

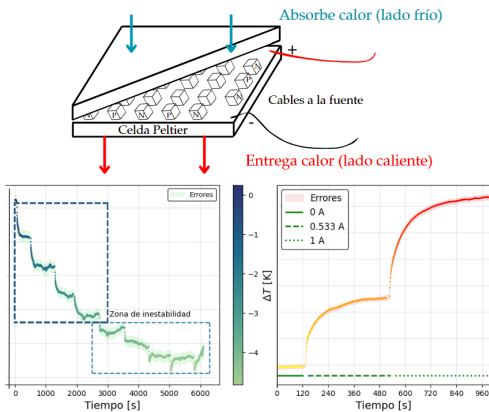
Caracterización de una celda Peltier

Horacio Garcia Crespo*, Lucia Gatica[†], Alejandro Toranzo[‡]

Laboratorio 4C - 2C 2024, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

RESUMEN

Este trabajo analiza la caracterización de una celda Peltier, un dispositivo termoeléctrico que permite regular la temperatura mediante la aplicación de corriente eléctrica. Se evaluó su capacidad tanto para enfriar como para calentar, mostrando que puede calentar de forma estable hasta 12 K, pero presenta dificultades para enfriar más allá de 4.5 K, debido al efecto Joule y la conductividad térmica. Se obtuvieron valores experimentales del coeficiente Seebeck $S = (0.0969 \pm 0.0023) \text{ VK}^{-1}$, la resistencia $R = (2.745 \pm 0.029) \Omega$, la conductividad térmica $\kappa = (0.1178 \pm 0.0070) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y un factor de mérito $Z = (4.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$, que muestran una eficiencia limitada en el enfriamiento. A pesar de ello, el dispositivo es útil para aplicaciones de control térmico, especialmente cuando se busca calentar. Los resultados sugieren que la eficiencia de la celda puede mejorarse con la implementación de controladores PID, optimizando su rendimiento en futuros experimentos.



1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas eléctricos, el sobrecalentamiento de los equipos y las líneas eléctricas puede provocar incidentes graves de seguridad, como incendios, explosiones o fallos en los equipos. Para abordar este problema, numerosos trabajos se han llevado a cabo con el fin de estudiar los fenómenos térmicos en dispositivos eléctricos [1] (de los cuales los circuitos electrónicos son de particular interés [2]) y diseñar métodos para contrarrestar el sobrecalentamiento [3]. Sin embargo, con los avances tecnológicos actuales, regular eficientemente la temperatura de los equipos electrónicos se ha vuelto cada vez más difícil, lo que convierte al control térmico en un aspecto crucial a ser estudiado.

Las celdas Peltier se han propuesto para atacar este problema; se trata de un *módulo termoeléctrico* que permite regular la temperatura en sus caras al aplicarle una determinada corriente. La mayor ventaja que presenta contra otros elementos de control es su accesibilidad al tratarse de un equipo muy económico y compacto, frente a otros elementos de regulación térmica. Un adecuado seguimiento de la temperatura de la celda puede lograrse con lazos de control PID, los cuales permiten al sistema contrarrestar el sobrecalentamiento de equipos de manera automática al cali-

brarlo adecuadamente.

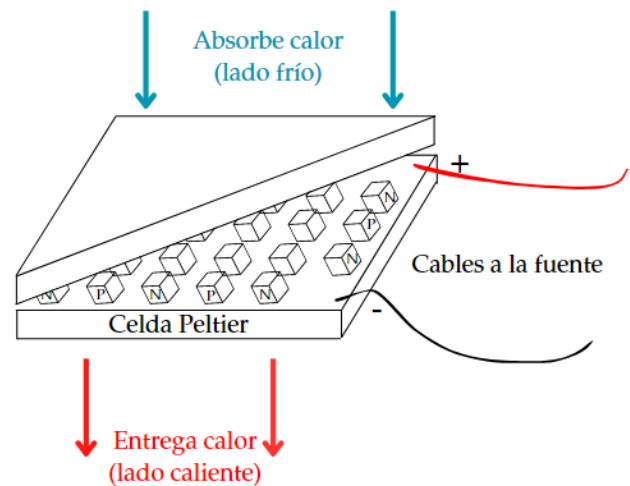


Fig. 1. Esquema del funcionamiento de una celda. Una celda Peltier es un dispositivo termoeléctrico que utiliza el efecto Peltier para transferir calor a través de materiales semiconductores cuando se aplica una corriente eléctrica. Al pasar corriente, un lado de la celda se enfría mientras el otro se calienta. Este efecto se debe a la absorción y liberación de calor en las uniones de los semiconductores, lo que permite enfriar o calentar dispositivos.

