

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA CELDA PELTIER

Eugenio Della Valle, Florencia Gay Merino y Maximiliano Rodriguez Camps

Laboratorio 4 – Verano 2025
Departamento de Física, FCEyN, UBA

Resumen

En este trabajo se caracterizó una celda Peltier TEC1-12715 y se estudió su capacidad de ser usada como máquina frigorífica y bomba calorimétrica, analizando la diferencia de temperaturas entre las caras de la celda a diferentes corrientes que circulaban por ella. Se calcularon dos valores de mérito determinados en $Z = (6,26 \pm 0,16) \times 10^{-5}$ para el enfriamiento y $Z = (6,67 \pm 0,15) \times 10^{-5}$ para el calentamiento.

Para la caracterización se obtuvieron los coeficientes de Seebeck, resistencia y conductividad de la celda, determinados en $S = (3,26 \pm 0,02) \times 10^{-2} \frac{V}{K}$, $R = (1,33 \pm 0,28) \Omega$, $\kappa = (0,202 \pm 0,050) \frac{W}{mK}$, respectivamente, a partir de los datos del enfriamiento y $S = (4,44 \pm 0,02) \times 10^{-2} \frac{V}{K}$, $R = (1,16 \pm 0,17) \Omega$, $\kappa = (0,362 \pm 0,063) \frac{W}{mK}$ para los del calentamiento.

1. Introducción

Una celda Peltier 1 es un dispositivo termoeléctrico que aprovecha el efecto Peltier para generar una diferencia de temperatura entre sus caras al fluir una corriente a través de ella. Esto es posible porque su interior está compuesto por conductores tipo N y P, que, dependiendo de la polaridad, absorben el calor de una de las caras y lo liberan en la otra, generando así la diferencia de temperatura.

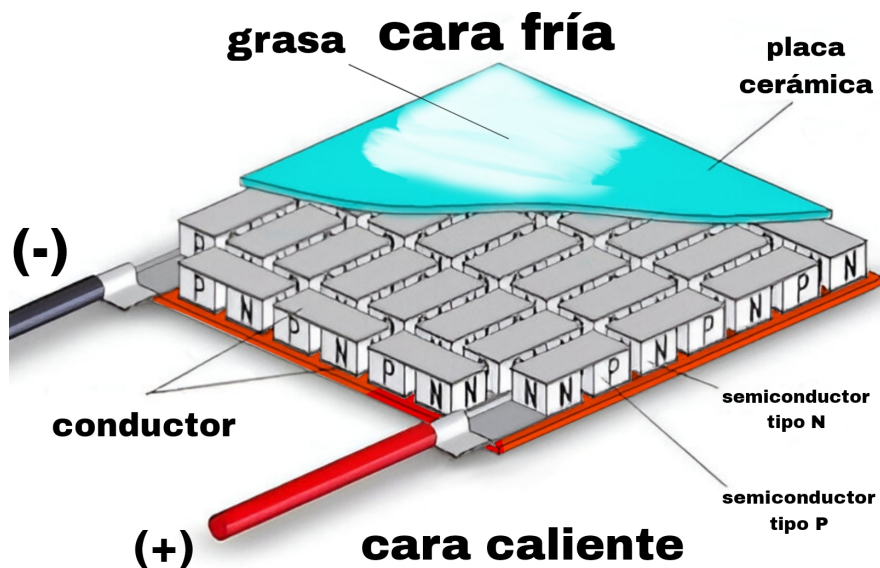


Figura 1: Celda Peltier durante el régimen de enfriamiento. Entre las caras de la celda se encuentran los conductores tipo N y P, que permiten el intercambio de temperatura entre ellas. Dependiendo de la polaridad, variará el régimen. La grasa facilita el contacto térmico entre las celdas y el instrumento de medición de temperatura.

Al ser alimentada con un determinado valor de corriente, las caras de la celda comienzan a aumentar su diferencia de temperatura hasta alcanzar un equilibrio, en el cual, cada cara mantiene una temperatura constante. Cuando esto ocurre, se dice que la celda ha alcanzado el estado estacionario.

La capacidad de la celda para aumentar o disminuir la temperatura de una de sus caras permite su uso tanto para enfriar (máquina frigorífica) como para calentar (bomba calorimétrica). Tomando una de las caras como referencia, estos procesos se denominan de enfriamiento y de calentamiento, respectivamente.

