mu V/K$.



(a)



(b)

Figura 8: Diferencia de temperatura entre placas en función de su diferencia de voltaje. En (a) se observa una medición del enfriamiento de la placa superior, mientras que en (b) se observa el calentamiento de la misma. El coeficiente de Seebeck se obtuvo mediante una regresión lineal de las mediciones utilizando Ec. (1).

Es también de interés analizar el comportamiento de la resistencia del circuito en función de la temperatura. Dividiendo Ec. (3) por la corriente I , se obtiene $\Delta V = \alpha \Delta T + IR$. De todos estos términos, la corriente, la diferencia de temperatura y la caída de potencial fueron medidos durante el experimento, mientras que el coeficiente de Seebeck fue calculado según la Ec. (1) (Fig. 8). Para calcular la resistencia no se puede analizar ΔV vs I (Fig. 9) como si se tratara de una función lineal con pendiente R y ordenada al origen $\alpha \Delta T$, puesto que ΔT depende de I . El mismo problema ocurre si se pretende analizar ΔT vs I (Fig. 10).

Se observa que para los valores de corriente utilizados se obtiene una mayor caída de potencial en el circuito cuando se calienta la cara superior que cuando se enfría, lo que implica mayor potencia entregada por la fuente para generar la diferencia de temperatura (Fig. 9).

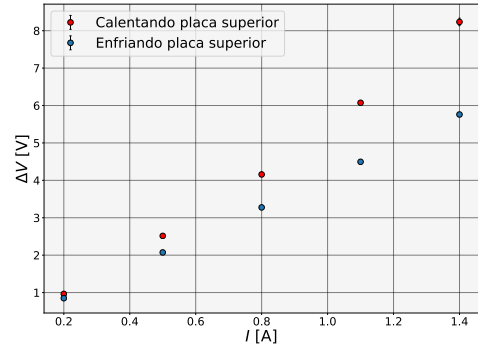


Figura 9: Caída de voltaje en el circuito para cada valor de corriente. Para los puntos celestes se enfrió la placa superior, mientras que para los puntos rojos se calentó.

Por otro lado, viendo la diferencia de temperatura generada por las mismas corrientes cuando se calienta y cuando se enfría la cara superior de la celda Peltier (Fig. 10), parece ser más fácil calentar que enfriar la placa. Más aún, para corrientes cada vez más grandes, los puntos que indican la diferencia de temperatura producida por el enfriamiento se "achatan", es decir que el beneficio adicional de aumentar la corriente es mínimo comparado con el beneficio obtenido con una corriente menor. Para los puntos que indican la diferencia de temperatura producida por calentar la cara superior, se puede observar que sucede lo contrario.

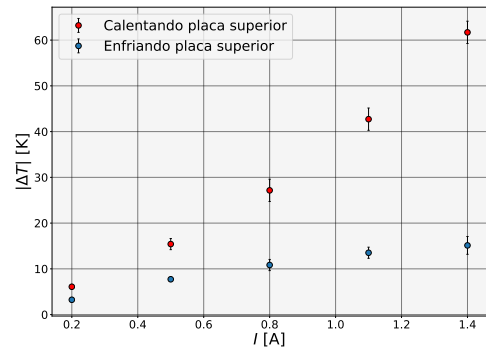


Figura 10: Módulo de la diferencia de temperatura generada entre las caras de la placa Peltier para cada valor de corriente. Para los puntos azules se enfrió la placa superior, mientras que para los puntos rojos se calentó.

Para poder analizar el comportamiento de la resistencia del circuito evitando los problemas anteriormente mencionados, se puede definir una nueva variable:

$$\lambda = IR = \Delta V - \alpha \Delta T \quad (5)$$

Así, estudiando para ambos sentidos de circulación

de corriente el comportamiento de esta nueva variable en función de I , se puede conocer el comportamiento de R .

Utilizando las mediciones de caída de tensión en la fuente y de diferencia de temperatura (Fig. 9 y Fig. 10), habiendo obtenido el coeficiente de Seebeck (Fig. 8) se graficó el valor de λ en función de I (Fig. 11)

Cuando se enfría la cara superior la resistencia del circuito se comporta linealmente. El rango representado por las mediciones va desde una diferencia de temperatura de 0°C hasta casi 20°C , alcanzando una temperatura mínima ligeramente menor a 15°C . La resistencia, en este caso, es $R_{frio} = (4,12 \pm 0,02)\Omega$.

Cuando se calienta la cara superior, sin embargo, no se observa un comportamiento lineal de la resistencia. En este caso, los 5 puntos rojos representan una diferencia de temperatura desde 0°C hasta casi 65°C , alcanzando una temperatura máxima superior a los 90°C . Aquí, a mayor diferencia de temperatura, más aumenta en módulo la pendiente, por lo que mayor se hace la resistencia. Esto puede deberse tanto a que la resistencia del circuito sí se modifica a altas temperaturas como a que el comportamiento de la termocupla no es conocido en este rango y podría estar modificando la respuesta del sistema no linealmente.