*horaciogarciacr@gmail.com

[†]lucia.gatica.44@gmail.com

[‡]nahueltoranzo283@gmail.com

Un aspecto importante para decidir si la celda Peltier es una buena opción de regulación térmica es estudiando su *eficiencia*. Es de interés caracterizar algunos aspectos eléctricos y térmicos de la misma, principalmente su resistencia eléctrica R y su conductividad térmica κ , relacionados al efecto Joule y la conducción de calor. Siguiendo la propuesta de Kraftmahrer [4], una descripción cualitativa de la eficiencia puede darse mediante el *factor de mérito* Z , en lugar de la clásica eficiencia de Carnot. Los detalles teóricos pueden encontrarse en el Suplemento teórico.

El objetivo de este trabajo es la caracterización de una celda Peltier y su eficiencia como una máquina térmica y determinar si un módulo termoelectrico es útil para regular la temperatura. Para eso es necesario obtener la resistencia R y la conductividad κ haciendo uso del efecto Seebeck, y realizando una misma medición, pueden obtenerse ambos valores y compararse con la información del fabricante [5]. Determinando el Z , la celda Peltier queda caracterizada como una máquina térmica.

2. METODOS Y DESARROLLO

2.1. Métodos

El comportamiento y las propiedades de la celda se estudiaron con una misma disposición experimental (ver Fig. 2 y 3) en dos etapas separadas. En primer instancia se midió la evolución temporal de la diferencia de temperaturas $\Delta T = T_S - T_I$, donde T_S es la temperatura de la cara superior y T_I la de la inferior, al alimentar la celda con valores crecientes de corriente. Para cada corriente se registraron los valores de ΔT hasta que esta alcanzaba un estado estacionario (el criterio del mismo se encuentra en el apéndice).

Según la conexión utilizada (ver Fig. 2) el flujo de calor va de la cara superior a la inferior. En esta configuración la cara superior es la cara fría. Este régimen se denominó de *enfriamiento*. Invertiendo la polaridad en la celda se obtuvo un régimen de *calentamiento* en la cara superior. Para cada una de estas polaridades se realizó un barrido de corrientes.

Alcanzado el estacionario se cortó la alimentación a la celda y se midió su caída de tensión y el ΔT entre las caras. Para registrar la tensión en la celda se utilizó la misma fuente empleada para alimentarla, en el modo de medición. Realizando las dos instancias de forma iterativa, se obtienen datos de ΔT para ambos regímenes y ΔV para la caída de tensión provocada por la diferencia de temperatura.

2.2. Desarrollo

La medición de temperatura en las caras se realizó a cuatro puntas utilizando dos termocuplas; cada una de ellas posee dos puntas, de las cuales una se sumergió en un baño de agua con hielo para referenciar la temperatura a 273 K y la otra se colocó en la cara de la celda. Para mejorar el contacto térmico entre las puntas y la cara se utilizó grasa siliconada. Se sos-

tuvieron las puntas sobre la celda con un soporte anclado a un bloque de cobre, que se utilizó como disipador de calor para la cara inferior. Debajo del bloque se colocó un ventilador cooler genérico alimentado por una fuente DC LG GP-4303D a un voltaje fijo de 10.3 V para mantener constante su temperatura y acelerar la disipación. Es importante destacar que a todos los elementos en contacto con las puntas de las termocuplas se les agregó o grasa siliconada o aceite, mejorando el contacto.

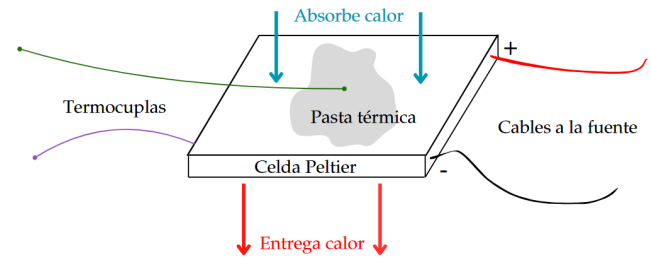


Fig. 2. Esquema de una celda Peltier. Las celdas Peltier son módulos termoelectricos compactos y económicos, cuyo funcionamiento se basa en los efectos termoelectricos (tanto Seebeck como Peltier). La celda se conectó a una fuente de corriente continua mediante los cables **rojo** (+) y **negro** (-) que inducen una polaridad en la absorción y entrega de calor. La corriente entregada a la celda genera un gradiente de temperatura entre las caras que se midió con termocuplas -en **violeta** para la cara superior y en **verde** para la cara inferior-. Se colocó grasa en ambas caras para mejorar el contacto de las termocuplas con la celda.

