

Informe 1: El Efecto Termoeléctrico

Emiliano Agoff, Facundo Otero Zappa y Sergio Stedile (Grupo 2)

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

Licenciatura en Ciencias Físicas | Laboratorio 4, 1°C 2023 | Jue. de 8:00 a 14:00 hs.

eagoff98@gmail.com , facuotero20.88@outlook.com , sergiogstedile@gmail.com

Resumen

En este trabajo, estudiamos el comportamiento de una celda Peltier comercial para entender su funcionamiento. Para esto medimos la evolución temporal de la temperatura de sus placas y graficamos las curvas correspondientes para una única celda y para configuraciones de celdas en serie tanto eléctricamente como térmicamente, con y sin baños térmicos. Pudimos probar que la celda Peltier es un elemento no lineal dado que su resistencia varía en función de la temperatura de las placas. Calculamos su coeficiente de Seebeck, su resistencia y su conductividad térmica en el estado estacionario y obtuvimos unos valores de $\alpha = (17.92 \pm 0.03) \frac{\text{mV}}{\text{K}}$, $R = (1.858 \pm 0.003) \Omega$ y $\kappa = (0.155 \pm 0.003) \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, respectivamente.

I. INTRODUCCIÓN

Se denomina *efectos termoeléctricos* a los procesos físicos en los cuales los fenómenos eléctricos y térmicos están relacionados entre sí. Un dispositivo termoeléctrico es capaz de generar tensión eléctrica cuando entre sus extremos hay una diferencia de temperatura, o bien transferir calor desde uno de sus extremos al otro cuando circula corriente eléctrica por él.

Existen tres tipos de efectos termoeléctricos: el *efecto Seebeck*, que consiste en la fuerza electromotriz que se produce entre dos conductores eléctricos unidos cuando éstos se encuentran en medios con distinta temperatura; el *efecto Peltier*, que consiste en la absorción y emisión de calor por cada uno de los conductores unidos cuando circula corriente sobre ellos; y el *efecto Thomson*, que es una generalización del efecto termoeléctrico y describe los dos anteriores simultáneamente, incluso cuando la relación entre tensión y temperatura no es constante. El *efecto Joule* no se considera un efecto termoeléctrico ya que a diferencia de los tres anteriores, no es reversible termodinámicamente [1].

Una celda Peltier es un dispositivo termoeléctrico que contiene semiconductores dopados (tipo N y P) dispuestos de a pares en su interior, y que tiene dos placas cerámicas en sus extremos que permiten el flujo de calor. La celda, puede utilizarse para generar corriente eléctrica o una diferencia de temperaturas ya que trabaja tanto por efecto Seebeck como por efecto Peltier. Cuando circula corriente por ella, entra y sale potencia térmica a través de las placas fría y caliente, respectivamente. En el estado estacionario, donde la diferencia de temperatura no varía significativamente, la potencia eléctrica P_e que entra en el dispositivo es igual a la diferencia de potencia térmica en las placas caliente P_C y fría P_F de la celda, respectivamente, de la forma [2]:

$$P_e = P_C - P_F = VI = \alpha I \Delta T + I^2 R, \quad (1)$$

donde V es la tensión eléctrica que circula por la celda de resistencia R , I la corriente eléctrica, α es el *coeficiente de Seebeck* de la celda y ΔT es la diferencia de temperatura entre las placas caliente y fría de la celda, respectivamente. Por último, de la ecuación (1) puede obtenerse una expresión más útil para realizar mediciones experimentales, de la forma:

$$\Delta T = \frac{V}{\alpha} - \frac{IR}{\alpha}. \quad (2)$$

Otro aspecto que resulta de interés estudiar en la celda Peltier es su *conductividad térmica*. La conductividad térmica de un material, denotada comúnmente κ , representa la habilidad que éste presenta para conducir el calor y en una celda Peltier puede expresarse como [2]:

$$\kappa = \frac{d}{A \Delta T} \frac{\partial Q(t)}{\partial t}, \quad (3)$$

donde d representa el espesor de la celda, ΔT la variación de temperatura entre sus extremos y $Q(t)$ el calor que atraviesa las placas de área A , de la placa caliente a la placa fría.

Conociendo la expresión de la conductividad térmica para una celda Peltier, si se utiliza un material cuya conductividad térmica es conocida y se lo pone en contacto térmico con ella, al llevar al sistema a un estado estacionario el flujo de calor que entra a la celda tiene que ser igual al que sale por el material conocido, por lo que utilizando la Ec. (3), podemos reescribir la conductividad térmica de la celda Peltier de la forma:

$$\kappa = \kappa_R \frac{d}{\Delta T} \frac{\Delta T_R}{d_R}, \quad (4)$$

donde κ_R , d_R y ΔT_R representan la conductividad térmica, el espesor y la variación de temperatura del material de referencia.

El objetivo de este trabajo consistió en caracterizar una celda Peltier comercial, estudiar su coeficiente de Seebeck (α), su resistencia eléctrica (R), su conductividad térmica (κ) y la evolución en el tiempo de la temperatura en las placas al pasar una corriente por ella (efecto Peltier) y el voltaje generado por la celda al generar una diferencia de temperaturas en sus extremos (efecto Seebeck). Por último, estudiamos tanto la generación de tensión como la de una diferencia de temperaturas mediante una configuración de dos celdas Peltier en serie, tanto térmicamente (una encima de otra) como eléctricamente (conectadas en serie).

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para todas las experiencias realizadas en este trabajo utilizamos una fuente Agilent B2901A [3] como fuente de tensión y como voltímetro y amperímetro, dos multímetros HP 34401A [4] y dos termocuplas tipo K. Se estudiaron celdas Peltier comerciales modelo 12706.

En primer lugar, estudiamos una única celda Peltier. Para ello, utilizamos un diagrama de conexión como el de la figura 1. Mediante la fuente Agilent, enviamos corriente continua a la celda en serie, conectamos las dos termocuplas en sus extremos en las placas fría y caliente, respectivamente, conectamos éstas a los multímetros HP en modo de voltímetro y colocamos a la celda en un disipador térmico que permitió fijar las termocuplas en las placas en sus extremos.

Mediante esta configuración, hicimos circular unas corrientes de $I = (0.500 \pm 0.002) \text{ A}$ e

$I = (1.000 \pm 0.002) \text{ A}$ por la celda con una

tensión limitadora de $V = (6.00 \pm 0.01) \text{ V}$ para generar una diferencia de temperatura en sus placas por efecto Peltier y medimos la evolución temporal de dichas temperaturas en un lapso de alrededor de 5 minutos, tomando una muestra por segundo en ambas placas, y asumiendo que se cumplía la ley de Ohm [5] en cada medición efectuada por segundo, calculamos la resistencia de la placa Peltier en función de la temperatura media de las placas.