En este trabajo, se estudia la capacidad de la celda para operar en ambos regímenes y se busca estimar su eficiencia mediante el cálculo del factor de mérito Z . Como convención, se elige la cara superior como referencia: si su temperatura disminuye, se considera un proceso de enfriamiento; si aumenta, un proceso de calentamiento.

El efecto Peltier está íntimamente relacionado con el efecto Seebeck (ec.3). A partir de el estudio de este usando ec. (2), se van a caracterizar las propiedades de la celda, más específicamente su resistencia R y su conductividad térmica κ a partir de las ecuaciones (4) y (6) respectivamente.

2. Desarrollo Experimental

Con el objetivo de caracterizar el calentamiento y enfriamiento de la celda Peltier y sus especificaciones, se llevó a cabo un montaje experimental configurado tal como se muestra en la figura 2.

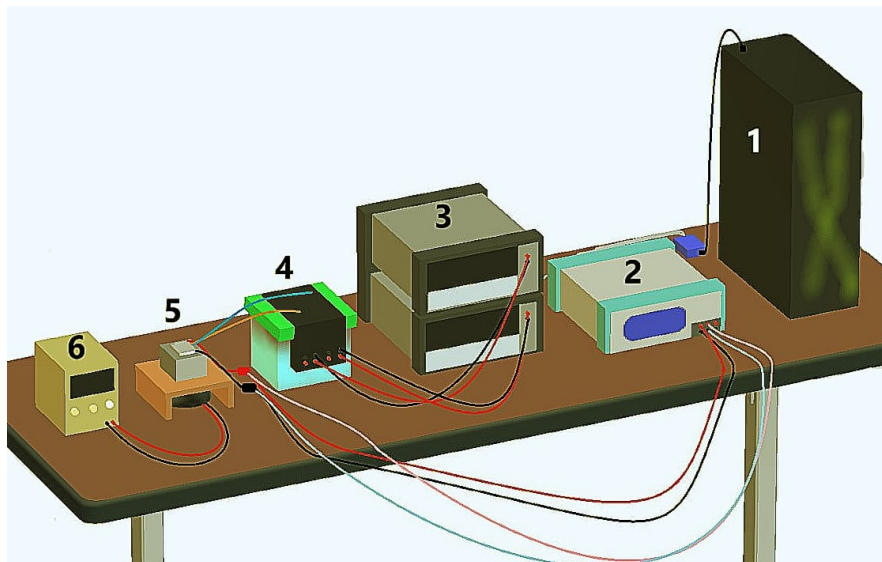


Figura 2: El montaje estuvo compuesto por: (1) una PC para la recolección automática y el análisis de datos; (2) una fuente de precisión para suministrar corriente a la celda y medir la tensión generada por el efecto Seebeck; (3) multímetros para medir la tensión de las termocuplas; (4) dos termocuplas con su baño térmico de agua como referencia, que miden las temperaturas de la cara superior e inferior; (5) una celda Peltier con su difusor de aluminio y ventilador; (6) una fuente para alimentar el ventilador.

Se utilizó una celda TEC1-12715 [1] de geometría cuadrada con dimensiones de $(50,00 \pm 0,25)$ mm de lado y un espesor de $(3,80 \pm 0,10)$ mm. La resistencia interna de la celda es de $(0,75 \pm 0,05) \Omega$, con una variación de $0,015 \Omega$ por cada incremento o decremento en la temperatura ambiente de 1°C respecto a los 25°C de referencia. Este experimento se realizó a una temperatura ambiente de 30°C , por lo que se estimó una resistencia de $(0,83 \pm 0,05) \Omega$ al momento de hacer uso de ella. Además, la celda presenta un límite máximo de temperatura de 90°C .

Se examinó la diferencia de temperaturas entre sus caras durante su evolución temporal. Este comportamiento se analizó variando la corriente aplicada a diferentes valores. Para alimentar la celda, se utilizó una fuente de precisión modelo Agilent B2901A, la cual también se conectó a los pines de la celda para medir la caída de voltaje, funcionando simultáneamente como multímetro.