Las termocuplas de las dos caras se conectaron a dos multímetros *Hewlett-Packard 34401A* en su canal de medición de voltaje, configurados en el rango de 100 mV y en resolución *slow 6 digit*, que permite rechazar el ruido. Como se ve en la Fig. 3 los multímetros 1 y 2 corresponden a las caras superior e inferior respectivamente. Se tradujo la tensión generada por cada termocupla a valores de temperatura usando la conversión estandarizada por el NIST [6].

Se utilizó una fuente DC *Agilent B2901A Precision Source* tanto para alimentar a la celda como para medir la tensión en la misma durante la instancia sin alimentación. Para el régimen de enfriamiento se realizó un barrido de corrientes de 0 a 1.35 A, con saltos de 0.15 A y con la fuente configurada con un protector de voltaje a 2 V para proteger los equipos utilizados. Para alcanzar el estacionario se fijó un tiempo de adquisición de entre 500 a 800 s. Para el calentamiento, el barrido fue de solo tres valores de corriente (0 A, 0.533 A y 1 A) con un tiempo de adquisición menor de alrededor de 500 s. La fuente tiene un modo de medición, con la desventaja que sigue alimentando el sistema mientras mide; esto es un problema para las mediciones de voltaje debido a que la caída de tensión no se debe únicamente al efecto Seebeck. Este problema se puede evitar si se permite que la fuente alimente al sistema con corriente nula y se tomen los datos hasta que la caída de voltaje se anule también.

Para la adquisición de datos de los multimetros y la fuente se estableció una comunicación con una PC mediante cables de tipo GPIB y una ficha de adquisición de *Texas Instruments*. Todo el control de los equipos se realizó utilizando un script de Python con la librería *pyVisa*. El diseño del experimento requirió un control humano externo para saltar las corrientes desde el script.

Es importante destacar que la celda debe termalizarse previo a iniciar las mediciones. Para el regimen de enfriamiento se midió durante hora y media, y antes de pasar al otro regimen invirtiendo la polar-

idad, se esperaron entre 20 y 30 minutos para que la celda vuelva a termalizar. Por la misma razón, la referencia tiene que reemplazarse luego de cada medición larga.

A su vez, se puede remover el ventilador del disipador de cobre, en cuyo caso el sistema alcanzaría el estacionario en un tiempo mucho más largo. Debido al límite de tiempo en este trabajo, se optó por utilizarlo. El soporte fue fundamental para asegurar el contacto entre las termocuplas, la celda y los disipadores; una conexión mala o débil no permite medir temperaturas correctas.