Luego, enviando una tensión fija de $V = (3.00 \pm 0.01) \text{ V}$, realizamos otra medición pero en un lapso de tiempo mayor, mediante la diferencia de temperatura entre las placas fría y caliente y conociendo el valor de la corriente que circulaba por ellas, calculamos nuevamente la resistencia en función de la temperatura de ambas placas y hallamos el coeficiente de Seebeck de la celda Peltier en el estado estacionario.

Por otra parte, realizamos un baño térmico. Colocamos el disipador que contenía a la celda Peltier en un recipiente con agua junto a la placa fría y efectuamos las mediciones anteriores nuevamente. Registramos con un termómetro la temperatura del agua, que se encontraba en un valor de $T = (294.7 \pm 0.1) \text{ K}$ y con otro la temperatura ambiente, que se encontraba en $T = (297.2 \pm 0.1) \text{ K}$.

En segundo lugar, manteniendo las conexiones de la Fig. 1, colocamos el disipador donde se encontraba la celda Peltier en un recipiente con agua con hielo más pequeño que el utilizado anteriormente, junto a la placa fría. Junto a la placa caliente, colocamos una resistencia eléctrica de $R = (10.0 \pm 0.1) \Omega$ con una potencia de 15 W que soportaba

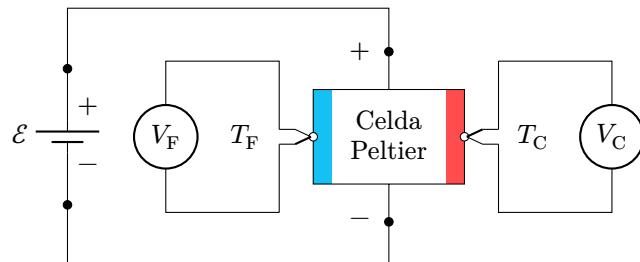


Figura 1: Esquema de conexión para caracterizar una celda Peltier. Una fuente de alimentación \mathcal{E} de corriente continua envía tensión constante a una celda Peltier en serie. Dos termocuplas T_F y T_C se encuentran conectadas en las placas fría y caliente de la celda, y los voltímetros V_F y V_C registran sus cambios de tensión, respectivamente.

hasta un valor de corriente de $I = (1.2 \pm 0.1) \text{ A}$ y pusimos pasta térmica en la unión U para una mayor transmisión de calor, como puede observarse en la Fig. 2. En esta ocasión, utilizamos a la fuente Agilent como voltímetro, y añadimos otra fuente de corriente continua modelo LG GP-4303D [6] para alimentar a la resistencia. Mediante este esquema de conexión medimos la tensión eléctrica generada por la celda Peltier a partir de la diferencia de temperatura entre placas, por efecto Seebeck.

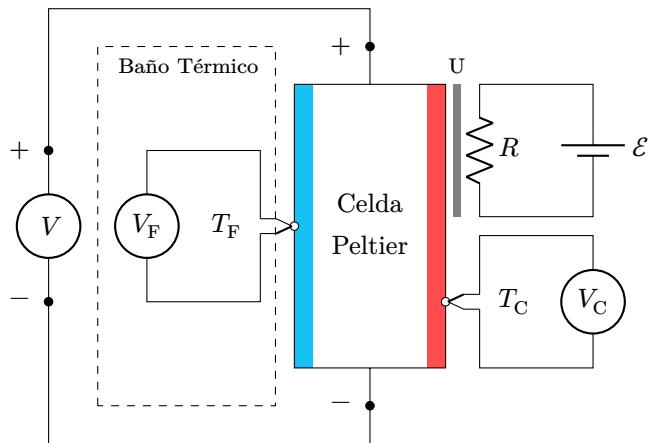


Figura 2: Esquema de conexión para generar electricidad a partir de una diferencia de temperaturas por efecto Seebeck. Un voltímetro V registra la tensión generada por la celda Peltier. La placa fría se encuentra junto a un baño térmico de agua y una termocupla T_F conectada a un voltímetro V_F registra su temperatura. La placa caliente se encuentra junto a una resistencia R alimentada por una fuente de corriente continua \mathcal{E} , mediante una unión U con pasta térmica y la termocupla T_C conectada al voltímetro V_C registra su temperatura.

Por último, calculamos la conductividad térmica de la celda Peltier, mediante un esquema de conexión como el de la Fig. 2, utilizamos un baño térmico con agua (sin hielo) y removimos la resistencia R con su respectiva fuente \mathcal{E} . Empleamos al agua del baño térmico como material de conductividad térmica conocida, cuyo valor es de $\kappa_{\text{agua}} = (0.58 \pm 0.01) \text{ W}/(\text{mK})$ [7] e hicimos circular corriente por la celda, llevando a la misma hacia un estado estacionario. En ese punto, medimos la diferencia de temperatura entre las placas de la celda y entre la placa fría y el agua. Medimos el espesor de la placa, con un valor de $(3.84 \pm 0.01) \text{ mm}$, y el espesor del agua que contenía el recipiente utilizado, con un valor de $(22.06 \pm 0.01) \text{ mm}$.

Finalmente, estudiamos el comportamiento de celdas Peltier en serie. Para ello, realizamos primeramente un diagrama de conexión como el de la Fig. 3. Utilizamos el mismo esquema que el de la Fig. 1 pero en esta ocasión, conectamos dos celdas Peltier en serie eléctricamente y colocamos una termocupla en una placa fría de una de ellas, y una termocupla en la placa caliente de la otra. En esta práctica experimental repetimos las experiencias anteriores, registramos los cambios de temperatura en función del tiempo cuando circulaba una corriente por las celdas por efecto Peltier y medimos la resistencia de las celdas en su conjunto, en función de la temperatura media.

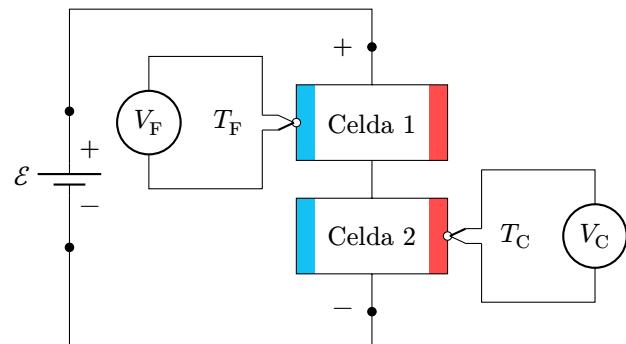


Figura 3: Esquema de conexión para caracterizar dos celdas Peltier conectadas en serie eléctrica. Los componentes corresponden a los utilizados en la Fig. 1, pero en esta ocasión la termocupla T_F registra los cambios de temperatura en la placa fría de la celda 1, y la termocupla T_C los de la placa caliente de la celda 2.

