

Eficiencia térmica de una celda de Peltier

Termodinámica Módulo Experimental: Proyecto Final

Diego Herrera

Luis Horta

Ricardo Jaimes

Fabian Pastrana

10 de julio de 2020

Resumen

Se estudió la eficiencia, potencia y resistencia interna de una celda de Peltier como máquina térmica, dándole tratamiento de frigorífico y máquina de calor. Se realizaron cuatro experimentos que dieron razón de los valores ya mencionados, como también la resistencia externa adecuada que optimiza la celda de peltier. El procedimiento realizado es explicado y detallado en el transcurso del documento. Se obtuvo que la resistencia interna de la celda de peltier es de $5,8 \Omega$, la eficiencia sin correcciones es decir sin considerar las pérdidas por conducción o radiación dieron entre los valores de 0.02% y 0.15% , ahora realizando las correcciones para el caso que se trabajó se obtuvo una eficiencia de $2,2\%$. También se obtuvo que el coeficiente de óptimo rendimiento utilizando la celda en modo frigorífico es de 0.55 . Variando diferentes resistencias externas se obtuvo que la mejor estuvo entre 5Ω y 10Ω .

1. MARCO TEÓRICO

El experimento se basa en el aprovechamiento de los denominados efecto Seebeck y efecto Peltier para realizar trabajo eléctrico a partir de una diferencia de temperatura, o bombear calor al recibir una cierta cantidad de trabajo eléctrico. En principio, los efectos termoeléctricos son situaciones de no equilibrio. Por tanto, el formalismo correcto para tratar estos fenómenos en detalle es la termodinámica irreversible. Por tanto, se consideran los fundamentos cualitativos microscópicos que dan cuenta de estos efectos termoeléctricos.

1.1. Efecto Seebeck

El efecto Seebeck consiste en la generación de corriente eléctrica a través de un circuito compuesto por dos materiales distintos, y cuyas uniones se encuentran a temperaturas distintas.

Cuando se ponen en contacto los metales, se crea una capa dipolar en la unión producto de la diferencia entre las funciones trabajos de los mismos. Si las uniones se encuentran a la misma temperatura, los electrones tienen una distribución en el espacio de energía en ambas uniones, y no existirá una tendencia a la difusión de portadores de carga de una a otra. Sin embargo, cuando se produce una diferencia de temperatura constante entre las uniones, se da una situación de no equilibrio en la cual tiende a existir una difusión de electrones de la unión caliente a la unión fría, producto de la perturbación de

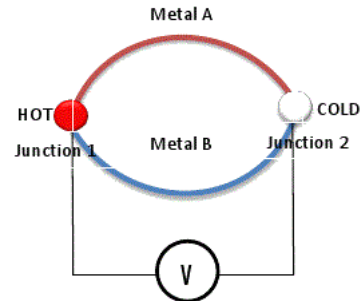


Figura 1: Esquema demostrativo del efecto Seebeck. Tomado de [2].

la distribución electrónica en equilibrio térmico. Puesto que este proceso intenta reestablecer el equilibrio térmico entre las uniones, es necesaria una diferencia de potencial entre las terminales, de suerte que se impida el flujo de portadores de carga. La dirección de la diferencia de potencial depende del tipo de portador de carga mayoritario en los materiales que forman el termopar.

En general, la diferencia de potencial generada por un termopar de este estilo está dada por:

$$\Delta V = (S_A - S_B)\Delta T \quad (1)$$

Donde S denota el coeficiente de Seebeck, o poder termoeléctrico absoluto de cada uno de los materiales que forman el termopar. Al mantener una diferencia de temperatura constante entre las uniones es posible te-

ner una diferencia de potencial constante, que puede ser aprovechada para realizar trabajo eléctrico.