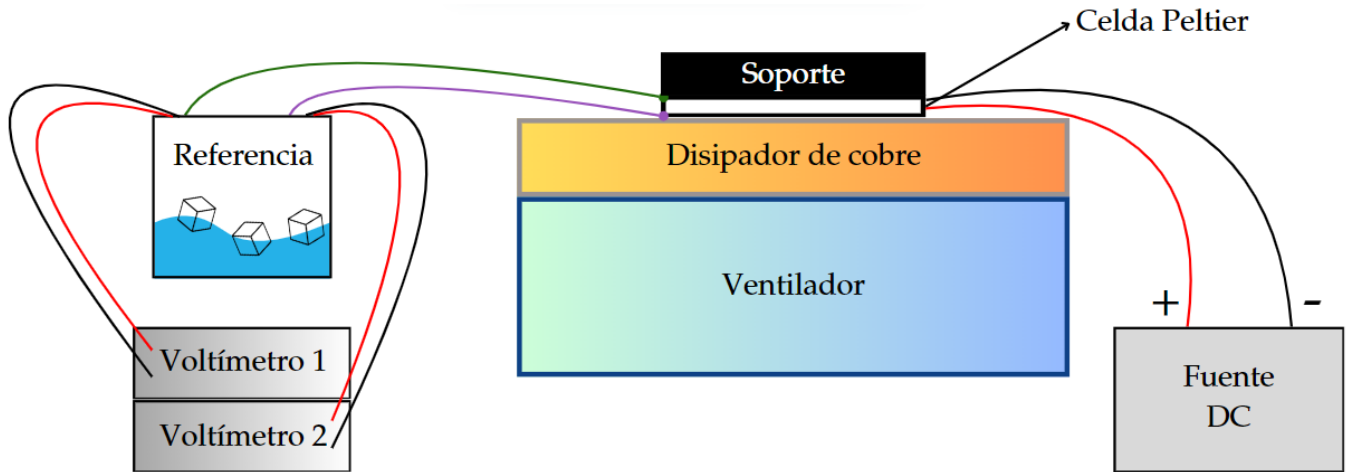


Fig. 3. Esquema del experimento de caracterización de la celda. Se colocó la celda encima de un disipador de cobre conectado mediante un soporte a un ventilador, que fijaba las tres partes. Se alimentó la celda con una fuente continua y se tomaron las mediciones de temperatura utilizando termocuplas a una referencia de agua con hielo; una para la cara caliente y otra para la cara fría. Dos voltímetros se utilizaron para tomar las mediciones de cada cara. Cuando se detiene la alimentación de la celda, la fuente - ahora en modo medición- adquiere datos de la caída de voltaje en la celda debido al gradiente de temperatura. Tanto el disipador de cobre como el ventilador ayudan en la disipación de calor de la cara inferior.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evolución de ΔT entre las caras de la celda a distintas corrientes para el enfriamiento y calentamiento de la misma se ven en Fig. 4 y Fig. 5 respectivamente. El criterio estadístico del estacionario puede revisarse en apéndice. Se observa como los datos de calentamiento alcanzan el estacionario para todas las corrientes gráficas aun cuando la diferencia de temperatura va aumentando. No ocurre lo mismo para la curva de enfriamiento, la cual a partir de 0.75 A llega a un rango en el cual no logra estabilizar luego de varios minutos. Puede observarse que lo máximo que logra enfriar la celda es hasta ~ 4.5 K, y de manera estable solo hasta ~ 3.0 K. Por otra parte, la celda puede calentar de manera estable hasta ~ 12.0 K en un tiempo menor comparado a lo que demora en enfriar. A su vez, no se notan inestabilidades en ningún momento

en este régimen.

Hay dos motivos principales que explican la inestabilidad; primero, las últimas corrientes estaban muy cerca del límite impuesto sobre la tensión enviada por la fuente con motivo de cuidar los equipos y al aumentar la corriente solo podía enviarse una alimentación limitada; segundo, la celda no es tan eficaz a la hora de enfriar como si es al calentar. La extracción de calor por parte de la celda puede no haber sido suficiente para poder contrarrestar los otros efectos térmicos (conductividad y efecto Joule) que entregan calor extra y provocan que nunca pueda alcanzarse un estacionario estable.

Dos soluciones pueden implementarse. Primero, utilizar equipos que admitan un rango de corrientes más amplio. Segundo, dejar la celda enfriando durante más tiempo y en un ambiente más controlado.