Luego, realizamos un baño térmico nuevamente para la disposición de las dos celdas en serie, como puede observarse en la Fig. 4. En esta ocasión, registramos la tensión generada por ambas celdas por la fuente Agilent en modo voltímetro V añadiendo un baño térmico de agua con hielo junto a la placa fría de la primera celda, que colocamos previamente en un disipador térmico, y una resistencia R (la misma utilizada anteriormente) conectada a la fuente \mathcal{E} junto a la placa caliente de la segunda, que se encontraba también en un disipador térmico.

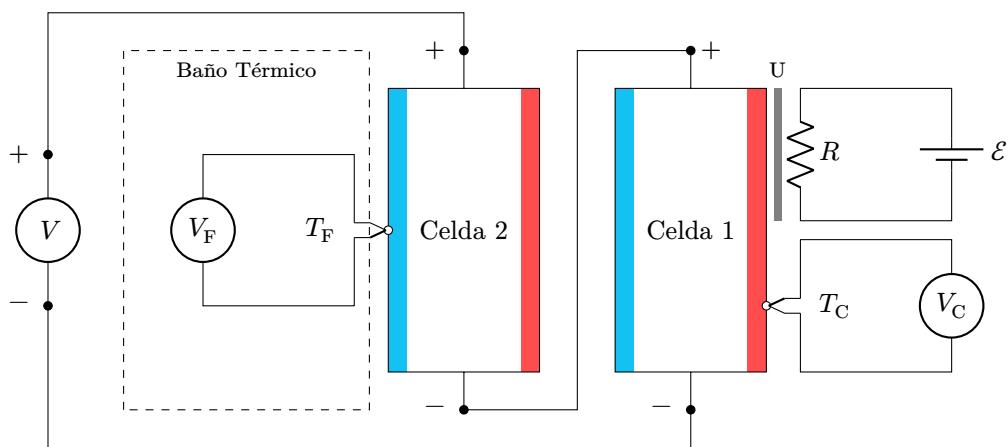


Figura 4: Esquema de conexión para generar electricidad a partir de una diferencia de temperaturas con dos celdas Peltier conectadas en serie. El esquema realizado corresponde al de la Fig. 3, habiendo colocado a la celda 1 en un baño térmico y a la celda 2 la resistencia utilizada anteriormente (Fig. 2). La fuente \mathcal{E} se utilizó nuevamente, como amperímetro.

Como práctica experimental adicional, estudiamos el comportamiento de las dos celdas Peltier en serie térmicamente, es decir, una encima de otra. Para ello, mantuvimos el esquema de conexión de la Fig. 4 pero medimos con el voltímetro la tensión generada por una única celda (celda 1), por efecto Seebeck. Colocamos pasta térmica en la placa caliente de la celda 1, y en la placa fría de la celda 2 y las unimos. La celda 2 no se encontraba conectada, contaba únicamente con la resistencia en su placa caliente y la termocupla registró su cambio en la tensión. De esta forma las dos celdas actuaban como una única celda y la diferencia de temperaturas entre la placa fría de la celda 1 que se encontraba en un baño térmico con agua con hielo y la placa caliente de la celda 2 con la resistencia generaba la tensión que registraba el voltímetro.

De todas las prácticas experimentales realizadas, registramos los datos en una computadora y los analizamos, como se veremos en la siguiente sección.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Evolución Temporal De La Temperatura

1. Celda Única

Con respecto a la caracterización de la celda Peltier, tras enviar a la celda los valores de corriente de $I = (0.500 \pm 0.002)$ A e $I = (1.000 \pm 0.002)$ A mediante el esquema de conexión de la Fig. 1, registramos con las termocuplas la evolución temporal de la temperatura tanto de la placa fría como de la placa caliente, como puede observarse en la Fig. 5. Al momento de la medición, la temperatura ambiente se encontraba en un valor de $T = (299.0 \pm 0.1)$ K.

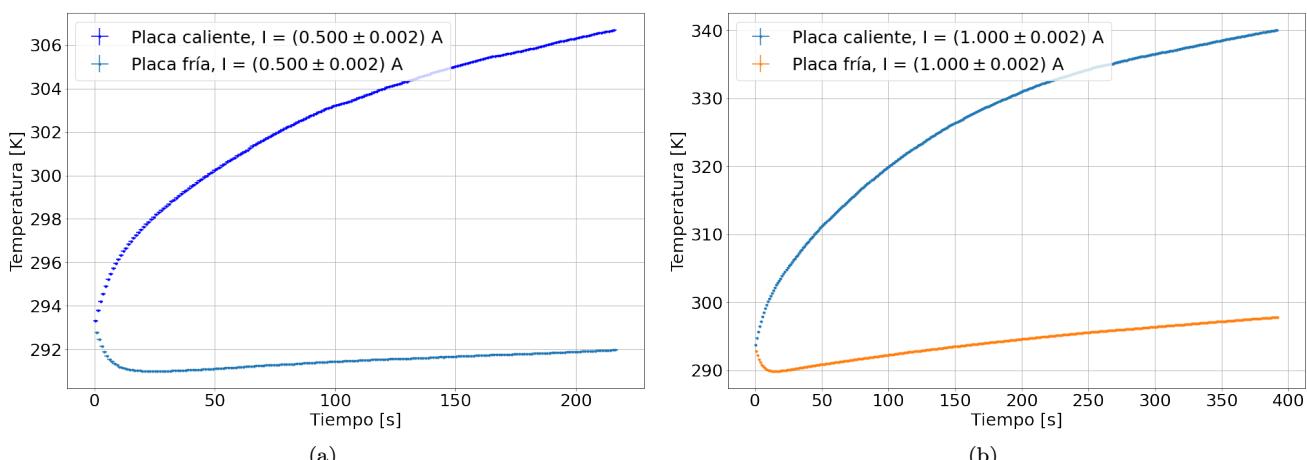


Figura 5: Caracterización de una celda Peltier mediante el esquema de conexión de la Fig. 1. Efecto Peltier observado al medir la temperatura en función del tiempo en ambas placas de la celda Peltier cuando circulaba por ella una corriente continua.