1.2. Efecto Peltier

El efecto Peltier también se conoce como Efecto Seebeck inverso. Al producir una corriente en el loop formado por los metales es posible generar una diferencia de temperatura entre las uniones. A pesar de la analogía, el efecto Peltier requiere la presencia de una corriente en el loop, i.e. la realización de trabajo eléctrico, mientras que el efecto Seebeck se observa incluso en condiciones de circuito abierto.

Puesto que el flujo de corriente comporta un flujo de calor a través del loop, el efecto Peltier se caracteriza por medio de un coeficiente (π_{AB}) que relaciona la corriente de calor y la corriente eléctrica:

$$J^H = \pi_{AB} Q J^E \quad (2)$$

Siendo Q la carga efectiva de los portadores. En general, los coeficientes de Peltier y de Seebeck dependen de la temperatura, y están relacionados entre sí. Si bien estas ideas son más aplicables a uniones metal-metal, también tienen validez para uniones entre semiconductores.

En la práctica se aprovechó el efecto Seebeck para utilizar una unión p-n como máquina térmica, y el efecto peltier para utilizar la misma celda como bomba de calor. Al aplicar un gradiente de temperatura constante en la celda, es posible obtener una diferencia de potencial entre las partes p y n de la celda, de modo que es posible convertir parte de la corriente de calor a través de la celda en corriente eléctrica, i.e. energía térmica en trabajo eléctrico. Por otro lado, al aplicar una corriente eléctrica sobre la celda, el efecto peltier predice que se generará una corriente de calor. Así, es posible bombear energía térmica del lado frío de la celda al lado caliente por medio de la realización de trabajo eléctrico.

2. EL EXPERIMENTO

El experimento se dividió en 4 partes, en cada una de ellas se uso una celda de Peltier para caracterizar su funcionamiento como máquina térmica y como frigorífico:

1. Se determinó la eficiencia térmica de la celda de Peltier en modo motor térmico y se comparó con la eficiencia de Carnot.
2. Se encontró la resistencia interna de la celda, y se estimaron las pérdidas de energía utilizable por conducción y radiación. De esta forma, se corrigió la



Figura 2: Esquema de una placa de Peltier.

eficiencia experimental, y se comparó con la eficiencia de Carnot.

3. Se determinó el coeficiente de rendimiento (**COP**) de la celda de peltier en modo frigorífico. Se comparó con el COP de Carnot.
4. Se determinó la relación entre la resistencia de carga y la potencia de salida, para determinar la resistencia óptima de carga.

Primeramente, el dispositivo Peltier está construido con dos placas de cerámica con semiconductores tipo p y n en el medio de ellas, como se puede ver en la figura 2. A medida que la corriente continua pasa a través del dispositivo, este bombea calor de un lado al otro. Los bloques de aluminio se sujetan a cada lado de la celda Peltier en contacto térmico con las placas de cerámica. Estos bloques agregan masa térmica al sistema y actúan como los reservorios frío y caliente. Cuando hay una diferencia de temperatura en la placa Peltier, se puede cambiar al modo de motor de calor, en el cual el flujo de calor espontáneo a través del dispositivo genera una corriente eléctrica.[3]

Para funcionamiento como máquina térmica se utilizó un montaje como el representado en la figura 3. Por medio de una resistencia de 5Ω Ω_C se suministró calor a la placa de aluminio en la parte superior de la celda de Peltier. Se midió tanto la tensión como la corriente sobre la resistencia de calentamiento. Se registró la temperatura de esta por medio de una termocupla. Esta es la temperatura caliente (T_H). El disipador se sumergió en una masa abundante de agua (reservorio), que se constituye en la fuente fría de la máquina. Se midió la temperatura de esta utilizando una termocupla. Para medir la potencia de salida de la celda, se utilizó una resistencia de 5.7Ω Ω_L (resistencia de carga), y se midió la tensión sobre este elemento con un voltímetro.

