

Fenómenos termoeléctricos: efecto Seebeck y Peltier

Daniel Vázquez Lago

March 5, 2023

Contents

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción | 3 |
| 1.1 | Objetivos | 3 |
| 1.2 | Introducción teórica | 3 |
| 1.2.1 | Primer día | 3 |
| 1.2.2 | Segundo día | 4 |
| 1.3 | Material | 5 |
| 1.4 | Procedimiento experimental | 6 |
| 1.4.1 | Primer día: | 6 |
| 1.4.2 | Segundo día: | 8 |
| 2 | Propagación de incertidumbres | 10 |
| 2.1 | Primer día | 10 |
| 2.2 | Segundo día | 10 |
| 3 | Incertidumbres | 11 |
| 4 | Resultados experimentales | 12 |
| 4.1 | Calculo de R_c | 12 |
| 4.2 | Calculo de valores térmicos | 13 |
| 4.3 | Calculo de los potenciales en estado estacionario | 15 |
| 4.4 | Coeficiente Seebeck | 17 |
| 4.5 | Calor Peltier | 17 |
| 4.5.1 | Estacionario 1 | 17 |
| 4.5.2 | Estacionario 2 | 18 |
| 4.5.3 | Estacionario 3 | 18 |
| 4.5.4 | Estacionario 4 | 18 |
| 4.5.5 | Estacionario 5 | 19 |
| 4.5.6 | Estacionario 6 | 19 |
| 4.5.7 | Estacionario 7 | 19 |
| 4.6 | Coeficiente Peltier | 24 |
| 5 | Conclusión | 25 |
| 6 | Datos | 27 |
| 6.1 | Primer día | 27 |
| 6.2 | Segundo día | 30 |
| 7 | Anexo | 35 |

1 Introducción

1.1 Objetivos

Los principales objetivos de esta práctica es calcular el coeficiente Seebeck y el coeficiente Peltier de un dispositivo termoeléctrico. Es decir, estudiaremos fenómenos termoeléctricos asociados a un conjunto de termopares.

También tendremos subobjetivos, que tendremos que cumplir para llegar al objetivo final. Para esto tendremos que ir calculando diferentes coeficientes y valores a lo largo de la práctica. Para el coeficiente Seebeck tendremos que calcular la diferencia de temperatura entre las uniones de nuestro dispositivo, por lo que tendremos que estudiar la evolución de la temperatura de nuestras uniones (mas adelante estudiaremos como se comportan estas temperaturas) y la potencia que circula por nuestro dispositivo. Sin embargo, como estudiar la evolución de la temperatura nos da mucha mas información del sistema que una simple temperatura, tomaremos dichos datos y calcularemos algunos coeficientes necesarios tanto para el cálculo del coeficiente Peltier como otros no necesarios, tales como calcular la capacidad calorífica de nuestro dispositivo. Tales coeficientes (que se introducen mas adelante) serán nuestros subjetivos de la práctica. Otros datos que necesitaremos calcular para el cálculo del coeficiente Peltier serán varias resistencias, que también lo haremos mientras calculamos Seebeck, por lo que el cálculo de estas también podrían introducirse en nuestros subobjetivos de la práctica.

1.2 Introducción teórica

1.2.1 Primer día

El **efecto Seebeck** nos dice que la fuerza electromotriz generada ε generada por la diferencia de temperatura entre dos puntos de un dispositivo termoeléctrico ΔT están relacionado de manera lineal mediante la constante de proporcionalidad S , es decir:

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

Para conseguir una diferencia de temperatura en nuestro dispositivo pondremos en contacto un extremo del mismo con agua del grifo a temperatura que supondremos constante T_1 , y el otro extremo lo pondremos en contacto con una resistencia calefactora R_c . Gracias al efecto Joule esta resistencia perderá una cantidad de energía W_{R_c} si le suministramos una potencia V . La relación dada por el efecto Joule será:

$$W_{R_c} = \frac{V^2}{R_c} \quad (2)$$

lo que permitirá que el otro extremo aumente progresivamente de temperatura, que llamaremos T_2 . De hecho podemos calcular la evolución de la temperatura de la unión caliente (así es como llamaremos a este extremo, al otro la unión fría) respecto al tiempo, ya que la relación diferencial será:

$$C_a \frac{dT_2}{dt} = W_{R_c} - \lambda_T(T_2 - T_1) \quad (3)$$

Donde C_a es la capacidad calorífica de nuestro dispositivo, W_{R_c} el calor que le aporta la resistencia calefactora y el término $\lambda_T(T_2 - T_1)$ es el calor que se pierde por el efecto Fourier. El efecto Fourier es un fenómeno que explica como se trasmite el calor a lo largo de una barra metálica, en nuestro caso, como se trasmite a lo largo del dispositivo. El coeficiente λ_T es su conductividad térmica.

Nosotros sabemos que si dejamos evolucionar a nuestro dispositivo un tiempo suficientemente grande llegaremos a un estado donde la temperatura de la unión caliente permanece casi constante a lo largo del tiempo. Dicho estado estacionario tiene que verificar que $dT_2/dt = 0$, y si denominamos la temperatura que alcanza como T_2^∞ , tenemos que:

$$W_{R_c} = \lambda_T(T_2^\infty - T_1) \quad (4)$$

Si integramos la ecuación 3 obtenemos la siguiente ecuación:

$$T_2(t) = T_2^\infty - (T_2^\infty - T_2^0)e^{-\frac{\lambda_T}{C_a}t} \quad (5)$$

donde T_2^0 es el valor de la temperatura T_2 en el instante inicial $t = 0$.

De esta forma hemos introducido todas las ecuaciones y relaciones que en apartado 1.4.1, desarrollaremos en función de nuestras necesidades para calcular tanto ΔT , como ε y otros valores como C_a , R_c y λ_T . Como debidamente se llama este apartado, aquí nos hemos limitado a describir el comportamiento de nuestro dispositivo de manera puramente teórica.