Para medir las temperaturas en las caras de la celda Peltier, se utilizaron dos termocuplas tipo K, colocadas en las caras superior e inferior. Estas termocuplas se conectaron a dos multímetros, modelos

Hewlett Packard 34401A y Agilent 34401A, que midieron el voltaje generado por las termocuplas debido al efecto Seebeck. A partir de estos datos, y mediante polinomios de interpolación [2], se obtuvieron los valores de temperatura correspondientes.

Además, se empleó un recipiente no adiabático con agua y hielo como referencia térmica, cuya temperatura se midió usando un termómetro de mercurio, en $(1,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ al momento de tomar las mediciones. Este método, aunque útil, presentó limitaciones temporales que se tuvieron en cuenta durante el análisis. Dichas limitaciones estaban estrechamente relacionadas con la fusión del hielo. Además, para reducir las fluctuaciones locales en la transferencia de calor, las termocuplas se encontraban sumergidas en tubos llenos de aceite, lo que contribuyó a estabilizar las mediciones.

Con el fin de disipar el calor generado, se empleó un difusor de aluminio. Dicho difusor contaba con dos placas ajustables que permitieron fijar la celda y los pines de las termocuplas en su interior. Para asegurar un contacto adecuado entre estas y las caras de la celda, se aplicó grasa en la superficie de estas antes de fijarla en el difusor. El sistema se montó sobre un soporte, lo que facilitó la instalación de un ventilador en la parte inferior para evitar el sobrecalentamiento de la celda y alcanzar el estado estacionario más rápidamente. El ventilador se alimentó con un generador de corriente directa modelo LG GP-4303D, configurado a $(10,2 \pm 0,1)\text{ A}$.

En un análisis preliminar, se observó que el estado estacionario de la diferencia de temperaturas se manifestaba a partir de los 200s de medición, para todo el rango de corrientes. Por ello, para el proceso de enfriamiento, se permitió un intervalo de 350s entre cada incremento del barrido, asegurando que se alcanzara dicho estado. Este valor también resultó conveniente para completar las mediciones antes de que el hielo comenzara a derretirse, ya que todo el proceso de enfriamiento llevó 58 minutos. Sin embargo, en el caso del calentamiento, este intervalo se redujo a 225s debido a restricciones de tiempo en el uso del laboratorio, lo que obligó a finalizar las mediciones. Entre análisis y análisis, se dejó pasar unos 20 minutos aproximadamente para lograr que la celda volviera a tener ambas caras a temperatura ambiente. Una vez logrado esto, se procedió a reponer hielo en el recipiente.

El barrido grueso consistió en la obtención de datos de temperatura de ambas termocuplas, así como del voltaje y la corriente medidos por el generador, en función del tiempo. La corriente se incrementó de manera automatizada desde 0 A hasta 1,50 A, con pasos de 0,15 A. La medición se dejó avanzar hasta alcanzar el estado estacionario, tras lo cual se apagaba la alimentación (corriente 0) durante 2s, pero sin detener la medición. En este intervalo, se midió el valor de tensión entre las caras de la celda generado por efecto Seebeck. Luego, se avanzaba al siguiente valor de corriente. Con este procedimiento, se obtuvieron 10 datos de tensión para el enfriamiento y 10 datos para el calentamiento, los cuales se utilizaron para determinar el coeficiente de Seebeck a partir del ajuste.

3. Resultados y Discusión.

Se muestra a continuación el barrido grueso de corriente tanto para el enfriamiento (figura 3) como para el calentamiento (figura 4). Tal como se mencionó anteriormente, las mediciones se realizaron a partir del cálculo de la diferencia de temperatura (ΔT) entre las caras de la celda. Estas imágenes ilustran la evolución temporal de los datos.

En una primera instancia, haciendo un análisis global del experimento, se observa cómo la diferencia de temperatura a 1,5 A (siendo este el último valor de corriente) es casi la misma en ambos gráficos, con un $\Delta T_{\text{enf}} = 10,97\text{ K}$ y un $\Delta T_{\text{cal}} = 10,44\text{ K}$. A pesar de no solaparse con el error (0,05 K), estos valores son bastante cercanos entre sí.

De manera cualitativa se pueden observar varios fenómenos. Se percibe cómo ambos gráficos logran alcanzar el estado estacionario cómodamente a pesar de utilizar diferentes rangos temporales. Esto también indica que las diferencias de temperatura se estabilizan de manera uniforme, independientemente del valor de corriente.