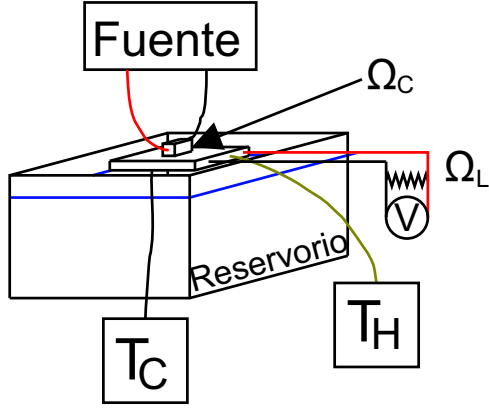


Figura 3: Montaje general para el calentamiento de la celda Peltier mediante una resistencia.

2.1. Eficiencia experimental en modo Máquina térmica.

Para esta parte del experimento se dispuso la celda en configuración de máquina térmica (ver sección Montaje experimental). Por medio de la resistencia de calentamiento, se incrementó la temperatura de la placa de aluminio sobre la celda a temperaturas en el rango $25^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C}$. El proceso de calentamiento fue realizado lentamente, de modo que el sistema estuvo cercano a un estado de equilibrio al momento de realizar las mediciones de temperatura.

Se registraron las temperaturas de las fuentes caliente (T_C) y fría T_F , así como la tensión de salida en la resistencia de carga (V_w), el voltaje en la resistencia de calentamiento (V_H), y la corriente en la resistencia de calentamiento (I_H). Se determina la eficiencia experimental a partir de la relación:

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{P_w}{P_H} \times 100 = \frac{V_w^2 / R_w}{V_H I_H} \times 100 \quad (3)$$

La eficiencia de Carnot se determina a partir de la diferencia de temperatura utilizando la fórmula:

$$\eta_C = \frac{\Delta T}{T_F + \Delta T} \quad (4)$$

Donde las temperaturas utilizadas se encuentran en Kelvin

2.2. Eficiencia experimental corregida.

Para obtener todos los datos necesarios para el motor térmico es necesario usar el aparato de eficiencia térmica

en dos modos diferentes. El modo de motor térmico que determina la eficiencia real del dispositivo Peltier y el modo abierto que determina las pérdidas debidas a la conducción y la radiación. Los datos de ambos modos se utilizan para calcular la resistencia interna y la eficiencia de Carnot.

El montaje experimental es el mismo ya antes explicado. Para la primera parte del experimento se le suministran unos 11V a la resistencia. Se miden las temperaturas de la de ambas placas fría y caliente.

Se registran los siguientes datos; el voltaje aplicado a la resistencia de calentamiento, la corriente y la tensión en la resistencia de carga.

Para la segunda parte (modo abierto) desconectamos el cable que une las dos placas, de esta manera no hay ningún flujo de corriente por lo tanto no hay trabajo. Por lo tanto toda la potencia suministrada a la resistencia de calentamiento se dirige hacia el lado frío o se irradia. Se dejan los voltímetros conectados para poder medir el voltaje de Seebeck.

Se disminuye el voltaje aplicado al lado caliente para que el sistema alcance el equilibrio a la misma temperatura caliente que en el Modo de motor térmico. Dado que la diferencia de temperatura es la misma que cuando el motor térmico estaba trabajando, ahora se está conduciendo la misma cantidad de calor a través del dispositivo cuando no hay carga que cuando hay una carga. Se registran las temperaturas, el voltaje de la resistencia de calentamiento y el voltaje producido.

2.3. Coeficiente de rendimiento en modo Frigorífico.

El montaje para el estudio del coeficiente de rendimiento para la placa trabajando en modo Frigorífico se representa esquemáticamente en la figura 4, allí, se puede ver la placa de Peltier haciendo dos contactos, por un lado el reservorio, un recipiente de poliestireno expandido relleno de agua hasta que hace completo contacto con la placa disipadora de calor, por el otro lado de la placa se encuentran, además de la placa de aluminio, el aire.