1.2.2 Segundo día

El **efecto Peltier** es un fenómeno que ocurre en la unión de dos materiales conductores con diferente densidad electrónica y en equilibrio térmico. Este fenómeno nos dice que si comienza a circular una corriente de intensidad I , en la unión se cederá o emitirá calor, el calor Peltier \dot{Q}_P .

Una de las partes mas interesantes del efecto Peltier tener en cuenta que cuando se cambia el sentido de la corriente podemos pasar de ceder calor (calentando el ambiente) en la unión a absorberlo (enfriando el ambiente). Entones lo que haremos en está práctica es estudiar la relación entre la intensidad que circula por nuestro dispositivo termoeléctrico y el calor de Peltier intercambiado. Según Peltier está relación es lineal, de tal forma que:

$$\dot{Q}_P = \pi_{AB}I \quad (6)$$

Entonces nosotros trataremos de calcular el valor de π_{AB} para nuestro dispositivo termoeléctrico formado por 142 termopares A y B . Como sabemos las uniones de los termopares (cada termopar tiene distinta densidad electrónica) se encuentran en contacto térmico con agua del grifo a T_1 y con una resistencia calefactora a T_2 . En las uniones la temperatura de ambos semiconductores será exactamente la misma, por lo que si hacemos circular en el dispositivo una corriente eléctrica es de esperar que ocurra el efecto Peltier en cada una de las uniones de los termopares.

En nuestro caso estudiaremos el balance energético de la unión caliente. Se hará porque ya conocemos con mayor precisión su evolución térmica que en el caso de la unión caliente. Por

lo tanto tenemos que reescribir la ecuación 3 para añadirle los nuevos términos caloríficos. Al efecto Joule y el efecto Fourier (ganancia de energía por la resistencia calefactora y perdida de energía porque el dispositivo tiende al equilibrio térmico), tenemos que sumarle el efecto Joule que el propio dispositivo genera por su resistencia interna r_i , y el propio calor de Peltier. Entonces si consideramos que en realidad el efecto Joule por la resistencia interna se reparte entre la unión fría y la unión caliente, tenemos que el nuevo balance energético:

$$C \frac{dT_2}{dt} = W_{R_c} - \lambda_T(T_2 - T_1) + \frac{1}{2} I^2 r_i \pm \dot{Q}_P \quad (7)$$

El signo de \dot{Q}_P dependerá del sentido que le demos a nuestra corriente. Nosotros en particular querremos que se enfrié la unión de la unión caliente, por lo que el signo el calor de Peltier será negativo. Supongamos ahora que nos encontramos en el estado estacionario de la unión caliente, de tal forma que $dT_2/dt = 0$. En ese caso tendremos que podemos escribir:

$$\dot{Q}_P = W_{R_c} - \lambda_T(T_2^\infty - T_1) + \frac{1}{2} I^2 r_i \quad (8)$$

Por lo que nos interesará estudiar como evoluciona T_2 para saber cuando llega al estado estacionario. Para calcular T_2^∞ seguiremos el mismo procedimiento que el primer día: tomaremos pares de valores de T_2 y t , e integrando la ecuación 7 podemos llegar a:

$$T_2(t) = T_2^\infty - (T_2^\infty - T_2^0)e^{-\lambda_T t/C} \quad (9)$$

que es la misma ecuación que 5, por lo que el mecanismo para calcular las temperatura en el estado estacionario será el mismo. La única diferencia es que como R_c , r_i y λ_T ya lo hemos calculado, solo tendremos que conocer para la intensidad I , el voltaje V_0 (potencia que le suministramos a la resistencia calefactora), T_2^∞ y T_1 para calcular el calor de Peltier.

1.3 Material

Usaremos los siguientes elementos:

- Dos polímetros, que actuarán como voltímetros o amperímetros según los necesitemos.
- Resistencia variable R_v .
- Resistencia calefactora R_c .
- Numerosos cables.
- Generador de corriente alterna
- Dispositivo termoeléctrico, formado por 142 termopares de tipo n y p.
- Plataforma, donde ponemos todo en contacto.
- Tubos de plástico para conectar el dispositivo con agua de grifo.
- Fuente de corriente continua.

1.4 Procedimiento experimental

En este apartado iremos describiendo lo que vamos haciendo en el laboratorio paso por paso, para que lo haremos, y que vamos a calcular con nuestros resultados. Mas abajo, en el anexo (sec 7) tenemos las imágenes de los dispositivos, explicadas un poco. Cuando llegue el momento de usar dicho montaje vamos a referenciar las figuras, explicando las razones de dicho montaje, o como sería conveniente ponerlo, incluso sugerencias para mejorarlo. En el anexo solo explicaremos como está realizado dicho montaje.

1.4.1 Primer día:

Lo primero que haremos al llegar al laboratorio es tratar de calcular el valor de la resistencia calefactora R_c . Queremos calcular dicho valor porque si también conocemos el valor del voltaje que damos a la resistencia calefactora, podremos calcular el de W_{R_c} , mediante la ecuación 2. Calcularemos el valor de R_c de dos maneras. La primera de ellas será conectar la resistencia directamente con un ohmímetro. La segunda será mediante un ajuste lineal. Para esto conectaremos la resistencia con un voltaje V e intensidad I , que podremos ver en cada momento gracias a un voltímetro y amperímetro. El montaje experimental lo podemos ver en la figura 16. Entonces para cada valor de V obtendremos un valor de I , aumentando de veinte en veinte el voltaje obteniendo 10 pares de valores (V, I) . Como sabemos por la ley de Ohm $V = RI$, por lo que si hacemos el ajuste lineal

$$V = a + bI \quad (10)$$

siendo el valor a parte del error de medida, podemos ver que b y R_c están relacionados mediante:

$$b = R_c \quad (11)$$

Para obtener el verdadero valor de R_c haremos una media ponderada de los diferentes datos. Usamos varios métodos para calcular la resistencia R_c porque son muy sencillos y permiten reducir la posibilidad de un error aberrante en la toma de alguno de los datos.