Por otro lado, los picos pronunciados evidencian cómo la diferencia de temperatura tiende rápidamente a cero cuando se interrumpe la alimentación. Sin embargo, a pesar de esto, el sistema logra alcanzar el estado estacionario sin mayores dificultades. Es interesante señalar que también se produce una caída abrupta en el

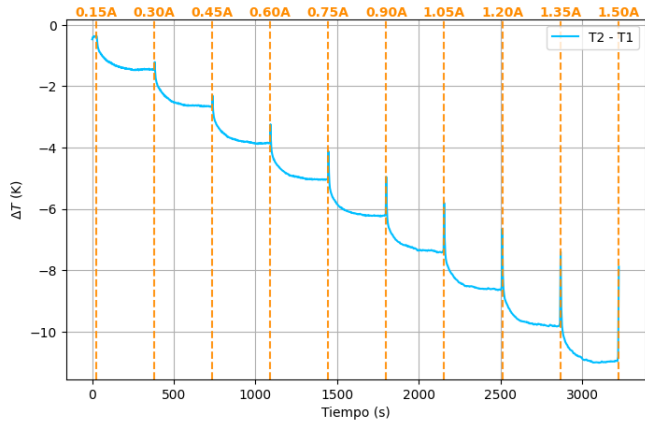


Figura 3: Gráfico de ΔT vs. tiempo para el enfriamiento, para diferentes valores de corriente.

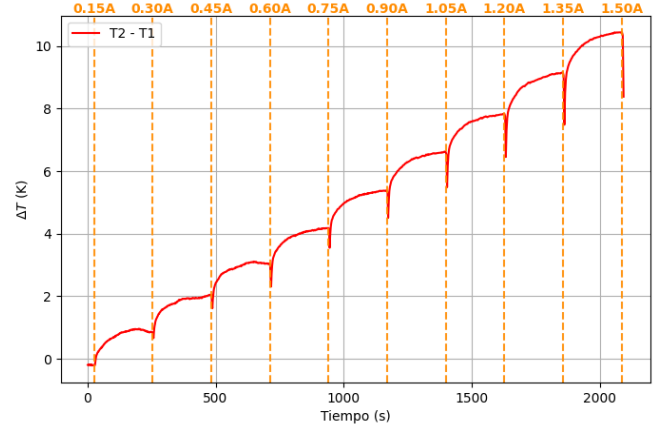


Figura 4: Gráfico de ΔT vs. tiempo para el calentamiento, para diferentes valores de corriente.

voltaje durante el corte de corriente; sin embargo, este valor no se graficó en las figuras 3 y 4. Este fenómeno se puede observar con mayor detalle en el apéndice A.2.

Para la determinación del coeficiente de Seebeck, se tomaron los valores de tensión (ΔV) y de temperatura (ΔT) correspondientes a cada período estacionario, tanto para los procesos de enfriamiento como de calentamiento. A partir de la relación (2), se realizó un ajuste para cada conjunto de datos, obteniendo así dos valores para dicho coeficiente.

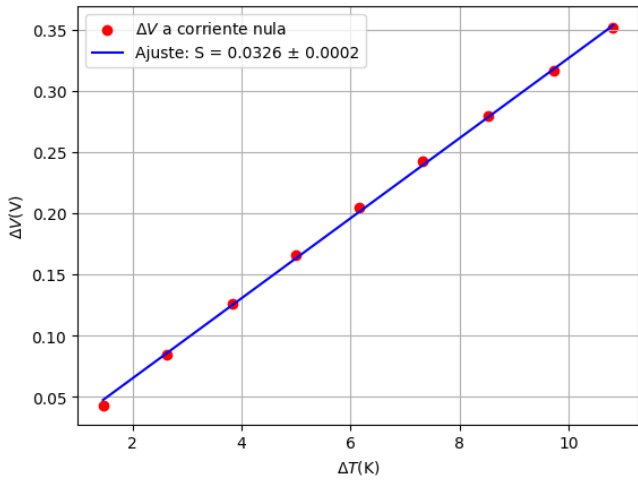


Figura 5: Ajuste para el proceso de enfriamiento con los datos tensión generada por efecto Seebeck medida a corriente 0 vs. ΔT (en módulo), del período estacionario, para cada paso del barrido de corriente.