Además de los reservorios, la placa se encontraba conectada a una fuente de voltaje que le proporcionaba la energía para hacer trabajo. Finalmente, la placa tenía dos termopares para el monitoreo de las temperaturas de la placa superior T_C e inferior T_H .

El proceso experimental consistió, una vez ya realizado el montaje, se empezó a variar el voltaje de a $1.0(1)\text{V}$ y se esperaban 60 segundos hasta tomar un dato y nuevamente subir otro voltio en la tensión. Así, se tenía control sobre el tiempo de trabajo. Finalmente, son los datos del tiempo de trabajo, capacidad calorífica del aluminio, ma-

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Eficiencia experimental en modo Máquina térmica.

Como se puede observar en la figura 5, tanto la eficiencia de Carnot como la eficiencia térmica experimental aumentan con la temperatura. Sin embargo, es notorio que la eficiencia térmica de Carnot es órdenes de magnitud mayor que la eficiencia experimental. Mientras que la eficiencia de Carnot alcanza valores cercanos al 6 %, la eficiencia experimental apenas si alcanza calores del 0.02 %. A partir de los datos experimentales, se encuentra que menos del 4 % de la energía disponible para realizar trabajo se emplea efectivamente en el funcionamiento de la celda.

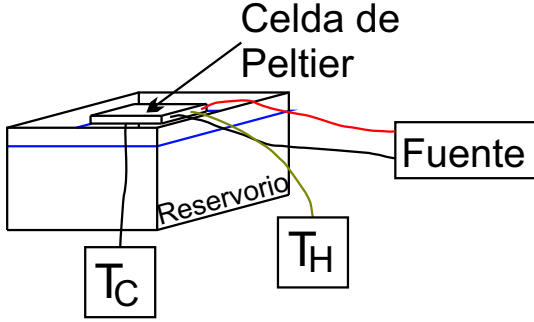


Figura 4: Montaje para el análisis del COP en modo frigorífico.

sa de la placa de aluminio y la diferencia de temperatura entre la placa disminuía su temperatura y la temperatura del reservorio, lo que dio vía al desarrollo del análisis del COP_{real} y el comportamiento de la temperatura de la placa de menor temperatura en función del voltaje suministrado a la fuente, que de alguna manera significa el trabajo realizado por la placa.

2.4. Resistencia de carga y potencia óptima.

El montaje para esta practica es el mismo que se muestra en la figura 3, la diferencia aquí fue que la resistencia de carga Ω_L fue variada. El procedimiento inicialmente fue dejar que el sistema alcanzara su equilibrio con la resistencia de 5.7Ω , una vez el equilibrio era alcanzado, se cambiaba la resistencia por una de mayor valor, como la resistencia de carga se iba a disipar parte del trabajo de la celda, se le subía al voltaje para compensar esa pérdida de energía y se esperaba alrededor de 5 minutos hasta que alcanzara el equilibrio. Así, mediante el cálculo de la potencia disipada y la potencia suministrada se pudo encontrar el valor de la eficiencia en cada valor de resistencia manteniendo constante la temperatura sobre la placa.

Los datos necesarios para el cálculo e las potencia disipada y potencia suministrada fueron la resistencia Ω_L , temperatura caliente T_C (parte superior de la placa), temperatura fría T_C (parte inferior de la placa), voltaje y corriente suministrado por la fuente y voltaje en la resistencia de carga Ω_L .

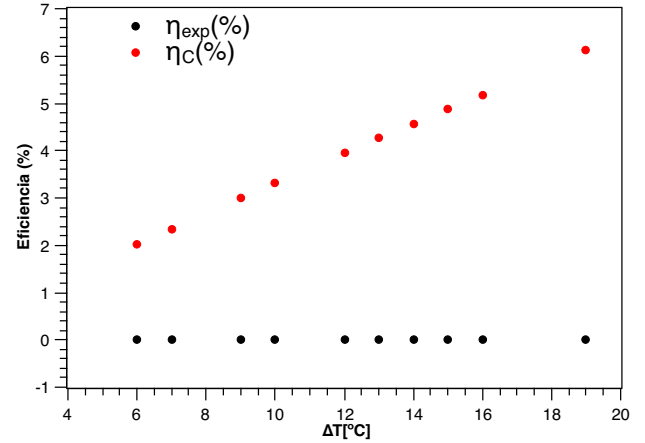


Figura 5: Eficiencia térmica experimental y de Carnot para la celda de peltier trabajada.