Tras calcular R_C trataremos de estudiar como evoluciona la temperatura de la unión caliente con el tiempo. Para esto primero pondremos en contacto la resistencia calefactora R_c conectada a un generador de corriente alterna a la unión caliente y pondremos en contacto la unión fría con el agua corriente. También tendremos un termómetro digital conectado a ambas uniones, que nos dirá en cada instante el valor de ambas temperaturas. Podemos ver el montaje en la figura 17.

Una vez le damos un potencial V_0 al generador el sistema comenzará a evolucionar según la ecuación 3, mientras que la temperatura de la unión fría permanecerá “constante”. La manera de obtener los datos será la siguiente: cada uno o dos minutos tomaremos una medida de los valores (T_2, T_1, t) . Sin embargo nos enfrentamos a un problema. Según la ecuación 5 la temperatura de T_2 va a estar aumentando infinitamente, aunque este aumento sea infinitesimal, por lo que jamás llegaremos a un estado completamente estacionario. Lo que haremos es suponer un estado casi estacionario, a partir del cual asumiremos que la temperatura de T_2 es lo suficientemente estable con el tiempo para considerarla estacionaria, aunque en realidad, no lo sea. Supondremos que el estado estacionario será cuando en 2 minutos la temperatura no haya

variado 0.1 o más. Dada la precisión del termómetro esto significará que si en 2 minutos el valor que nos da el termómetro no varía, consideraremos que hemos llegado al estado estacionario.

Está suposición está fundamentada en la ecuación 5, ya que como T_2 tiende asintóticamente a T_2^∞ , si no varía prácticamente en dicho periodo de tiempo podremos suponer que estamos muy cerca del valor. De todos modos con los datos (T_2, T_1, t) tomados, haremos una regresión no lineal, de tal forma que:

$$T_2(t) = A + Be^{-Ct} \quad (12)$$

por lo que podremos asociar los siguientes valores tras realizar el ajuste:

$$A = T_2^\infty \quad (13)$$

$$-B = T_2^\infty - T_2^0 \quad (14)$$

$$C = \frac{\lambda_T}{C_a} \quad (15)$$

Entonces podemos obtener de todas maneras el valor de la temperatura de la unión caliente en el estado estacionario.

Una vez hemos llegado al estado estacionario no desconectaremos nada, ni tocaremos nada, ya que es muy importante que se mantenga el estado estacionario. Bajar la tensión V_0 , desconectar R_c o cerrar el grifo alteraría dicho estado. Lo que haremos a continuación será calcular el potencial ε generado por la diferencia de temperaturas. Esto lo haremos de dos maneras: la primera será conectar directamente un voltímetro a los bornes del dispositivo eléctrico, según el monatje de la figura 19. La segunda forma implica un ajuste lineal.

Lo que haremos será conectar nuestro sistema a una resistencia variable, a un voltímetro en paralelo respecto a ésta y un amperímetro que mida la intensidad del circuito en todo momento, siguiendo el esquema mostrado en la figura 1, y más concretamente el dispositivo experimental de 19. Está claro que se verificará en todo momento la siguiente ecuación (por las leyes de Kirchoff para circuitos):

$$\varepsilon = I \cdot r_i + I \cdot r_v = r_i I + \Delta V_{RX} \quad (16)$$

donde hemos supuesto que $I r_v = \Delta V_{RX}$ usando la ley de ohm. Entones está claro lo que tenemos que hacer: si vamos variando la resistencia r_v irá cambiando tanto la Intensidad como ΔV_{RX} , por lo que si reescribimos la ecuación anterior como:

$$\Delta V_{RX} = \varepsilon - r_i I \quad (17)$$

y hacemos el ajuste lineal para los pares de datos obtenidos $(\Delta V_{RX}, I)$

$$\Delta V_{RX} = a - bI \quad (18)$$

está claro que

$$a = \varepsilon \quad (19)$$

$$b = r_i \quad (20)$$

Como anteriormente, haremos la media ponderada de ambos valores para ε para obtener resultado mas correcto.

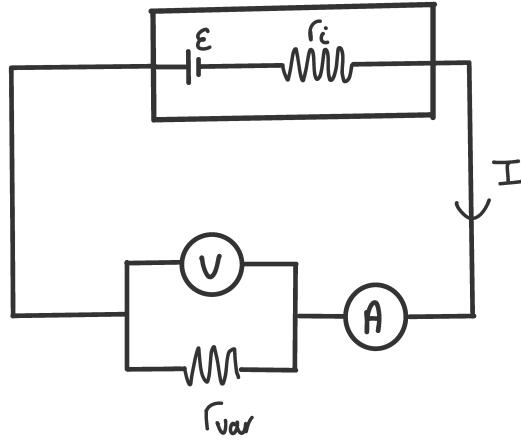


Figure 1: Montaje experimental para calcular ε .

Una vez hemos obtenido tanto T_2^∞ como W_{RC} , podemos obtener el valor de λ_T , ya que usando la ecuación 4:

$$\lambda_T = \frac{W_{RC}}{T_2^\infty - T_1} = \frac{W_{R_c}}{\Delta T} \quad (21)$$

y usando la ecuación 15, como ya hemos calculado λ_T :

$$C_a = \frac{\lambda_T}{C} \quad (22)$$

Haremos todo este proceso dándole los voltajes $V_0 = 125, 150V$ a la resistencia calefactora, por lo que obtendremos 2 capacidades caloríficas, 2 coeficientes de fourier y 2 valores para la resistencia interna r_i del dispositivo. Además obtendremos un par de valores de ε y ΔT diferentes que nos permitirá calcular dos coeficientes de Seebeck.

1.4.2 Segundo día:

Como ya hemos mencionado, trataremos de calcular el valor del coeficiente Peltier. Para esto necesitamos conocer el valor del calor de Peltier que capta nuestra unión caliente. Sin embargo, para conocer dicho valor, antes que nada tenemos que hacer que la corriente circule en el sentido que nosotros queremos para que realmente el efecto Peltier capte calor del entorno. Entonces lo primero que haremos nada mas llegar al laboratorio será hacer circular una corriente (de 1A mas o menos) a través del dispositivo termoeléctrico,y mediante un termómetro estudiar la evolución de su temperatura. Si aumenta tendremos que cambiar el sentido de circulación de la

corriente (con cambiar la posición de los cables conectados al generador llega), y si disminuye la temperatura, ya tenemos el sentido de la corriente que buscamos, quedando el dispositivo tal y como la figura 21.