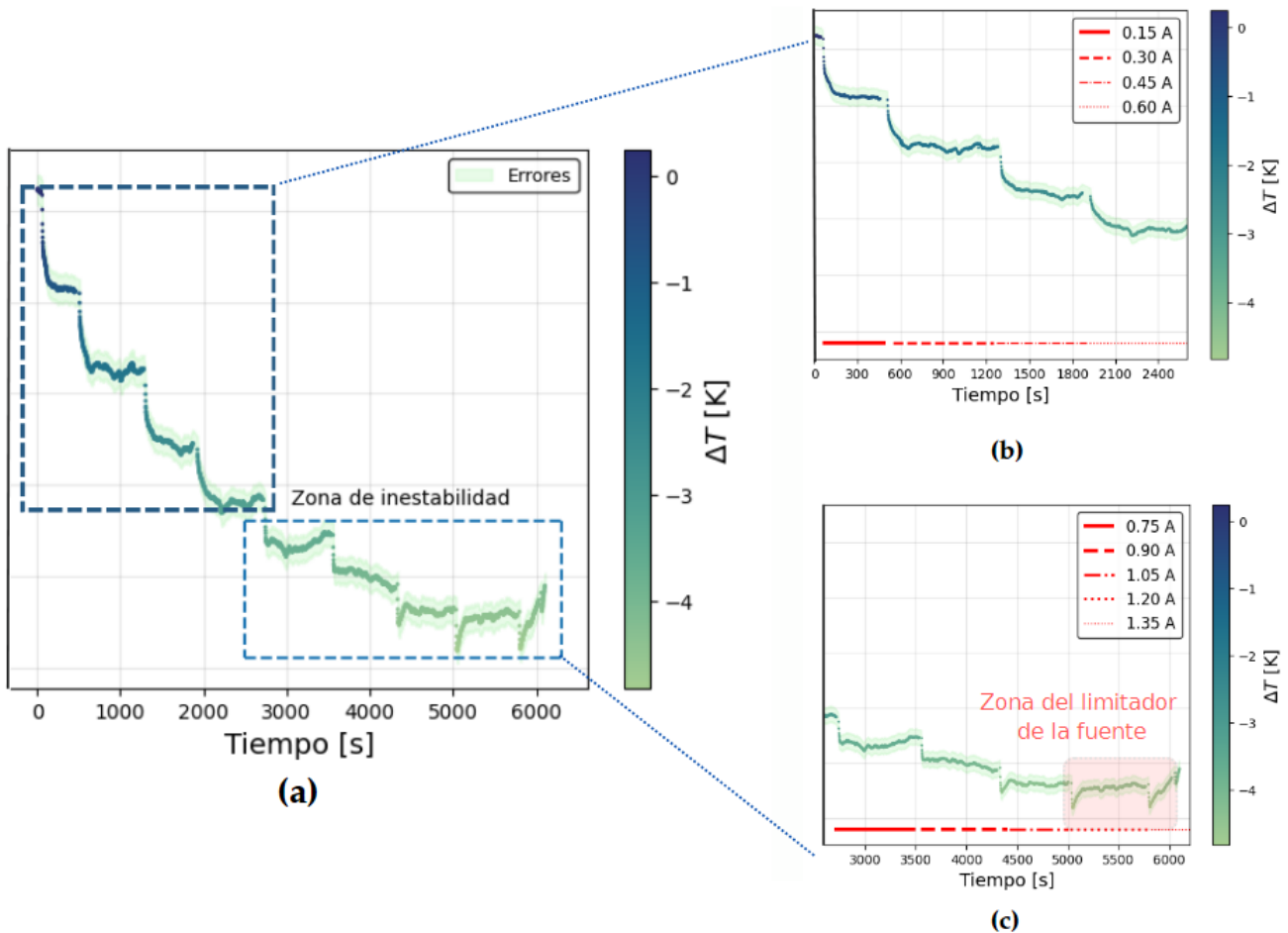


Fig. 4. Curva de enfriamiento de la celda. La diferencia de temperatura entre las caras de la celda aumenta al incrementar la corriente, desde 0 A hasta 1.75 A, y en esta polaridad la cara superior se enfría. Se observa una zona inestable cuando la diferencia de temperaturas se acerca a -3.5 K; a la celda le cuesta más llegar al estacionario. En (b) se observa la curva de enfriamiento estable; de aquí fueron extraídos los puntos ΔT previo al cambio de corriente. En (c) se realiza una ampliación sobre la zona inestable; enfatizamos en que el sistema no recupera un estacionario y vuelve a calentarse. Para 0.75, 0.90 y 1.05 A, todavía se observan una tendencia al estacionario; de aquí se extrayeron otros tres puntos ΔT ; luego de este punto, el limitador de voltaje de la fuente entró en juego evitando el aumento de corriente. La aparición de inestabilidades se debe a varios factores. En (a), (b) y (c) se duplicaron los errores para generar contraste.

Una vez alcanzado el estacionario se detuvo la alimentación y se tomaron los datos de ΔT . Para la datos de la curva de enfriamiento se tomó la última medición de ΔT antes de detener la alimentación, y la primera medición de tensión de la celda después de detenerla. El motivo puede revisarse en el apéndice 5. Con estos datos se hizo un ajuste lineal de la diferencia de tensión en la celda contra ΔT (Fig. 6). Los datos parecen seguir una relación lineal de acuerdo al valor del $R^2 = 0.969$. Del ajuste, usando la ec. (1) se obtuvo el coeficiente Seebeck $S = (0.0969 \pm 0.0023) \text{VK}^{-1}$.

En principio, estos resultados reflejan el carácter lineal del fenómeno. Una mejor curva puede obtenerse si la estabilidad de la curva de enfriamiento no fuera un inconveniente. Como solo se cambió la corriente dos veces para la curva de calentamiento, este análisis solo se realizó en el régimen de enfriamiento. Adquirir más datos de la curva de calentamiento ayudaría a comparar la asimetría entre el calentamiento y

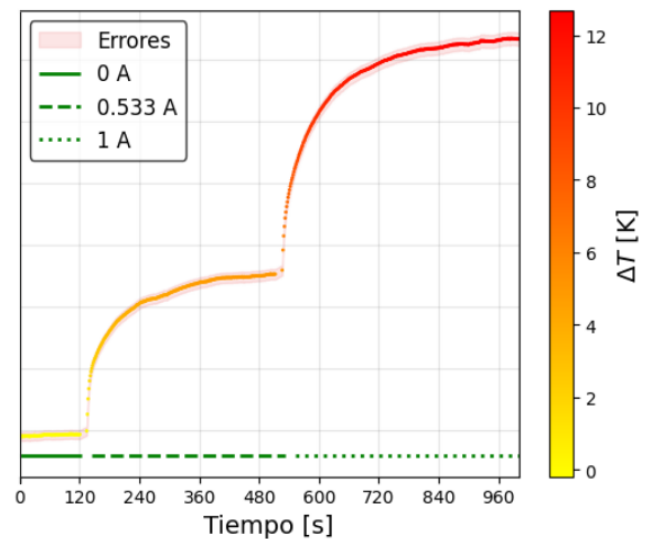


Fig. 5. Curva de calentamiento de la celda. La diferencia de temperatura entre las caras de la celda aumenta al aumentar la corriente, desde 0 A hasta 1.0 A y de esta manera la cara superior se calienta. La respuesta de la celda al cambio súbito de corriente es un calentamiento repentino y un estacionario luego de unos minutos. La celda puede calentarse hasta ~ 12.0 K. Los errores se han duplicado en el gráfico para generar contraste.