Como podemos notar en la Fig. 5 (a), para un valor de corriente de $I = (0.500 \pm 0.002)$ A las temperaturas de las

placas evolucionaron según el efecto Peltier. A tiempo cero, ambas placas se encontraban en equilibrio térmico con el ambiente (a una temperatura ligeramente menor) y cuando comenzó a circular corriente por la celda, la placa caliente (mediciones azules) empezó a aumentar su temperatura y la placa fría (mediciones celestes) a disminuirla. Podemos ver que este comportamiento se mantuvo alrededor de 25 segundos, y luego la placa fría comenzó a calentarse hasta el final de las mediciones. Creemos que este hecho se debe a que la placa fría absorbió parte del calor generado por la placa caliente. Aún así, la placa fría se encontró por debajo de la temperatura ambiente en su evolución. La placa caliente alcanzó unos una temperatura máxima de $T_{\text{máx.}} = (307 \pm 1) \text{ K}$.

Con respecto a la Fig. 5 (b), pudimos observar el mismo comportamiento, con la salvedad de que en esta ocasión el aumento de temperatura de ambas placas fue más rápido, y la placa fría comenzó a calentarse más temprano. En esta ocasión las temperaturas alcanzadas por ambas placas fueron mayores, y la placa fría superó la temperatura ambiente debido a la absorción del calor generado por la otra placa. Según la Ec. (1), debido a que el efecto Joule establece que la potencia disipada por una resistencia es proporcional a la corriente cuanto más grande es su valor, mayor calor es disipado, lo que explica el comportamiento observado.

2. Configuración En Serie

Con respecto a la caracterización de la configuración de dos celdas Peltier conectadas en serie eléctrica, mediante el esquema de conexión de la Fig. 3 y con una temperatura ambiente de $T = (297.0 \pm 0.1) \text{ K}$ al momento de la medición, efectuamos las mismas mediciones realizadas para una celda única al enviar una corriente de $I = (0.500 \pm 0.002) \text{ A}$, como puede observarse en la Fig. 6.

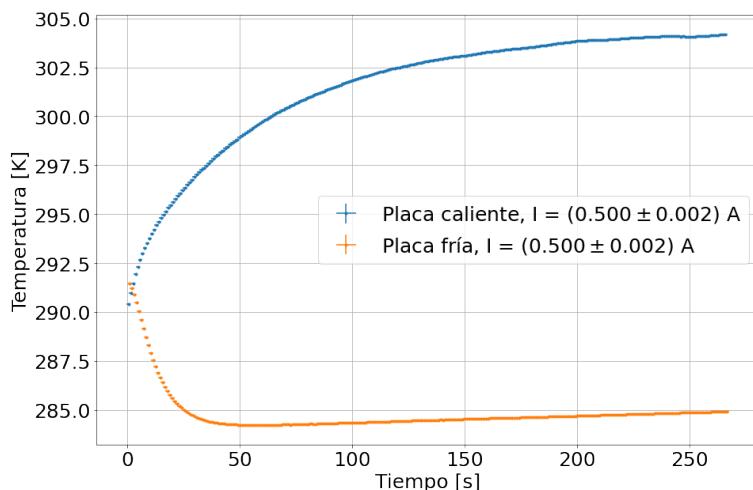


Figura 6: Caracterización de dos celdas Peltier conectadas en serie eléctrica mediante el esquema de conexión de la Fig. 3. Efecto Peltier observado al medir la temperatura en función del tiempo de la placa fría de una de las celdas Peltier y de la placa caliente de la otra cuando circulaba por ellas una corriente continua.

Como podemos notar, el comportamiento de ambas celdas es similar al observado en la Fig. 5. En esta ocasión, utilizamos únicamente un valor de corriente ya que las mediciones anteriores resultaron similares, y enviamos poca corriente para evitar una disipación pronunciada de calor por efecto Joule. Si bien la placa caliente de la celda 2 alcanzó una temperatura máxima similar a la de una celda única, la placa fría de la celda 1 se encontró aproximadamente a unos 10 K por debajo de la temperatura ambiente por lo que obtuvimos un mejor enfriamiento del sistema de 2 celdas en esta configuración, y no una mejoría en el aumento de temperatura con respecto a las mediciones de una celda única.

B. Estudio De Linealidad (Ley De Ohm)

1. Celda Única

Con respecto al comportamiento de la celda Peltier como elemento lineal, estudiamos la validez de la ley de Ohm y cómo los cambios en la temperatura de sus placas afectaban al valor de su resistencia eléctrica interna. Para ello, medimos la temperatura media entre ambas placas de la celda en función de la tensión enviada por la fuente (asumiendo la ley de Ohm en cada instante para la corriente enviada) utilizando el esquema de conexión de la Fig. 1. Con una temperatura ambiente de $T = (299.0 \pm 0.1) \text{ K}$ y enviando unos valores de corriente continua de $I = (0.500 \pm 0.002) \text{ A}$ e $I = (1.000 \pm 0.002) \text{ A}$, registramos los datos obtenidos como puede observarse en la Fig. 7.

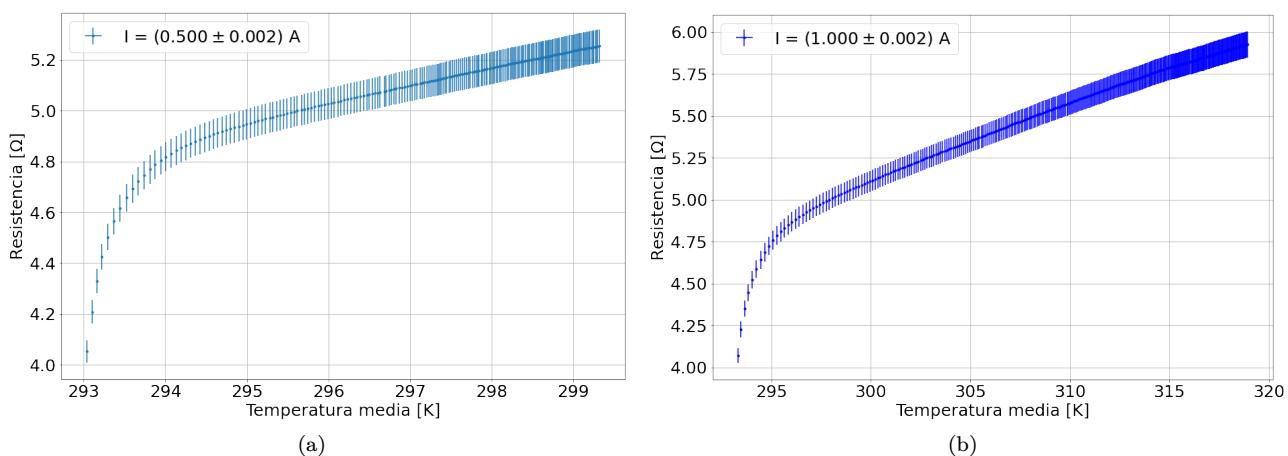


Figura 7: Estudio de la celda Peltier como elemento lineal. Resistencia en función de la temperatura media entre las placas cuando circulaba por ella una corriente continua.