Una vez lo hemos determinado fijaremos la intensidad a $I = 0.5A$, y el voltaje del generador a $V_0 = 120V$. Para determinar que ambas medidas permanecen constantes a lo largo de la evolución a un estacionario tendremos dos polímetros (uno en función amperímetro, y otro en función voltímetro), que nos permitirá calcular ambos valores. Una vez fijamos la intensidad y el voltaje el sistema comenzará a evolucionar, en el primer caso, como la intensidad es baja y el voltaje muy alto, aumentando la temperatura. Entonces con el termómetro digital anotamos las temperaturas T_1 y T_2 cada minuto, hasta que T_2 no aumente mas de $0.1C^\circ$ en 2 minutos, momento que podremos suponer un estado casi estacionario, y como tendremos los suficientes datos podremos hacer la regresión exponencial 12 para calcular T_2^∞ . Como antes, T_1 la calcularemos suponiéndola constante.

Una vez lleguemos a este estado estacionario repetiremos lo mismo pero cada vez aumentando la intensidad, subiendo por cada nuevo estado $0.5A$. Como aumentaremos la intensidad y no cambiaremos el voltaje podemos suponer que con cada cambio la temperatura de la unión bajará, ya que según el efecto Seebeck si aumentamos la intensidad tiene que aumentar la cantidad de calor captado.

Tendremos que parar de hacer medidas una vez la unión llegue a los $8C^\circ$, ya que a partir de ahí la condensación o incluso la congelación del agua puede ocurrir, lo cuál sería fatal para nuestro circuito.

Una vez que alcanzamos este punto para $V_0 = 120V$, repetiremos el proceso para $V_0 = 150V$, comenzando de nuevo con $I = 0.5A$, por lo que volverá a aumentar la temperatura y, de nuevo, deberemos tomar datos de la temperatura y el tiempo; y luego hacer la regresión exponencial.

2 Propagación de incertidumbres

2.1 Primer día

Vamos a calcular las incertidumbres de C_a , λ_T , S , ΔT , y W_{R_c} , que son, basáandonos en las ecuaciones anteriores:

$$s(W_{R_c}) = \left[\left(\frac{2V}{R_c} \right)^2 s^2(V) + \left(\frac{V^2}{R_C^2} \right)^2 s^2(R_c) \right]^{1/2} \quad (23)$$

$$s(\lambda_T) = \left[\left(\frac{1}{\Delta T} \right)^2 s^2(W_{R_c}) + \left(\frac{W_{R_c}}{(\Delta T)^2} \right)^2 s^2(\Delta T) \right]^{1/2} \quad (24)$$

$$s(C_a) = \left[\left(\frac{1}{C} \right)^2 s^2(\lambda_T) + \left(\frac{\lambda_T}{C^2} \right)^2 s^2(C) \right]^{1/2} \quad (25)$$

$$s(\Delta T) = [s^2(T_2^\infty) + s^2(T_1)]^{1/2} \quad (26)$$

$$s(S) = \left[\left(\frac{1}{\Delta T} \right)^2 s^2(\epsilon) + \left(\frac{\epsilon}{(\Delta T)^2} \right)^2 s^2(\Delta T) \right]^{1/2} \quad (27)$$

2.2 Segundo día

$$\begin{aligned} s(\dot{Q}_P) = & \left[\left(\frac{2V}{R_c} \right)^2 s^2(V) + \left(\frac{V^2}{R_C^2} \right)^2 s^2(R_c) + (\Delta T)^2 s^2(\lambda_T) + \right. \\ & \left. + (\lambda_T)^2 s^2(\Delta T) + (Ir_i)^2 s^2(I) + \left(\frac{I^2}{2} \right)^2 s^2(r_i) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (28)$$

3 Incertidumbres

En esta sección explicaremos de donde vienen las incertidumbres que mas adelante usaremos. Todos los datos que aparecen en está práctica se han obtenido mediante aparatos electrónicos, véase un termómetro digital o un polímetro. Como sabemos, las distribuciones de frecuencia provenientes de un aparato eléctrico son distribuciones de probabilidad uniformes. Por lo tanto cogeremos para cada valor una incertidumbre igual a la precisión de nuestro aparato entre la raíz de doce, a no ser que oscilen entre varios valores. Por el contrario nosotros no solo usaremos está incertidumbre de tipo B basada en la distribución de frecuencias, si no que la aumentaremos hasta que llegue a la precisión del aparato. Lo hacemos así para incluir todas aquellas incertidumbres que no conocemos y que si afectan a los datos. Además muchos datos oscilaban. Para ser rigurosos deberíamos decir de donde extraemos cada incertidumbre, pero dicha rigurosidad excede la intención de la práctica. Siguiendo este razonamiento tendremos que:

- Cada temperatura medida tendrá una incertidumbre asociada de

$$s(T) = 0.1C^\circ \quad (29)$$

- Cada valor de voltaje, intensidad, o resistencia medida tendrá un valor igual a la precisión del aparato. Esta variará ya que no siempre tendrá la misma precisión el aparato: a veces mediremos voltajes grandes y otras veces algunos pequeños. Entonces:

- Resistencia R_c directamente:

$$s(R_c) = 10\Omega$$

- Voltaje para resistencia R_c :

$$s(V_{R_c}) = 1V$$

- Intensidad para resistencia R_c :

$$s(I_{R_c}) = 0.001A$$

- Voltaje V_0 :

$$s(V_0) = 1V$$

- Diferencia de potencial ΔV_{Rx} :

$$s(\Delta V_{Rx}) = 0.001V$$

- Intensidad I_{Rx} :

$$s(I_{Rx}) = 0.1mA$$

- Intensidad para peltier:

$$s(I) = 0.01A$$

Aunque hay que decir que realmente las incertidumbres reales no son esas, son meras aproximaciones. A dichas incertidumbres dadas por las distribuciones de frecuencia hay que añadir las especificaciones del fabricante.