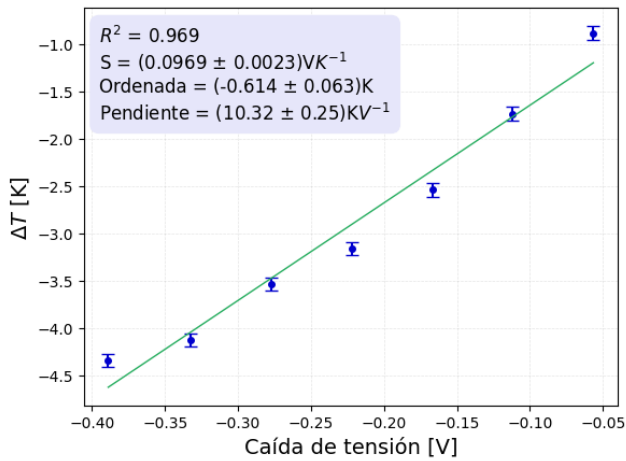


Fig. 6. Ajuste lineal de la diferencia de temperatura entre las caras de la celda a una dada diferencia de tensión al enfriarla. Del ajuste se obtuvo $R^2 = 0.969$, pendiente $(10.32 \pm 0.25) \text{ KV}^{-1}$ y ordenada $(-0.614 \pm 0.063) \text{ K}$. Gracias a la relación de proporcionalidad entre ambas variables se puede obtener el coeficiente Seebeck $S = (0.0969 \pm 0.0023) \text{ VK}^{-1}$

Para obtener el factor de mérito Z , se tuvo en cuenta la región de 0.3 A de los datos de la curva de enfriamiento. Siguiendo el criterio de 5, se tomó un subconjunto de los datos, tanto de ΔT como de la temperatura de la cara fría T_F . Calculando el promedio de estos datos se obtuvieron dos valores representativos para ΔT y T_F . Tomando la ec. (4), se obtuvo un valor de $Z = (4.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$. De una forma similar, se extrajeron datos de una potencia promedio entregada por la fuente a 0.3 A y usando la ec. (3) se calculó una resistencia de $R = (2.745 \pm 0.029) \Omega$. Utilizando los valores calculados de R y Z , junto a las dimensiones de la celda reportadas en el datasheet [5], de la expresión ec. (6) se obtuvo un valor de $\kappa = (0.1178 \pm 0.0070) \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Estos resultados se alinean con lo observado experimentalmente; la celda es ineficiente para enfriar, y tiende a calentarse por la contribución del efecto Joule y la conducción de calor. Un factor de mérito bajo indica que la celda es un dispositivo limitado para el enfriamiento, y esto nuevamente se observa en la Fig. 4. Por otra parte, los resultados de R y κ no concuerdan con la información provista por el datasheet del fabricante [5], lo que se explica en un desgaste del elemento por sobreutilización; no hay motivos para desconfiar que los valores obtenidos sean físicamente posibles.

4. CONCLUSIONES

La celda Peltier soluciona varios problemas del sobrecalentamiento electrónico; al no tener partes móviles y ser compacta, se utilizan con regularidad en pequeños dispositivos que necesiten ser enfriados o calentados. Son fácilmente trasladables y pueden ser integrados a circuitos electrónicos con mucha facilidad; el rango de temperaturas que admiten enfriar y calentar puede modificarse, siendo dispositivos fácilmente

controlables con la aplicación de corriente. Su única desventaja, como se ha estudiado en este trabajo, es la eficiencia y el rendimiento de estos dispositivos.

Los resultados obtenidos de $\kappa = (0.1178 \pm 0.0075)$, $R = (2.745 \pm 0.029) \Omega$, $S = (0.0969 \pm 0.0023) \text{ VK}^{-1}$ y $Z = (4.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$ son coherentes con lo observado experimentalmente. Los valores de κ y R discrepan con el valor provisto por el fabricante en la datasheet [5], sin embargo un aumento de ambos valores calienta aun más la celda (por el aumento del efecto Joule y la conducción de calor), haciéndola difícil de utilizarla para enfriar. Estos valores explican la asimetría entre utilizar la celda para calentar y utilizarla para enfriar. Son coherentes con el valor obtenido por la figura de mérito Z , que indica que la celda Peltier es ineficaz para el enfriamiento.