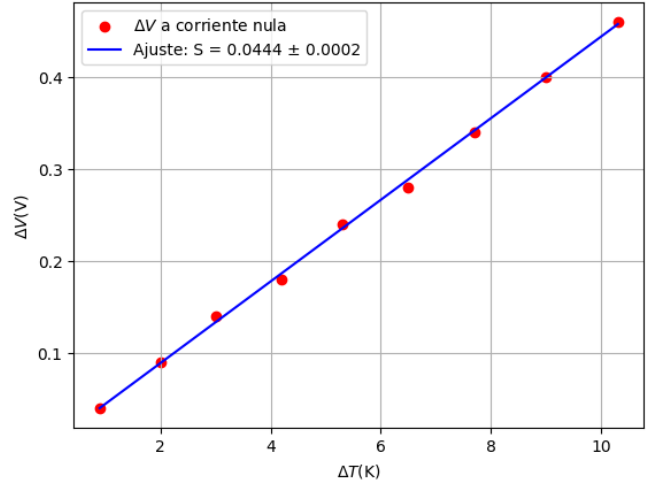


Figura 6: Ajuste para el proceso de calentamiento con los datos tensión generada por efecto Seebeck medida a corriente 0 vs. ΔT , del período estacionario, para cada paso del barrido de corriente.

A partir del ajuste de la figura 5, se determinó el coeficiente de Seebeck para los datos del proceso de enfriamiento, obteniéndose un valor de $S = (3,26 \pm 0,02) \times 10^{-2} \frac{V}{K}$, con un $R^2 = 0,99$, lo que indica una relación completamente lineal entre las magnitudes, lo cual era esperado dada la forma de (2). Además, los valores de χ^2_{red} y p -valor fueron 0.27 y 0.97, respectivamente. El valor de χ^2_{red} está más cercano a 0 que a 1, lo que podría indicar una sobreestimación en los errores, los cuales fueron estimados siguiendo el criterio descrito en A.3. Sin embargo, este valor sigue siendo suficientemente grande como para que, en caso de haber una sobreestimación de los errores, esta no sea significativa. Por otro lado, el valor de p -valor es lo suficientemente alto como para no rechazar la hipótesis nula. Todo esto permite confiar en el valor obtenido para el coeficiente de Seebeck en este régimen.

De manera similar, el ajuste de la figura 6 produjo un valor de $S = (4,44 \pm 0,02) \times 10^{-2} \frac{V}{K}$, con determina-

dores $R^2 = 0,99$, igual al anterior, $\chi_{\text{red}}^2 = 0,81$, cercano a 1, lo cual es un buen indicador, y un p -valor = 0,59, igualmente elevado, lo que implica que tampoco se puede rechazar la hipótesis nula. Teniendo en cuenta todo esto, se aceptaron los valores obtenidos para el coeficiente de Seebeck en ambos regímenes. Aunque estos no se solapan, son muy cercanos entre sí.

Con los coeficientes de Seebeck encontrados, se procedió a determinar la resistencia R de la celda a partir de la ecuación (4), utilizando la potencia medida a los 600 s de los dos regímenes, su conductividad térmica κ a partir de la ecuación (6) y, a partir de la ecuación (5), un factor de mérito Z para evaluar el desempeño de la celda como máquina térmica, todo esto en los dos regímenes. Para el enfriamiento se obtuvieron $R = (1,33 \pm 0,28) \Omega$, $Z = (6,26 \pm 0,16) \times 10^{-5}$ y $\kappa = (0,202 \pm 0,050) \frac{\text{W}}{\text{m K}}$, mientras que para el calentamiento se obtuvieron $R = (1,16 \pm 0,17) \Omega$, $Z = (6,67 \pm 0,15) \times 10^{-5}$ y $\kappa = (0,362 \pm 0,063) \frac{\text{W}}{\text{m K}}$.

Los valores de R medidos en los dos regímenes se solapan, pero no así con el valor proporcionado por el fabricante. Dado que la celda ha sido expuesta a un uso continuo durante un largo período, es posible que la resistencia haya variado a lo largo de su vida útil. Sin embargo, se puede considerar que los valores encontrados son cercanos al del manual, y no hay evidencia que sugiera que los valores obtenidos no sean posibles.