4 Resultados experimentales

4.1 Calculo de R_c

En la primera parte de esta práctica teníamos que calcular los valores de la resistencia de manera directa, de donde podemos obtener que

| R_{C1} (Ω) | $s(R_{C1})$ (Ω) | R_{C2} (Ω) | $s(R_{C2})$ (Ω) |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1010 | 10 | 989 | 10 |

Table 1: Valor para la resistencia R_C calculada de manera directa

y de manera indirecta teníamos que obtener los pares de valores para hacer la regresión lineal

| a (V) | $s(a)$ (V) | R_{C3} (Ω) | $s(R_{C3})$ (Ω) |
|---------|------------|-----------------------|--------------------------|
| -4.45 | 0.71 | 1039.5 | 5.7 |

Table 2: valor de la resistencia y ordenada en el origen mediante la regresión lineal

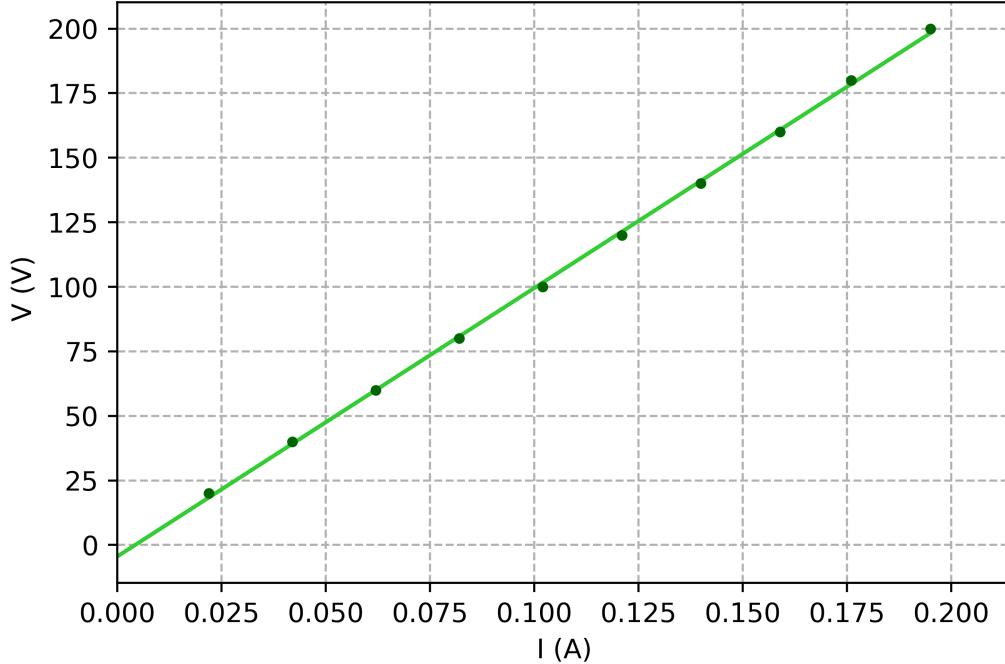


Figure 2: representación V frente a I para el cálculo de R_C

Entonces hemos obtenido 3 valores de la resistencia con 3 incertidumbres diferentes. Para obtener el valor definitivo haremos una media ponderada entre las 3. Entonces podemos concluir que:

| R_C (Ω) | $s(R_C)$ (Ω) |
|--------------------|-----------------------|
| 1023.7 | 4.4 |

Table 3: valor de la resistencia final

4.2 Calculo de valores térmicos

En la tabla 4 podemos ver la media de las temperaturas de la unión fría. Aunque a lo largo de la práctica la temperatura del agua varíe (ya que la temperatura de las cañerías asciende a medida que avanza el día) supondremos que se encontraba constante con los valores allí representados. La incertidumbre fue calculada mediante una mezcla entre la incertidumbre del aparato (u_b) siendo esta la incertidumbre de la media ponderada y mediante la inferencia estadística de la media (u_a), pero dado el peso de esta última, la primera puede considerarse ridículamente pequeña. Para hacer esto hemos supuesto:

$$u_c = \left(u_a^2 + u_b^2 \right)^{1/2} \quad (30)$$

| T_1^1 (C°) | $s(T_1^1)$ (C°) | T_1^2 (C°) | $s(T_1^2)$ (C°) |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 12.489 | 0.041 | 13.478 | 0.026 |

Table 4: Valores de la temperatura unión fría para $V_0 = 125 V$ (T_1^1) y $V_0 = 150 V$ (T_1^2)

En las tablas 5 y 6 están representados los valores con sus incertidumbres al realizar el ajuste exponencial de los datos T_2 respecto al tiempo. Como podemos ver según las ecuaciones mencionadas anteriormente $T_2^\infty = A$. Las regresiones han sido calculadas con el módulo `scipy.optimize`, que usa puro cálculo numérico para obtenerlas, por lo que es posible que exista algún error mínimo en los datos. Las incertidumbres expuestas en la tabla son las incertidumbres de tipo A, ya que podríamos considerar las incertidumbres de tipo B prácticamente nulas al no saber con certeza cual es la distribución de frecuencias de cada dato en particular.

| A (C°) | $s(A)$ (C°) | B (C°) | $s(B)$ (C°) | C (min^{-1}) | $s(C)$ (min^{-1}) |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| 29.586 | 0.018 | -13.305153 | 0.020 | 0.05262400 | 0.0000029 |

Table 5: Valores obtenidos de las regresiones exponenciales para $V_0 = 125V$

| A (C°) | $s(A)$ (C°) | B (C°) | $s(B)$ (C°) | C (min^{-1}) | $s(C)$ (min^{-1}) |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| 36.0033 | 0.0012 | -7.4166 | 0.0017 | 0.07291000 | 0.0000014 |

Table 6: Valores obtenidos de las regresiones exponenciales para $V_0 = 150V$

En la tabla 7 están puestas las diferencias de temperaturas $T_2^\infty - T_1$, tomando los valores de estos en las tablas anteriores. Para calcular la incertidumbre de los siguientes datos solo tendremos en cuenta la propagación de incertidumbres, ya que no tenemos ningún tipo de incertidumbre de tipo B a mayores para añadir.