Varios comentarios pueden hacerse al respecto de como entender más de estos fenómenos y qué ventajas provee el experimento realizado en este trabajo con respecto a otros. En primer lugar, este experimento es fácilmente replicable con elementos básicos de cualquier laboratorio y se pueden graficar resultados en tiempo real, con la ventaja de un control humano en el sistema. En este sentido la obtención de datos es rápida y no es necesario esperar a un análisis para entender si las mediciones son correctas o no. En los aspectos negativos, los promedios estadísticos tomados no responden a parámetros físicos del sistema, los cuales son necesarios para entender si el estacionario observado en los gráficos corresponde a un estacionario. Esto puede solucionarse utilizando un lazo de control PID de control de la temperatura, que asegurará un estacionario en el sistema. Una segunda solución es tomar mediciones más largas en un ambiente más controlado; las referencias (el agua con hielo) cambia su temperatura con el tiempo lo cual puede afectar negativamente a las termocuplas. A su vez se puede utilizar una fuente que no posea un limitador de voltaje a bajas corrientes; el único problema es que las celdas Peltier no están hechas para ser alimentadas con corrientes arbitrariamente grandes. La mayoría de estas limitaciones son fácilmente solucionables en un algoritmo de medición.

Estos aspectos negativos no quitan que la utilizada puede calentar hasta $\sim 12.0 \text{ K}$ y enfriar hasta $\sim 4.5 \text{ K}$; en efecto, demuestra que es un dispositivo que puede utilizarse para el control de temperatura. Para calentar equipos compactos es una mejor solución que los dispositivos convencionales de compresión de vapor. Su versatilidad la hace un módulo útil para calentar elementos pequeños. Los autores consideran que las celdas son una herramienta útil y una solución a las dificultades electrónicas relacionadas al sobrecalentamiento, a la vez que concluyen que los resultados obtenidos son coherentes con lo observado en los gráficos presentados, si bien consideran que experimentos más controlados otorgarían resultados que no caigan en discusiones sobre la condición de estacionariedad.

5. APÉNDICES Y REFERENCIAS

Apéndice A - Suplemento teórico

Los dos fenómenos principales que juegan un rol en su funcionamiento son el *efecto Peltier* y el *efecto Seebeck*. Estos forman parte de los llamados *fenómenos termoeléctricos*, que son resultado de las agitaciones térmicas que poseen los portadores de carga [7].

El efecto Seebeck consta de la aparición de una diferencia de tensión neta debido a la diferencia de temperaturas entre las junturas de dos metales semiconductores diferentes conectados en serie. La relación entre el ΔV generado y la diferencia de temperatura ΔT entre las junturas está dada por

$$\Delta V = S \Delta T \quad (1)$$

donde S es el *coeficiente Seebeck*. Por otro lado, el efecto Peltier es el recíproco de Seebeck; la aparición de un flujo de calor entre las junturas cuando se le aplica una corriente. En este caso la relación entre la corriente I y el flujo de calor por unidad de tiempo \dot{Q} es:

$$\dot{Q} = \Pi I$$

donde Π es el *coeficiente Peltier*. La relación entre ambos fenómenos fue encontrado por Lord Kelvin, con la condición de que el proceso sea termodinámicamente reversible y los materiales posean simetría temporal

$$\Pi = S \Delta T \quad (2)$$

Con esta relación se puede conocer el comportamiento del efecto Peltier solo conociendo el coeficiente Seebeck.

La celda de Peltier utiliza la física del estado sólido para funcionar (véase [8] y [9] para más precisiones). Esta consta de una malla de micro-bloques compuestos por semiconductores de tipo P y N, intercalados y conectados en serie. Al fluir una corriente se produce un efecto Peltier neto sobre todo la malla, producto de pequeños aportes de cada una de las junturas. Esto produce un flujo de calor en un determinado sentido definido por la polaridad del circuito de la malla (ver Fig. 1). Este calor es disipado mediante caras hechas de un material cerámico. Durante el desarrollo del trabajo, la cara de la celda que *absorbe* calor se llamará *cara caliente* y la que *entrega* calor al ambiente será *cara fría*.