Los factores de mérito encontrados son cercanos entre sí, lo que indica que la celda tiene aproximadamente la misma capacidad como máquina frigorífica y bomba calorimétrica. Esto puede apreciarse en las figuras 3 y 4, ya que, en ambos regímenes, la celda calienta o enfría alrededor de 10 K y alcanza el estado estacionario en un tiempo similar. Si bien funcionan de manera equivalente, los valores bajos de Z sugieren que la celda no es eficiente como máquina térmica.

Los valores para la conductividad térmica en los dos regímenes no se solapan entre sí, pero igualmente están bastante próximos. No se conoció la razón de la discrepancia; sin embargo, el valor real se encuentra en el rango dado por los valores obtenidos y, como primera aproximación, pueden tomarse como válidos.

4. Conclusiones

Se logró determinar el coeficiente de Seebeck S , la resistencia R y la conductividad de la celda κ , para los datos obtenidos en los diferentes regímenes. Los valores hallados para cada una de estas magnitudes resultaron ser muy cercanos entre sí y congruentes.

Se pudo estudiar el desempeño de la celda como máquina frigorífica y bomba calorimétrica, observando que la celda presenta la misma capacidad en ambos regímenes. Sin embargo, dicha capacidad es limitada e ineficiente. Esto se refleja en los valores obtenidos para el factor de mérito Z , que, aunque cercanos entre sí, son bajos. Este comportamiento también se observa, en menor medida, en el hecho de que, al finalizar el barrido de corrientes en ambos regímenes, la celda producía la misma diferencia de temperatura y, independientemente de la corriente o régimen, tardaba el mismo tiempo en alcanzar el estado estacionario. Por lo tanto, si se requiere el uso de una máquina térmica y no se prioriza la eficiencia, se recomienda el uso de una celda Peltier.

El hecho de que sea necesario termalizar las termocuplas con agua con hielo para mantenerlas a una temperatura constante es una de las mayores complicaciones del experimento, ya que el hielo, después de un tiempo, se derrite por completo y, en ese momento, la estabilidad de la temperatura se pierde. Por lo tanto, es necesario tomar las mediciones antes de que esto ocurra, lo que impone un margen de tiempo en la duración del experimento. Con este fin, se recomienda, para futuras mediciones, limitar el tiempo de medición en cada paso del barrido lo suficiente para observar el estado estacionario, pero sin extenderse demasiado. Si el experimento se realizara en invierno, este problema podría mitigarse.

Agradecemos encarecidamente al grupo 7 por la ayuda brindada durante el experimento.

A. Apéndice

A.1. Suplemento teórico

Los dispositivos termoelectricos presentan una conexión entre la termodinámica y la electricidad. Esto permite la transformación de energía eléctrica en energía térmica y viceversa, a través de dos fenómenos que se conocen como efecto Peltier y efecto Seebeck. Estos se describen a continuación, para más detalles, ver [3] [4] [5].

El efecto Peltier consiste en la aparición de una transferencia de calor al ser la celda alimentada por una corriente. Este efecto se modela mediante la relación lineal

$$\dot{Q} = \Pi I, \quad (1)$$

entre la corriente I y el flujo de calor \dot{Q} , donde Π es el coeficiente de Peltier. Según el sentido de la corriente, una de las caras se calentará o se enfriará.

En cuanto al efecto Seebeck, se trata de una fuerza termo-electromotriz ΔV que se produce entre los terminales de la celda a partir de la diferencia de temperatura ΔT :

$$\Delta V = S \Delta T, \quad (2)$$

donde S es el coeficiente de Seebeck. Los dos coeficientes están relacionados mediante la ecuación

$$\Pi = S \Delta T, \quad (3)$$

que permite obtener un coeficiente a partir del otro. Se tiene que la potencia absorbida por la celda al ser alimentada por una corriente I es

$$P = S \Delta T I + I^2 R, \quad (4)$$

donde R es la resistencia de la celda.

El factor de mérito, que cuantifica su eficiencia, se calcula como

$$Z = \frac{2\Delta T_{max}}{T_F^2}, \quad (5)$$

donde ΔT_{max} es la máxima diferencia de temperatura entre las caras que puede dar la celda dada una determinada temperatura T_F en la cara fría.