Como podemos ver en la Fig. 7 (a), la resistencia eléctrica de la celda Peltier presenta un comportamiento creciente: cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre las placas, mayor es la oposición al paso de corriente. Además, en las primeras mediciones obtenidas el crecimiento es muy abrupto y se vuelve más uniforme cuando la temperatura media es aproximadamente mayor a $T = (295.0 \pm 0.1)$ K. La resistencia no presentó una tendencia lineal constante en su forma funcional y por lo tanto podemos concluir que la celda Peltier es un elemento no lineal ya que no satisface la ley de Ohm.

Con respecto a la Fig. 7 (b) la forma funcional obtenida fue análoga, y el valor de la resistencia eléctrica se mantuvo en aumento para valores mayores de temperatura media, por lo que observamos una vez más el comportamiento de la celda como un elemento no lineal.

2. Configuración En Serie

A continuación, estudiamos el comportamiento de dos celdas Peltier en serie eléctrica como elemento lineal al igual que en la experiencia anterior, utilizando un esquema de conexión como el de la Fig. 3. En este caso, con una temperatura ambiente de $T = (297.0 \pm 0.1)$ K, enviamos una corriente continua con un valor de $I = (0.500 \pm 0.002)$ A, como puede observarse en la Fig. 8.

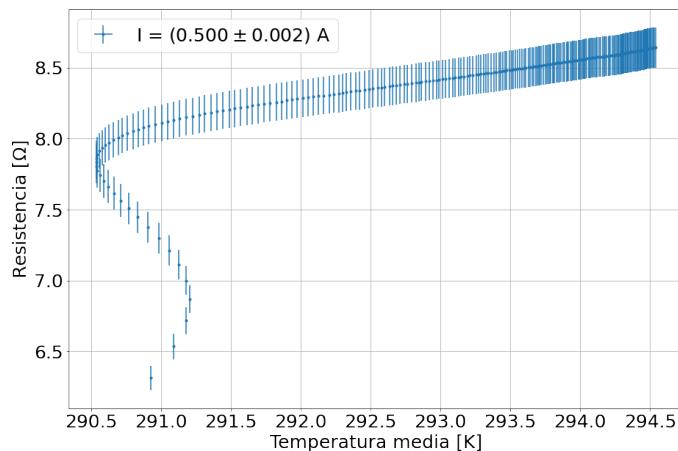


Figura 8: Estudio de dos celdas Peltier en serie como elemento lineal. Resistencia en función de la temperatura media entre la placa fría de la celda 1 y la placa caliente de la celda 2 cuando circulaba por ella una corriente continua.

En esta ocasión, las mediciones obtenidas no representaron siquiera el gráfico de una función. Obtuvimos una curva con un comportamiento oscilante en puntos cercanos a su inicio para los valores de temperatura media iniciales y con un comportamiento creciente en su resistencia eléctrica, presentando una tendencia lineal para valores altos de temperatura media, en el estado estacionario. Para las mediciones iniciales la resistencia aumentó bruscamente y en mediciones posteriores lo hizo más lentamente. Este resultado refleja nuevamente cómo el valor de la temperatura media entre placas afecta a la resistencia interna de la celda, por lo que podemos concluir una vez más que la

resistencia no es constante en función de la temperatura y por lo tanto, no se satisface la ley de Ohm y el sistema se comportó como un elemento no lineal.

C. Comportamiento En Baño Térmico

1. Celda Única

Con respecto al comportamiento de la celda Peltier al utilizar un baño térmico, repetimos las mediciones realizadas anteriormente, colocando al difusor que sujetaba firmemente a la celda en un recipiente con agua junto a su placa fría. Con una temperatura ambiente de $T = (297.0 \pm 0.1)$ K y una temperatura del agua de $T_{\text{agua}} = (294.0 \pm 0.1)$ K, utilizando el esquema de conexión de la Fig. 1 y enviando los mismos valores de corriente continua de antes a la celda, graficamos los datos obtenidos como puede observarse en la Fig. 9.

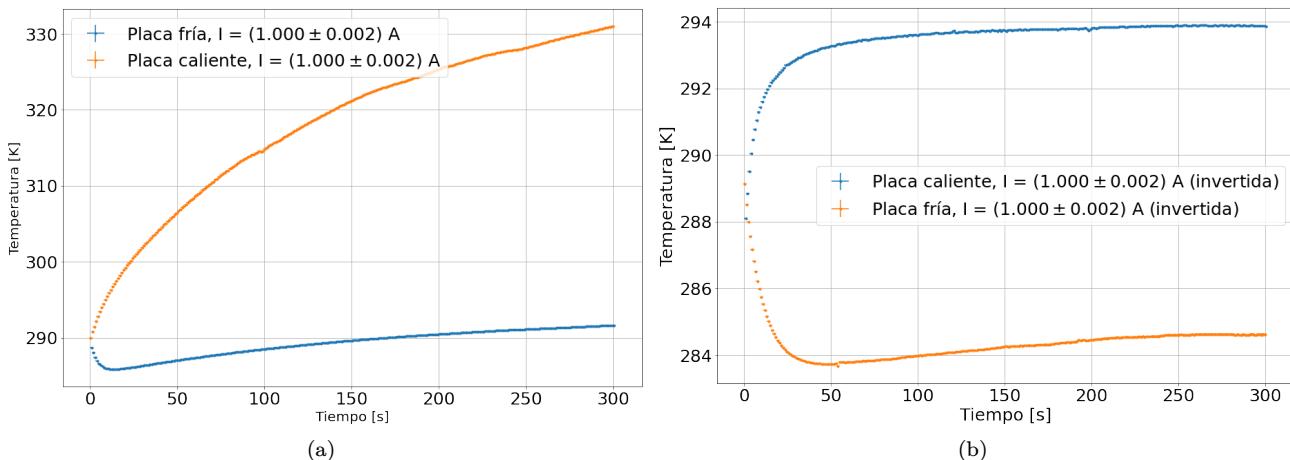


Figura 9: Evolución temporal de la temperatura de las placas de la celda Peltier utilizando un baño térmico con agua cuando circulaba por ella una corriente continua con (a) la placa fría junto al baño térmico y (b) la placa caliente junto al baño térmico.