La potencia absorbida por la celda al ser alimentada por una corriente I [4] está dada por

$$P = S \Delta T I + I^2 R \quad (3)$$

Siguiendo la propuesta de Kraftmahker [4], una descripción cualitativa de la eficiencia puede darse mediante el *factor de mérito* Z , dado por:

$$Z = \frac{2 \Delta T_{\max}}{T_F^2} \quad (4)$$

donde ΔT_{\max} es la máxima diferencia de temperatura entre las caras que puede entregar la celda dada una

temperatura T_F en la cara fría. Ese ΔT_{\max} se alcanza en un estado estacionario cuando el flujo de calor por unidad de tiempo saliente de la cara fría \dot{Q}_F se vuelve nulo y el ΔT entre ambas caras no varía. Para cualquier régimen, \dot{Q}_F tiene la forma:

$$\dot{Q}_F = \dot{Q}_P - \dot{Q}_T - \dot{Q}_J = S \Delta T I - \kappa \frac{A}{L} \Delta T - \frac{1}{2} I^2 R \quad (5)$$

Puede observarse que el calor neto que la celda puede extraer mediante el efecto Peltier \dot{Q}_P , se ve disminuido por el calor presente de la conductividad térmica \dot{Q}_T y por el calor proveniente del efecto Joule \dot{Q}_J , que se distribuye equitativamente a ambas caras. Dependiendo de los valores de R y κ , estos dos efectos pueden volverse muy significativos, reduciendo así el rendimiento de la celda.

Finalmente, para obtener la conductividad térmica κ puede utilizarse otra expresión para el factor de mérito, $Z = S^2 L / R A \kappa$, donde L, A son el espesor y la sección de la celda, respectivamente [4]. De esta última relación puede despejarse κ como:

$$\kappa = \frac{S^2 L}{R A Z} \quad (6)$$

Obteniendo experimentalmente el coeficiente S y Z y conociendo las dimensiones de la celda, puede entonces calcularse la conductividad térmica con dicha relación.

Apéndice B - Suplemento estadístico

Criterios

A la hora de realizar las mediciones iterativas para las curvas de enfriamiento y calentamiento, el criterio para definir tal estacionario fue visual. A medida que se iban graficando los datos en pantalla, se observó que los valores de ΔT no variaran demasiado, solo oscilando alrededor de un valor fijo.

Para los datos utilizados para calcular el coeficiente Seebeck, el criterio fue el siguiente: por un lado, el ΔT era lo suficientemente estable justo antes de cortar la alimentación para utilizarlo como valor representativo. La estabilidad se correlaciona con el estado estacionario, definido por el primer criterio. Por otro lado, producto de que la celda no pudiese mantener una ΔT estable sin alimentación, la tensión en la celda caía demasiado rápido. Debido a esto el primer valor de tensión obtenido luego de interrumpir la alimentación era el más significativo.

Para tomar el subconjunto de datos utilizado en el cálculo de Z , R y κ , correspondiente a la región de 0.3 A, se tuvo en cuenta que los valores elegidos tuvieran una diferencia mutua menor a la incerteza de los datos, tomada como la desviación estándar de los mismos.

Calculo de incertezas

El error en temperatura se calculo de la siguiente forma

$$e_{\text{Temp}} = \left| \sum_{i=1}^N i a_i V^{i-1} \right| e_V$$

donde los coeficientes a_i dependen del rango de temperaturas en que se encuentra la celda (ver [6]) y N es el grado de los polinomios.

Para el resto de mediciones vale

$$e_Z = 2Z \sqrt{\left(\frac{e_{\Delta T}}{T}\right)^2 + \left(\frac{e_T}{T}\right)^2}$$

$$e_R = \sqrt{\left(\frac{e_P}{I^2}\right)^2 + \left(\frac{e_{\Delta T} S}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T e_S}{I}\right)^2}$$

$$e_K = |\kappa| \sqrt{\left(\frac{2e_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{e_Z}{Z}\right)^2 + \left(\frac{e_R}{R}\right)^2}$$

Referencias

- [1] H. D. NGUYEN, I. YAMADA, T. NISHIMURA, H. PANG, H. CHO, D. TANG, J. KIKKAWA, M. MITOME, D. GOLBERG, K. KIMOTO, T. MORI y N. KAWAMOTO, *STEM in situ thermal wave observations for investigating thermal diffusivity in nanoscale materials and devices*, Science Advances **10** eadj3825 (2024)
- [2] A. A. ALMUBARAK, *The Effects of Heat on Electronic Components*, Int. Journal of Engineering Research and Application **7** 52-57 (2017)
- [3] H. LIU, L. JIAO, H. LIN y L. LI, *Design and application research of portable reversible thermochromic patches in grid power supply systems*, AIP Advances **14** 045322 (2024)
- [4] Y. KRAFTMAKHER, *Simple experiments with a thermoelectric module*, Eur. J. Phys. **26** 959-967 (2005)
- [5] *Specification of Thermoelectric Module TEC1-12715*, link para descargar las especificaciones de la celda
- [6] *NIST temperature scale database (SRD 60)*, Version 3.0 link al sitio web
- [7] C. KITTEL, *Introduction to Solid State Physics*, 8th Edition, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [8] *Introduction to Thermoelectrics*, Tellurex Co.
- [9] *Frequently Asked Questions About Our Cooling And Heating Technology*, Tellurex Co.