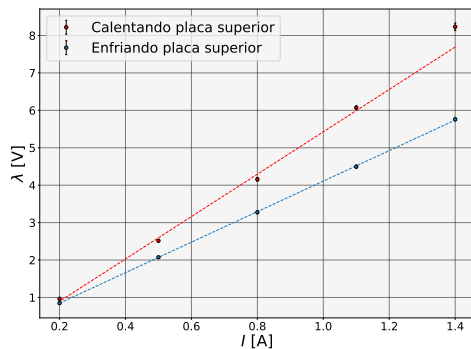


Figura 11: La variable $\lambda = \Delta V - \alpha \Delta T$ en función de I para cuando se calienta la cara superior (en rojo) y para cuando se enfría (en azul), con sus respectivos ajustes lineales dados por Ec. (5). Aquí, los puntos de mayor corriente representan los puntos en los que se alcanza una mayor diferencia de temperatura entre las placas, que contribuyen a la mayor parte del error en la medición.

A mayor temperatura se observa que aumenta la resistencia, por lo que el calor disipado por ésta es mayor y, por lo tanto, menor es la energía que puede ser aprovechada para generar una diferencia de temperatura entre las caras de la celda. En los valores de eficiencia obtenidos por la Ec. (4) se observa que para todos los valores de corriente la eficiencia de la placa funcionando como máquina frigorífica es mayor a la de la placa funcionando como máquina térmica (Fig. 12).

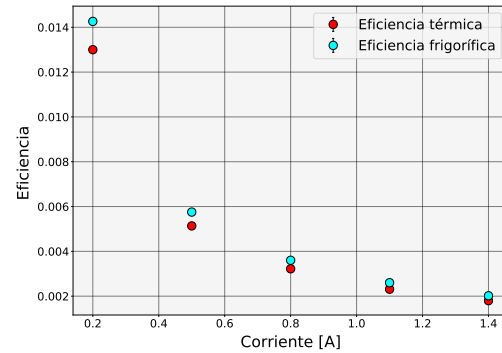


Figura 12: Eficiencia de la celda Peltier vista como máquina térmica/frigorífica para cuando se calienta/enfría la placa superior, según la Ec. (4).

3. Conclusión

Se logró corroborar que la calibración de las termocuplas a utilizar para el proceso de medición de la placa Peltier no sólo era correcta y permitía registrar valores confiables de temperatura, sino que también las termocuplas cambiaban de temperatura mas rápido que el tiempo de muestreo del instrumental utilizado por lo que la temperatura registrada en ellas era la propia del sensor y no un estado transitorio. Estas propiedades debieron ser medidas previo al estudio de la celda Peltier, puesto que la termocupla se utilizó con una temperatura de referencia diferente a la de calibración, y un tiempo de respuesta insuficiente podría ver afectada la confiabilidad de las mediciones del fenómeno físico estudiado.

Una vez establecida la confiabilidad de los instrumentos de medición, se procedió a medir el calentamiento y enfriamiento de una de las caras de una celda Peltier, manteniendo la otra cara a temperatura estable, tanto con circulación de corriente como sin ella. Esto permitió determinar el coeficiente de Seebeck de la celda, cuyo valor se estableció en $\alpha = (41,06 \pm 0,03) \mu\text{V/K}$. Además, permitió analizar el comportamiento de la resistencia del circuito en función de la temperatura. Se observó que para temperaturas entre aproximadamente 15°C y 30°C la resistencia toma un valor de $R_{frio} = (4,12 \pm 0,02)\Omega$; mientras que para temperaturas superiores este valor no se puede establecer porque su relación con la temperatura deja de ser lineal, aunque se puede concluir que aumenta cuando la temperatura también lo hace.

Finalmente, conociendo el comportamiento de la celda Peltier para distintos rangos de temperatura, se pudo estudiar la eficiencia de este dispositivo como máquina térmica y como máquina frigorífica. De este análisis se obtiene que la celda funciona más eficientemente cuando se quiere enfriar una de las caras que calentarla, puesto

que para temperaturas mayores aumenta la resistencia y con ella el calor disipado por el circuito, lo que causa que se pierda energía que podría estar siendo utilizada para calentar la celda.

Referencias

- [1] Yaakov Kraftmakher. “Simple experiments with a thermoelectric module”. En: *Eur. J. Phys* 26.959 (2005). URL: http://materias.df.uba.ar/14a2019c2/files/2019/09/Kraftmakher_2005_Eur._J._Phys._26_003.pdf.
- [2] Laboratorio 4. *Termoelectricidad*. URL: http://materias.df.uba.ar/14a2018v/files/2018/01/Guia_L4_Peltier.pdf.
- [3] *Manual Multímetro HP 34401A*. URL: <https://engineering.purdue.edu/~aae520/hp34401manual.pdf>.
- [4] *Manual Fuente Agilent B2900*. URL: <https://assets.testequity.com/te1/Documents/pdf/B2900A-ug.pdf>.
- [5] *Tabla Termorresistencia PT100*. URL: <http://materias.df.uba.ar/labo4a2013v/files/2012/07/Resistencia-HeraeusclaseB.pdf>.
- [6] *Tabla Termocupla tipo K*. URL: <http://materias.df.uba.ar/labo4a2013v/files/2012/07/Termometria.pdf>.

A. Apéndice

A.1. Tratamiento de errores

Para determinar la incerteza de todas magnitudes medidas directamente involucradas en este trabajo -esto es, voltajes medidos con los multímetros digitales [3], corriente entregada por la fuente [4], voltaje registrado por la termorresistencia [5] y las termocuplas [6] con su equi-

valente temperatura- se utilizó el cálculo provisto por el fabricante en el manual de cada instrumento y se le sumó un error estadístico en caso de ser necesario.

Para el cálculo indirecto de magnitudes se propagó el error y para magnitudes obtenidas a través de ajustes se utilizaron los valores devueltos por el programa. Todos los ajustes se realizaron ponderando el error de cada medición.