Puesto que la eficiencia de Carnot se asocia a máquinas reversibles, se deduce que existe una serie de procesos irreversibles involucrados en la conversión y transferencia de energía en el funcionamiento de la celda de peltier. Desde disipación óhmica en los cables y circuitos internos, hasta disipación de calor por radiación y conducción a través de la misma placa. De estos fenómenos, se estudian los efectos de la resistencia interna de la placa, y los efectos de la disipación de calor por conducción y radiación.

3.2. Correcciones a la eficiencia para la celda trabajada

Para explicar las diferencias entre las eficiencias medidas para la celda y las eficiencias ideales, se deben tener en cuenta las pérdidas relacionadas a procesos que en general no se notan en la celda como lo son:

- Potencia disipada por la resistencia interna de la celda, de manera que la potencia disipada no es solo $\frac{V_w^2}{R}$, si no que al tener en cuenta esta resistencia interna pasa a ser $\frac{V_w^2}{R} + I_w^2 r$ donde I corresponde a la corriente que se calcula con la misma potencia disipada.
- De la misma manera, la diferencia entre la potencia de la fuente con la resistencia de carga y la potencia de la fuente sin la resistencia de carga da razón de aquel calor que no es posible convertir en trabajo para la celda, de manera que debe ser también tenida en cuenta
- La resistencia interna de la celda puede calcularse mediante el voltaje medido para la celda sin resistencia de carga y es de la forma $\frac{V_p - V_w}{V_w} R$

Así, los valores medidos para la celda con una resistencia de carga de $5,7 \Omega$ es: De esta manera, la potencia inicial

V_F	I_F	V_{salida}
8	1,63	0.344

Tabla 1: Valores obtenidos para la celda con una resistencia de $5,7 \Omega$

obtenida para la celda es de $0.020W$ y la resistencia interna calculada es de $5,7 \Omega$. De la misma manera el valor de la corriente sobre la celda que se calculó fue de $0.05A$. de manera tal que la potencia corregida corresponde a:

$$\frac{V_w^2}{R} + I_w^2 r = \frac{0.111}{5,7} + 0.05^2 * 5,7 = 0.035W \quad (5)$$

De la misma manera el verdadero calor disponible para realizar trabajo sobre la celda se tiene eliminando los efectos disipativos en la fuente, que serán los mismos para esta con la resistencia de carga que abierta, de esta manera:

$$P_{trabajo} = P_{carga} - P_{abierta} = 8 * 1.63 - 7,5 * 1.52 = 1.64 \quad (6)$$

De esta manera la eficiencia de la celda ajustando a las pérdidas de energía es igual a $\frac{P_{corregida}}{P_{Hcorregida}} = \frac{0.035}{1.64} * 100 = 2.13$. Que es una mejora respecto a la primera eficiencia encontrada para la celda que era de $0,15 \%$. Por último se calcula la diferencia porcentual de eficiencia respecto a la eficiencia de Carnot es de la forma:

$$\%Diferencia = \frac{e_{carnot} - e_{ajustada}}{e_{carnot}} \quad (7)$$

Donde la eficiencia de Carnot para este caso toma la forma $\frac{T_s}{T_E} * 100 = 1 - \frac{273.15+23}{273.15+54} * 100 = 9 \%$. Así la diferencia porcentual entre las eficiencias es del 71% . Mientras que

sin tener en cuenta las pérdidas la diferencia porcentual es del 98% . Lo que indica que las pérdidas en la máquina de Peltier son lo suficientemente representativas como para ser tenidas en cuenta, aún cuando la eficiencia corregida calculada es distinta a la de Carnot. Resultado que indica que hay más fuentes de pérdidas en la celda de Peltier que las tenidas en cuenta para el desarrollo anterior. Así mismo como resultado relacionado, es posible notar al comparar con los datos experimentales de la práctica anterior que tanto la eficiencia de Carnot como la eficiencia de la placa aumentan a medida que aumenta la diferencia de temperatura entre las caras de la placa.