Como podemos notar en la Fig. 9 (a), las mediciones obtenidas fueron similares a la de una celda única para el mismo valor de corriente, pero en esta ocasión el baño térmico evitó que la placa fría se calentara tanto. Si bien la temperatura ambiente era menor en esta ocasión su comportamiento fue significativamente mejor.

Luego, colocamos la placa caliente junto al baño térmico y estudiamos el comportamiento de la celda, como puede observarse en la Fig. 9 (b). En esta ocasión la forma funcional de las temperaturas fueron diferentes. La placa caliente (en azul) se calentó rápidamente, y alcanzó un estado estacionario más rápido al encontrarse junto al baño térmico, y lo hizo por debajo de la temperatura ambiente debido a que el agua ayudó a disipar el calor, mientras que la placa fría (naranja) se enfrió bastante y logró mantener su temperatura por debajo del ambiente.

Por último, medimos nuevamente la resistencia de la celda en función de la temperatura media al efectuar el baño térmico, como puede observarse en la Fig. 10. En este caso, la forma funcional se mantuvo en forma análoga a la obtenida anteriormente en la Fig. 7 (b).

2. Configuración En Serie

En esta ocasión, repetimos las mediciones realizadas anteriormente pero utilizamos dos celdas Peltier con el esquema de conexión de la Fig. 3, enviamos una corriente continua de $I = (0.500 \pm 0.002)$ A y colocamos el difusor de la celda 1 en un baño de agua a una temperatura de $T_{\text{agua}} = (294.0 \pm 0.1)$ K más fría que el ambiente, que se encontraba a $T = (297.0 \pm 0.1)$ K. De esta forma estudiamos si el comportamiento del sistema era distinto al observado en las mediciones anteriores.

Como podemos observar en la Fig. 11 (a), el comportamiento fue similar al de mediciones anteriores, pero el aumento en la temperatura de la placa caliente de la celda 2 y la disminución de la fría de la celda 1 fueron más significativas en los primeros datos.

Como podemos ver en la Fig. 11 (b), al invertir las placas de las celdas, obtuvimos un comportamiento uniformemente decreciente en la evolución temporal de la temperatura de la placa fría, mientras que en la placa caliente el aumento en temperatura fue brusco, y el hecho de que haya dos celdas conectadas en serie eléctrica ocasionó que su régimen

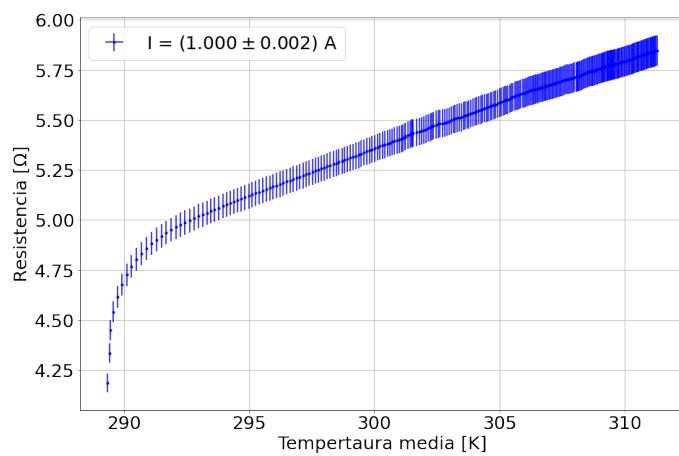


Figura 10: Resistencia en función de la temperatura media entre las placas de la celda Peltier en baño térmico con agua junto a la placa fría, cuando circulaba por ella una corriente continua.

estacionario se produzca en un valor mayor al de la temperatura ambiente, es decir, el agua no pudo evitar de todas formas que la placa caliente de la celda 2 se calentara.

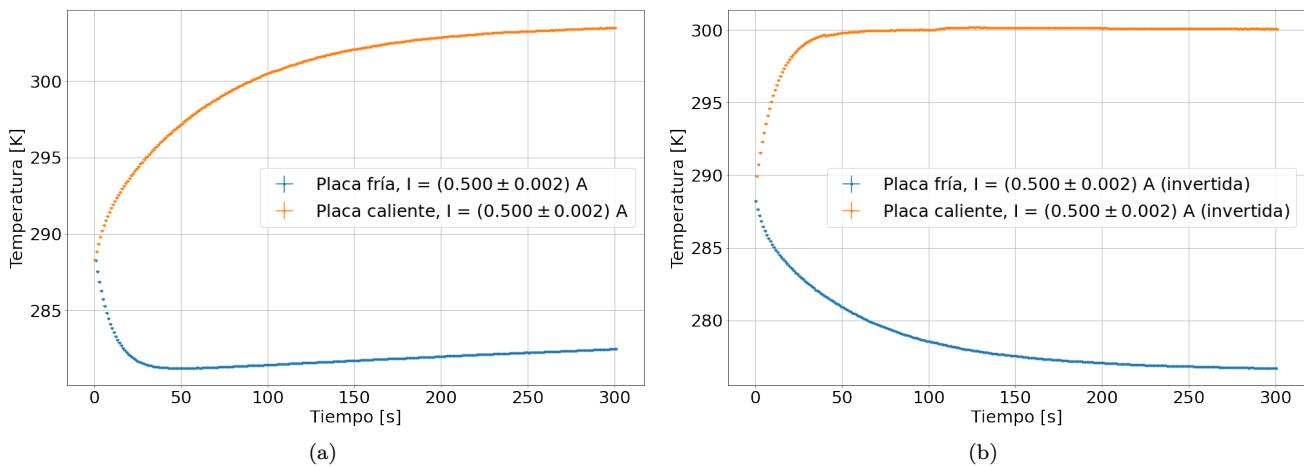


Figura 11: Evolución temporal de la temperatura de las placa fría de la celda 1 y la placa caliente de la celda 2 para ambas celdas conectadas en serie eléctrica cuando circulaba por ellas una corriente continua con (a) la placa fría de la celda 1 junto al baño térmico y (b) la placa caliente de la celda 1 junto al baño térmico.

Finalmente, para la configuración de celdas en serie, medimos como antes la resistencia en función de la temperatura media de la placa fría de la celda 1 y la placa caliente de la celda 2 y también cuando se encontraban invertidas.