A partir de otra expresión del factor de mérito, se deriva la siguiente expresión para la conductividad:

$$\kappa = \frac{S^2 L}{RAZ}, \quad (6)$$

donde L es el espesor y A la sección de la celda. Partiendo de la determinación experimental de los coeficientes S y Z y conociendo la geometría de la celda, se calcula la conductividad térmica.

A.2. Gráfico de voltaje vs tiempo

Como se puede observar en las figuras A.1 y A.2, hay una caída cuando se apaga la corriente en prelude a un siguiente paso del barrido. Esta caída se da porque a corriente nula la tensión medida es producto del efecto Seebeck. Luego, al pasar al siguiente paso del barrido, el voltaje toma el valor que debe tener para mantener la corriente del paso. Este cambio es instantáneo.

A.3. Determinación de errores

Tanto para los errores de temperatura como de voltaje, se tomó un subconjunto de datos del período estacionario a 600 s para ambos regímenes. A este subconjunto se le calculó el promedio de los valores de temperatura y voltaje, y su desviación estándar, la cual se consideró como el error.

Se eligió este subconjunto para la determinación del error porque, aunque las mediciones de los regímenes requieren diferentes tiempos para completarse, los 600 s representan un estado inicial en ambos casos. Así, se buscó analizar los datos en períodos similares dentro de las mediciones.

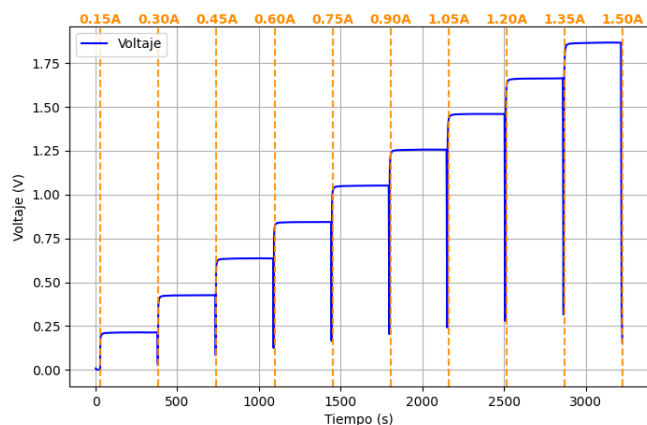


Figura A.1: Gráfico de voltaje vs. tiempo para el enfriamiento, para diferentes valores de corriente.

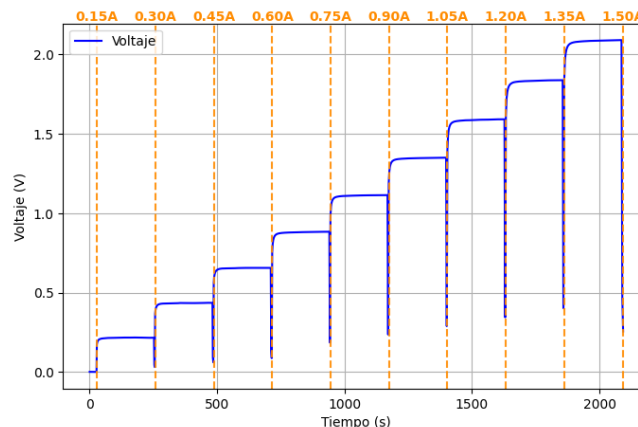


Figura A.2: Gráfico de voltaje vs. tiempo para el calentamiento, para diferentes valores de corriente.

Referencias

- [1] Hoja de datos de la celda TEC1-12715. Consultado el 1 de marzo de 2025. Mar. de 2025. URL: <https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12715.pdf>.
- [2] Funciones inversas de la ITS-90 - NIST. Consultado el 1 de marzo de 2025. Mar. de 2025. URL: <https://its90.nist.gov/InvFunctions>.
- [3] Y. M. Galperin. *Introduction to Modern Solid State Physics*. Oslo, 2001, pág. 107.
- [4] D. M. Rowe, ed. *CRC Handbook of Thermoelectrics*. CRC Press, 1995.
- [5] L. D. Landau y E. M. Lifschitz. *Course of Theoretical Physics, vol. 8: Electrodynamics of Continuous Media*. Pergamon Press, 1984.