3.3. Celda termoeléctrica como frigorífico

Estudiando el comportamiento de la celda termoeléctrica como refrigerador cuando se configura un montaje que funciona como refrigerador, se hace una gráfica de T en función del voltaje suministrado, como se muestra en la figura 6.

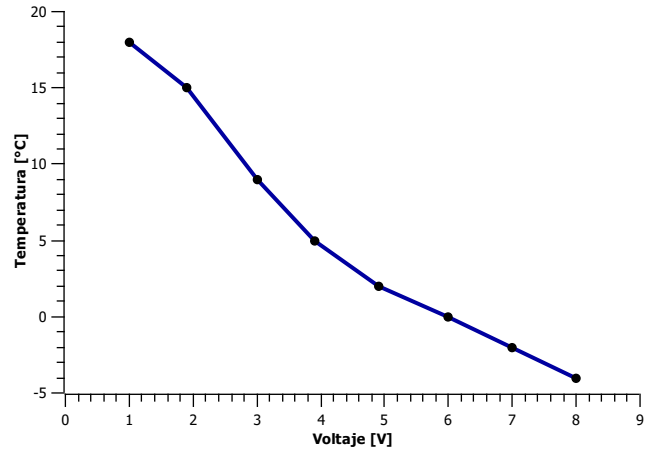


Figura 6: Temperatura sobre la parte fría de la placa en función del voltaje suministrado.

Allí se ve claramente un comportamiento inversamente proporcional, a medida que se le suministra más voltaje a la celda, esta hace mayor trabajo y enfría más la placa, este procedimiento solo se pudo hacer hasta $-4^\circ C$ debido a las limitaciones en el amperaje de la fuente, sin embargo, ya a estas energías la placa apenas llegó a $-4^\circ C$, y ascendió nuevamente a $-4^\circ C$, estos problemas pueden encontrar su origen en las gotas de condensación sobre la placa y el calentamiento de un par de grados sobre la fuente caliente, aunque el reservorio de agua era bastante grande, había que estar revolviéndolo para mantener la temperatura constante, sin embargo, ya a altos voltajes, era cada vez más frecuente debido a su alta entrega de calor, así, mantener

un control exacto de esta temperatura era una tarea compleja.

Haciendo un calculo del COP tanto real como ideal, se obtuvo los resultados de la tabla 7.

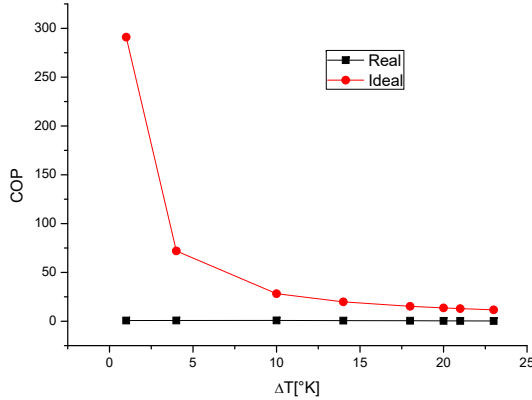


Figura 7: COP en función del Δ de temperatura.

Allí vale la pena mencionar el cuidado en la lectura de los ejes. El comportamiento del COP real al inicio de la práctica se aleja bastante del ideal, sin embargo, a medida que la diferencia en las temperatura aumenta, los COP_{real} y COP_{ideal} tienden a ser más cercanos, esto es, el coeficiente de rendimiento se reduce drásticamente para bajas temperaturas. Es decir, cuando se reduce la temperatura, la celda térmica la celda térmica tendrá más dificultad para liberar calor por cada unidad de energía. Los valore de la eficiencia fueron hallados para para cada valor en diferencia de temperaturas, promediando todos estos valores se llega aun COP_{real} de $COP_{real}=0,55$.