Como podemos observar en la Fig. 12 (a), medimos una curva similar a la obtenida anteriormente en la Fig. 8, con su oscilación en los valores iniciales de temperatura menos pronunciada, y un incremento en la resistencia para las mediciones posteriores, alcanzando el estacionario en menor cantidad de mediciones. Por otra parte, en la Fig. 12 (b) con las placas invertidas podemos notar que se obtiene una curva similar. En este caso la temperatura media se incrementa continuamente y alcanza un valor máximo en lugar de mínimo, para decaer muy uniformemente para valores de resistencia mayores a 8Ω .

Con estas experiencias comprobamos nuevamente el comportamiento de las celdas Peltier como elementos no lineales.

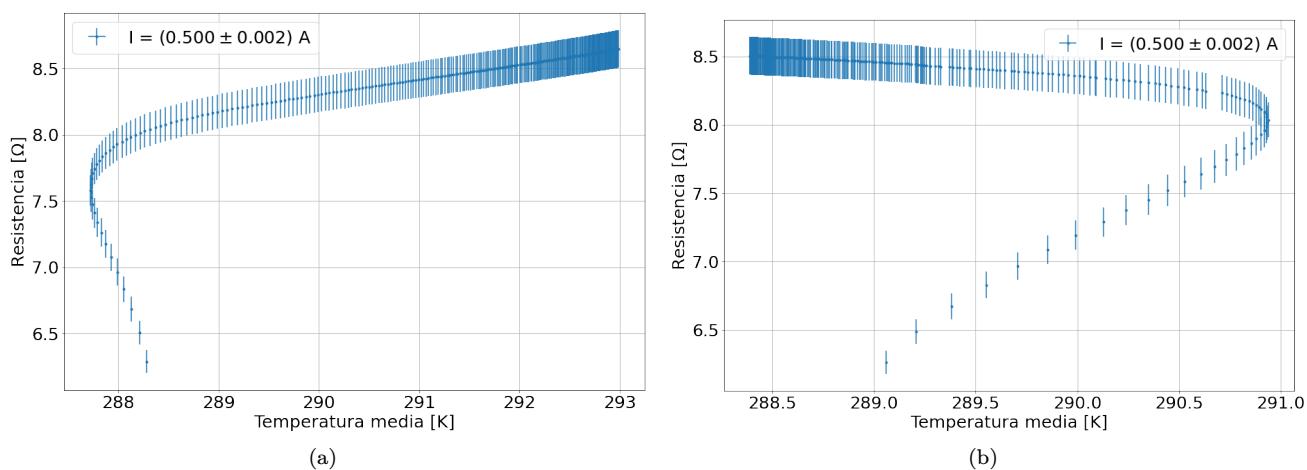


Figura 12: Resistencia en función de la temperatura media para las celdas conectadas en serie eléctricamente medida entre (a) la placa fría de la celda 1 que se encontraba junto al baño térmico y la placa caliente de la celda 2, y (b) la placa caliente de la celda 1 que se encontraba junto al baño térmico y la placa fría de la celda 2, respectivamente. Por ambas celdas circulaba una corriente continua.

D. Propiedades Físicas De La Celda Peltier

Con respecto a las propiedades físicas de la celda Peltier, en primer lugar calculamos su conductividad térmica mediante la Ec. (4). Para ello, utilizando el esquema de conexión de la Fig. 2 y al agua como material de referencia, con los espesores de la placa y el agua y tomando la última medición de temperatura de ambas placas en el estado estacionario, obtuvimos un valor de conductividad térmica de $\kappa = (0.155 \pm 0.003) \frac{\text{W}}{\text{mK}}$.

Por otra parte, para hallar el coeficiente de Seebeck y la resistencia eléctrica interna de la celda, utilizando el esquema de conexión de la Fig. 1, enviamos una tensión fija de $V = (3.00 \pm 0.01)$ V, medimos la diferencia de temperatura entre las celdas y la variación de corriente y pudimos ajustar linealmente la temperatura en función de la corriente en el estado estacionario según la Ec. (2), como podemos observar en la Fig. 13.

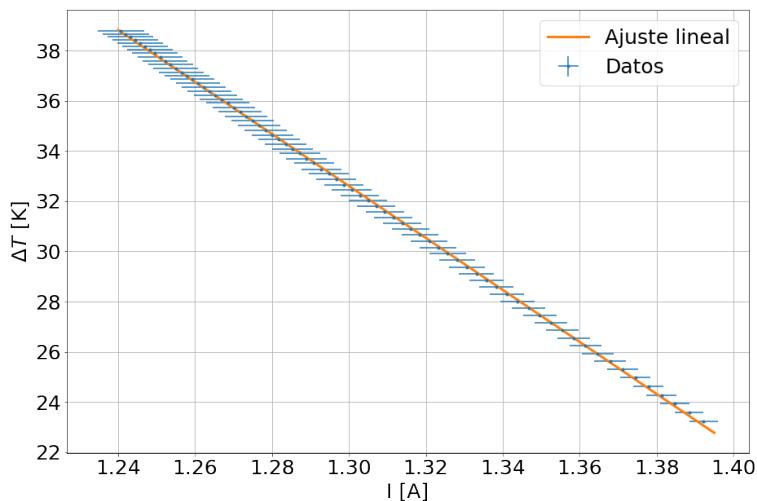


Figura 13: Diferencia de temperatura entre las placas de la celda Peltier en función de la corriente en el estado estacionario. Ajuste lineal de las mediciones realizado mediante la Ec. (2).

El valor del χ^2 del ajuste tiene un valor de 11270. Este valor puede deberse a los errores adjudicados a las temperaturas, los cuales son pequeños. Estos mismos pueden estar siendo subestimados. Sin embargo, se ve en el gráfico que el modelo lineal describe el comportamiento de los datos analizados.

Del ajuste lineal realizado, pudimos extraer los valores de la resistencia interna de la celda Peltier y el coeficiente de Seebeck, los cuales dieron como resultado $R = (1.858 \pm 0.003) \Omega$ y $\alpha = (17.92 \pm 0.03) \frac{\text{mV}}{\text{K}}$.

E. Estudio Del Efecto Seebeck

Por último, estudiamos el efecto Seebeck tanto para la configuración de celda única como dos celdas en serie eléctricamente y térmicamente. En primer lugar, utilizando el esquema de conexión de la Fig. 2, colocamos al disipador que contenía a la placa fría junto a un baño térmico con agua con hielo, y con una resistencia calentamos la placa caliente y registramos la tensión generada por la celda Peltier.