En las siguientes tablas se muestran los datos recogidos de los coeficientes W_{R_C} , λ_T y C_a , en primer lugar para el primer estacionario, en el segundo para el segundo estacionario, y a la

derecha la media ponderada para los 3 coeficientes que tomaremos como constantes a lo largo del segundo día. Sobre las incertidumbres, sucede lo mismo que en las dos anteriores.

| $\Delta T_1 (C^\circ)$ | $s(\Delta T_1) (C^\circ)$ | $\Delta T_2 (C^\circ)$ | $s(\Delta T_2) (C^\circ)$ |
|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 17.096 | 0.044 | 22.525 | 0.026 |

Table 7: Valores de ΔT para $V_0 = 125 V$ (ΔT_1) y $V_0 = 150 V$ (ΔT_2)

| $W_{R_c}^1 (J)$ | $s(W_{R_c}^1) (J)$ | $W_{R_c}^2 (J)$ | $s(W_{R_c}^2) (J)$ | $W_{R_c} (J)$ | $s(W_{R_c}) (J)$ |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|---------------|------------------|
| 15.26 | 0.25 | 21.98 | 0.31 | 17.97 | 0.20 |

Table 8: Valores de W_{R_c} para $V_0 = 125 V$ ($W_{R_c}^1$) y $V_0 = 150 V$ ($W_{R_c}^2$)

| $\lambda_T^1 (W/C^\circ)$ | $s(\lambda_T^1) (W/C^\circ)$ | $\lambda_T^2 (W/C^\circ)$ | $s(\lambda_T^2) (W/C^\circ)$ | $\lambda_T (W/C^\circ)$ | $s(\lambda_T) (W/C^\circ)$ |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 0.893 | 0.015 | 0.976 | 0.014 | 0.938 | 0.010 |

Table 9: Valores de λ_T para $V_0 = 125 V$ (λ_T^1) y $V_0 = 150 V$ (λ_T^2)

| $C_a^1 (J/C^\circ)$ | $s(C_a^1) (J/C^\circ)$ | $C_a^2 (J/C^\circ)$ | $s(C_a^2) (J/C^\circ)$ | $C_a (J/C^\circ)$ | $s(C_a) (J/C^\circ)$ |
|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| 1018 | 17 | 803 | 11 | 868.4 | 9.4 |

Table 10: Valores de C_a para $V_0 = 125 V$ (C_a^1) y $V_0 = 150 V$ (C_a^2)