3.4. Resistencia de carga y potencia óptima.

Para esta ultima parte, haciendo la gráfica de la eficiencia en porcentaje en función de la resistencia en Ω , podemos ver que en la región de resistencias trabajadas, la que mejor eficiencia presentó fue la de 5.7Ω , resultado que concuerda con las características de la celda ya que, su valor de resistencia de carga óptimo está entre 1Ω y 1.5Ω , es decir, el comportamiento obtenido en esta toma de medidas coincide con las características del fabricante, con lo que debería ser una celda de Peltier.

Esto indica que con un rango de entre 0 y 10 Ohmios en las medidas de la resistencia de carga es suficiente para encontrar un máximo. Adicionalmente, esta resistencia se puede comparar con la resistencia interna hallada previamente, es decir, son bastante cercanas.

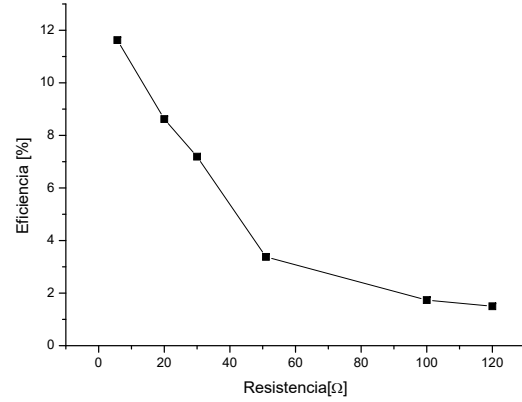


Figura 8: Eficiencia en función de la resistencia de carga.

4. CONCLUSIONES

- Se encontró que la resistencia interna de la celda de Peltier es de $5,7 \Omega$ y que para valores de resistencia de carga cercanos a este su eficiencia es máxima. Así mismo, el fabricante indica que la resistencia óptima de la placa ese de 1.5Ω , razón que explicaria tambien porque la eficiencia es tan pequeña
- Se encontró que la máquina de Peltier presenta efectos disipativos asociados a su estructura y principalmente a su resistencia interna,originandose una eficiencia real de al menos un orden de magnitud distinta a la que se obtienen para la eficiencia de Carnot. Sin embargo al tener en cuenta estos efectos y los efectos disipativos como principales en la fuente como principales responsables de la pérdida se obtuvo una eficiencia correspondiente al 23 % de la eficiencia ideal de Carnot.
- Se comprobó que la eficiencia de la celda de Peltier aumenta a medida que aumenta la diferencia de temperatura entre las caras de la placa, siendo la eficiencia máxima de Carnot permitida por la máquina de 77 % para la diferencia máxima de temperatura qe admite la placa, que es de 80 grados Celsius [1]
- Se encontró un coeficiente de rendimiento de 0,55 para la celda en modo frigorífico, esto pudiendo ser debido a la dificultad en la disipación de calor por parte del foco caliente debido a la cantidad de agua en el recipiente, además de los ya mencionados efectos disipativos debidos a la resistencia interna de la celda que dan lugar al efecto Joule.
- De la misma manera que en el caso de máquina térmica, se comprobó que el coeficiente de rendimiento

para la celda aumenta a medida que la diferencia de temperaturas es mayor.

REFERENCIAS

- [1] Pasco Scientific. *Thermal Efficiency Apparatus*. 1991.
- [2] H. Föll. *Thermoelectric effects*. https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_2/advanced/t2_3_2.html. [Online; recuperado el 17 de julio de 2019]. 2008.
- [3] Pasco Scientific. *Energy Transfer–Thermoelectric*.