Luego repetimos la experiencia con las dos celdas en serie eléctrica. Utilizando el esquema de conexión de la Fig. 4 colocamos al disipador que contenía a la placa fría de la celda 1 junto a un baño térmico con agua con hielo y sobre la placa caliente de la celda 2 la resistencia. Por último, desconectamos la celda 2 y pusimos a las celdas en serie térmicamente. Las tensiones generadas por las celdas se muestran en la Fig. 14.

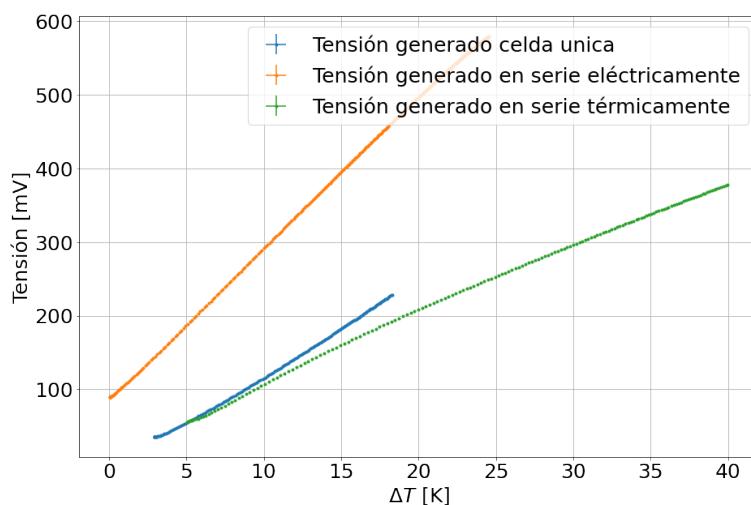


Figura 14: Estudio del efecto Seebeck en celdas Peltier para distintas configuraciones, celda única, dos celdas en serie eléctrica y dos celdas en serie térmica. Tensión generada a partir de provocar una diferencia de temperaturas con un baño térmico con agua con hielo para la placa fría respectiva y una resistencia eléctrica que generaba calor por efecto Joule para la placa caliente correspondiente.

Podemos observar que la configuración que genera mayor tensión es la configuración en serie eléctrica. Además, la tensión generada por una celda sola y dos celdas en serie térmica (una encima de la otra) para valores de temperatura pequeños son similares, pero para mediciones mayores la celda única genera más tensión que las dos celdas en serie térmica. Esto podría deberse a que cuando las celdas se encontraban en contacto térmico la absorción y emisión de calor por efecto Peltier es más lenta. Como podemos observar la tensión generada por las tres configuraciones presentó una forma funcional creciente prácticamente lineal.

IV. CONCLUSIONES

Al estudiar el comportamiento de la celda Peltier al circular por ella una corriente continua, se encontró que la diferencia de temperatura entre las caras se intensifica cuanto mayor es la corriente según el efecto Peltier. Sin embargo, una vez alcanzado el estacionario con una corriente de $I = (1.000 \pm 0.002)$ A, la placa más caliente comenzó a cederle calor a la placa más fría a tal punto que la diferencia de temperatura alcanzada era menor que para corrientes menores. Además, se vio como el efecto Joule producía un aumento de la temperatura de ambas placas para corrientes elevadas.

Por otra parte, se calculó el coeficiente de Seebeck mediante un ajuste lineal de los datos de la diferencia de temperatura de las placas en función de la corriente. Es importante remarcar que se observó linealidad de los datos en las primeras mediciones, por lo que se descartaron los datos posteriores. El valor final obtenido fue $\alpha = (17.92 \pm 0.03) \frac{\text{mV}}{\text{K}}$, y se observó que este no depende de la temperatura. También hayamos la resistencia de la celda en el estado estacionario, cuyo valor fue de $R = (1.858 \pm 0.003) \Omega$.

Finalmente, al repetir la experiencia colocando el difusor en agua con hielo, se observó que la diferencia de temperatura entre las placas alcanzaba un valor estacionario más rápidamente que antes. Esto se debe a que los efectos de difusión de calor son menores dentro de la celda al estar la cara caliente en contacto con el agua, prefiriendo ceder su calor a ella en lugar de la cara fría de la celda.

En el marco de la generación de tensión a partir de una diferencia de temperaturas (efecto Seebeck). Notamos que las configuraciones propuestas para lograr este objetivo presentan características diferentes. Mientras que la configuración de celdas en serie eléctrica es la que genera más tensión para una menor diferencia de temperatura entre las placas, la configuración de celdas en serie térmica es la que consigue generar una mayor diferencia de temperatura entre ellas, aunque no genere tanta tensión. Tiene sentido que la generación de mayor tensión se produzca con dos placas en serie eléctrica debido a que es como conectar dos resistencias en serie.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Disalvo, F.J. (1999). *Thermoelectric Cooling and Power Generation*. Science. Thermoelectric effect. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
- [2] <https://stefani-lab.ar/wp-content/uploads/Termoelectricidad.pdf>
- [3] Manual de usuario fuente de alimentación Agilent B2901A: <https://assets.testequity.com/te1/Documents/pdf/B2900A-ug.pdf>
- [4] Manual de usuario multímetro HP 34401A: <https://www.tme.eu/Document/adbea8905c9292cf883d5784d5c80a80/34401-90420.pdf>
- [5] David J. Griffiths. *Introduction To Electrodynamics*. Editorial Pearson. Cuarta Edición. Página: 298.
- [6] Manual de usuario fuente de alimentación LG GP-4303D: <https://www.manualslib.com/manual/1761741/Ez-Digital-Gp-4303d.html>
- [7] Bird, R.B.; Stewart, W.E.; Lightfoot, E.N.. *Transport Phenomena*. Transport Phenomena: Vol. 1. Página: 270. (2006).

Apéndices

En todas las ocasiones en que se realizó ajustes (realizados con la librería SciPy de Python), se tomó como error para los parámetros la componente adecuada de raíz cuadrada de la diagonal de la matriz de covarianza de los parámetros.

Luego, todos los resultados obtenidos en las experiencias tienen su error producto de la propagación de errores de las magnitudes con las cuales se operaron. La fórmula utilizada para propagar errores fue la siguiente:

$$\sigma_y^2 = \frac{\partial(F(x_1, x_2))^2}{\partial x_1} \delta{x_1}^2 + \frac{\partial(F(x_1, x_2))^2}{\partial x_2} \delta{x_2}^2$$

donde las x_i son las variables utilizadas para operar, las δx_i son los errores de estas variables y F es la operación realizada entre las variables y σ_y^2 el error de la variable contemplada.