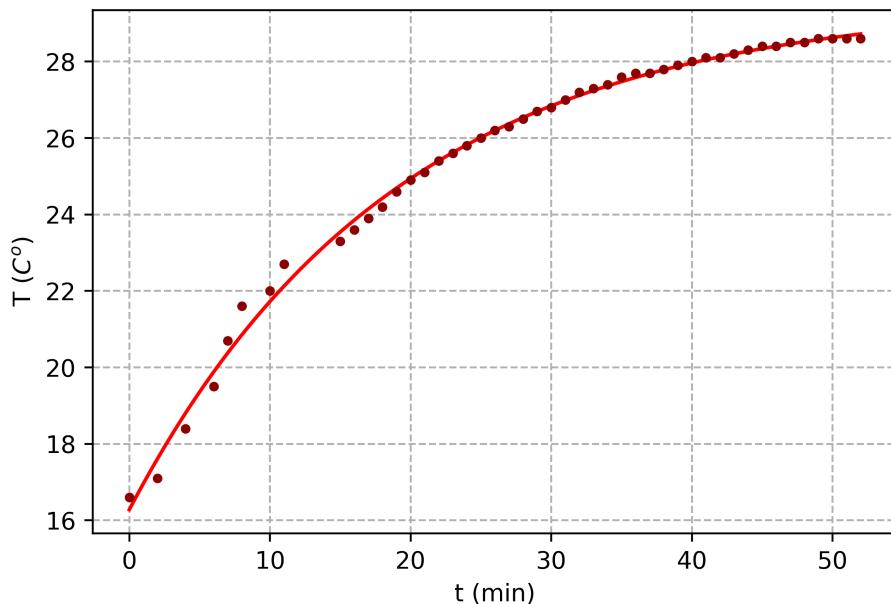


Figure 3: representación T_2 frente a t con la regresión para $V = 125V$

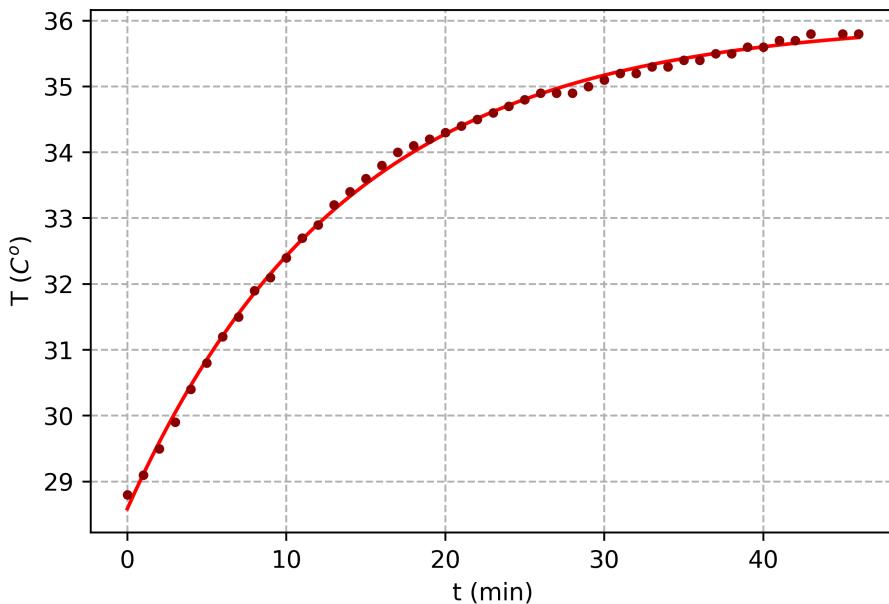


Figure 4: representación T_2 frente a t con la regresión para $V = 150V$

4.3 Calculo de los potenciales en estado estacionario

En las tablas 11 y 12 están representadas los potenciales calculados de forma directa (11) y de forma indirecta (12), incluyéndose en la segunda tabla el valor de la resistencia r_i para el primer estado estacionario. No hay nigún tipo de dificultad en el cálculo de ambos ya que en el primer caso es una medida directa y como ya hemos explicado, tiene como incertidumbre de la precisión del aparato; y en el segundo caso son las incertidumbres de tipo A que se obtienen al hacer una regresión lineal normal. No incluimos en este caso otra incertidumbre de tipo B. Las tablas 13 y 14 reflejan exactamente lo mismo para el segundo estacionario.

| ε (V) | $s(\varepsilon)$ (V) |
|-------------------|----------------------|
| 0.855000 | 0.0010 |

Table 11: Valores para la fuerza electromotriz V=125V de manera directa

| ε (V) | $s(\varepsilon)$ (V) | r_i (Ω) | r_i (Ω) |
|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 0.8410 | 0.0014 | -7.926 | 0.019 |

Table 12: Valores para la fuerza electromotriz y la resistencia V=125V mediante ajuste lineal

| ε (V) | $s(\varepsilon)$ (V) |
|-------------------|----------------------|
| 1.1950 | 0.0010 |

Table 13: Valores para la fuerza electromotriz V=150V de manera directa

| ε (V) | $s(\varepsilon)$ (V) | r_i (Ω) | r_i (Ω) |
|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| 1.2008 | 0.0013 | -7.994 | 0.013 |

Table 14: Valores para la fuerza electromotriz y la resistencia V=150V mediante ajuste lineal

En la tabla 15 se muestra la media ponderada para cada uno de los valores de la fuerza electromotriz entre la medida directa e indirecta. Es esencial para calcular el coeficiente Seebeck (S). En la tabla 16 se ve cual es la media ponderada de los valores de la resistencia intrínseca del dispositivo, que usaremos para la parte de Peltier.

| ε^1 (V) | $s(\varepsilon^1)$ (V) | ε^2 (V) | $s(\varepsilon^2)$ (V) |
|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| 0.85044 | 0.00082 | 1.19658 | 0.00070 |

Table 15: Valores de ε para $V_0 = 125$ V (ε^1) y $V_0 = 150$ V (ε^2)

| r_i (Ω) | $s(r_i)$ (Ω) |
|--------------------|-----------------------|
| 7.972 | 0.011 |

Table 16: Valores de r_i definitivos tras hacer la media ponderada

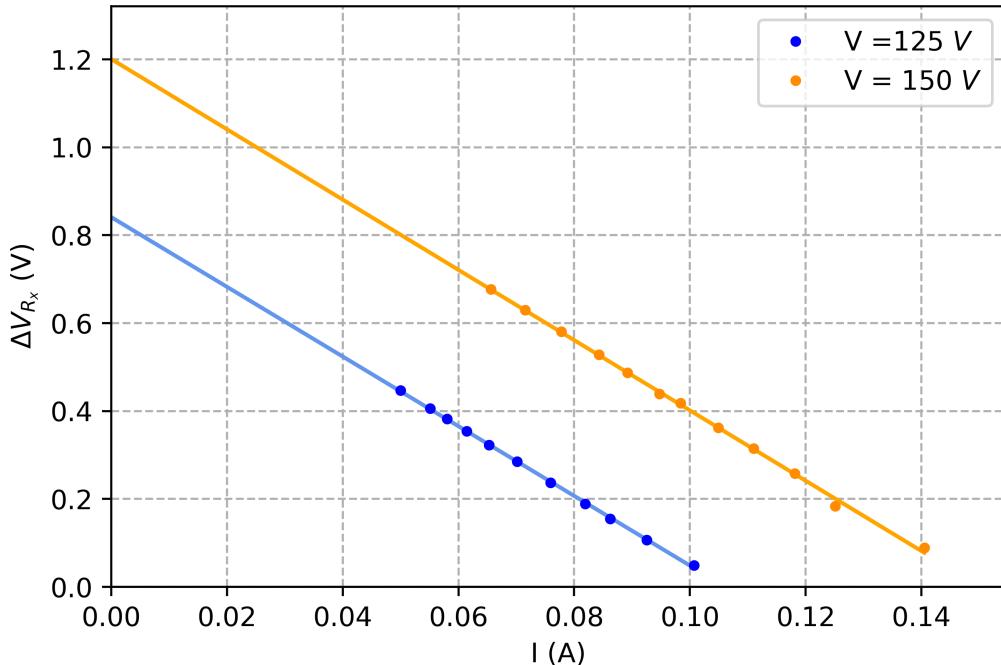


Figure 5: V=125,150 V

4.4 Coeficiente Seebeck

En la siguiente tabla (tabla 17) tenemos los dos coeficientes Seebeck para cada uno de los dos voltajes y luego su media ponderada. El segundo valor es el resultado final de toda la práctica, y en última instancia, el valor que queríamos obtener. La incertidumbre la calculamos mediante la fórmula de propagación de incertidumbres normal, no añadiremos ningún tipo de incertidumbre a mayores para combinar, ya que tampoco conocemos cual es su distribución de datos.

| $S^1 (V/C^\circ)$ | $s(S^1) (V/C^\circ)$ | $S^2 (V/C^\circ)$ | $s(S^2) (V/C^\circ)$ | $S (V/C^\circ)$ | $s(S) (V/C^\circ)$ |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|-----------------|--------------------|
| 0.049744 | 0.00014 | 0.053122 | 0.000069 | 0.052441 | 0.000062 |

Table 17: Valores de S para $V_0 = 125 V$ (S^1) y $V_0 = 150 V$ (S^2)

4.5 Calor Peltier

Como ya hemos dicho al principio de la memoria, el primer día hicimos muchos cálculos que no eran necesarios para el cálculo del coeficiente Seebeck, pero si para el cálculo del coeficiente Peltier. Estos erán λ_T , r_i y R_c . Entonces los valores que usaremos a lo largo de esta parte de la práctica serán:

$$\begin{aligned} \lambda_T &= 0.938 W/C^\circ & s(\lambda_T) &= 0.010 W/C^\circ \\ R_c &= 1023.4 \Omega & s(R_c) &= 4.4 \Omega \\ r_i &= 7.972 \Omega & s(r_i) &= 0.011 \Omega \end{aligned} \quad (31)$$

He de recordar que los valores de todas las regresiones lineales presentadas en esta sección se encuentran en la parte final de la memoria ya que ponerlas aquí ejercería un efecto visual negativo, y dado que solo tomamos un dato de ellas, no son lo suficientemente importantes como para ponerlas a pesar de eso.

4.5.1 Estacionario 1

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 0.53A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 120V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (32)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 6) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 21.7752C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.0030C^\circ \\ T_1 &= 14.476C^\circ & s(T_1) &= 0.034C^\circ \end{aligned} \quad (33)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 8.32J \quad s(\dot{Q})_P = 0.26J \quad (34)$$

4.5.2 Estacionario 2

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 1.00A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 120V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (35)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 7) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 15.7675C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.0093C^\circ \\ T_1 &= 15.093C^\circ & s(T_1) &= 0.040C^\circ \end{aligned} \quad (36)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 17.43J \quad s(\dot{Q})_P = 0.26J \quad (37)$$

4.5.3 Estacionario 3

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 1.52A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 120V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (38)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 8) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 10.3475C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.0043C^\circ \\ T_1 &= 15.831C^\circ & s(T_1) &= 0.033C^\circ \end{aligned} \quad (39)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 28.44J \quad s(\dot{Q})_P = 0.28J \quad (40)$$

4.5.4 Estacionario 4

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 2.00A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 120V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (41)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 9) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 7.649C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.017C^\circ \\ T_1 &= 16.81C^\circ & s(T_1) &= 0.11C^\circ \end{aligned} \quad (42)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 38.60J \quad s(\dot{Q})_P = 0.32J \quad (43)$$

4.5.5 Estacionario 5

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 0.51A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 150V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (44)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 10) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 30.1707C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.0034C^\circ \\ T_1 &= 14.777C^\circ & s(T_1) &= 0.085C^\circ \end{aligned} \quad (45)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 8.59J \quad s(\dot{Q})_P = 0.36J \quad (46)$$

4.5.6 Estacionario 6

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 1.01A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 150V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (47)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 11) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 24.2383C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.0098C^\circ \\ T_1 &= 16.237C^\circ & s(T_1) &= 0.037C^\circ \end{aligned} \quad (48)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 18.57J \quad s(\dot{Q})_P = 0.33J \quad (49)$$

4.5.7 Estacionario 7

En este estacionario hemos seleccionado las siguientes magnitudes de intensidad y voltaje

$$\begin{aligned} I &= 1.49A & s(I) &= 0.01A \\ V_0 &= 150V & s(V_0) &= 1V \end{aligned} \quad (50)$$

Haciendo el ajuste exponencial (fig 14) y la media de al tempertatura del foco frío obtenemos que para el valor estacionario las temperaturas serán:

$$\begin{aligned} T_2^\infty &= 18.924C^\circ & s(T_2^\infty) &= 0.011C^\circ \\ T_1 &= 17.185C^\circ & s(T_1) &= 0.031C^\circ \end{aligned} \quad (51)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores, y los que proceden de la anterior práctica, tenemos que en este caso el calor peltier será:

$$\dot{Q}_P = 29.20J \quad s(\dot{Q})_P = 0.33J \quad (52)$$

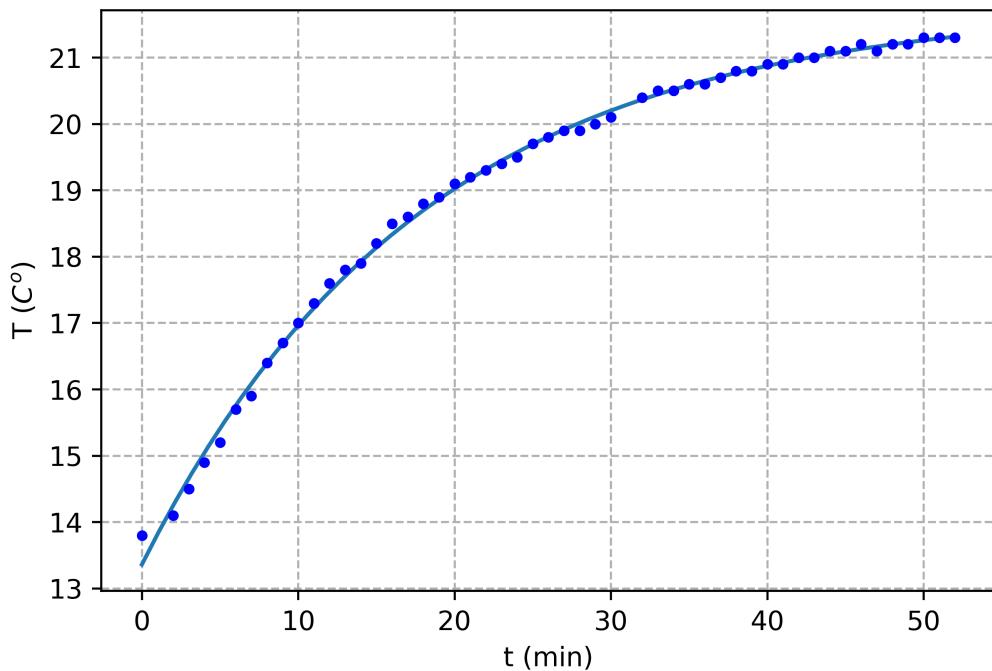


Figure 6: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 120\text{V}$ e $I = 0.525\text{A}$

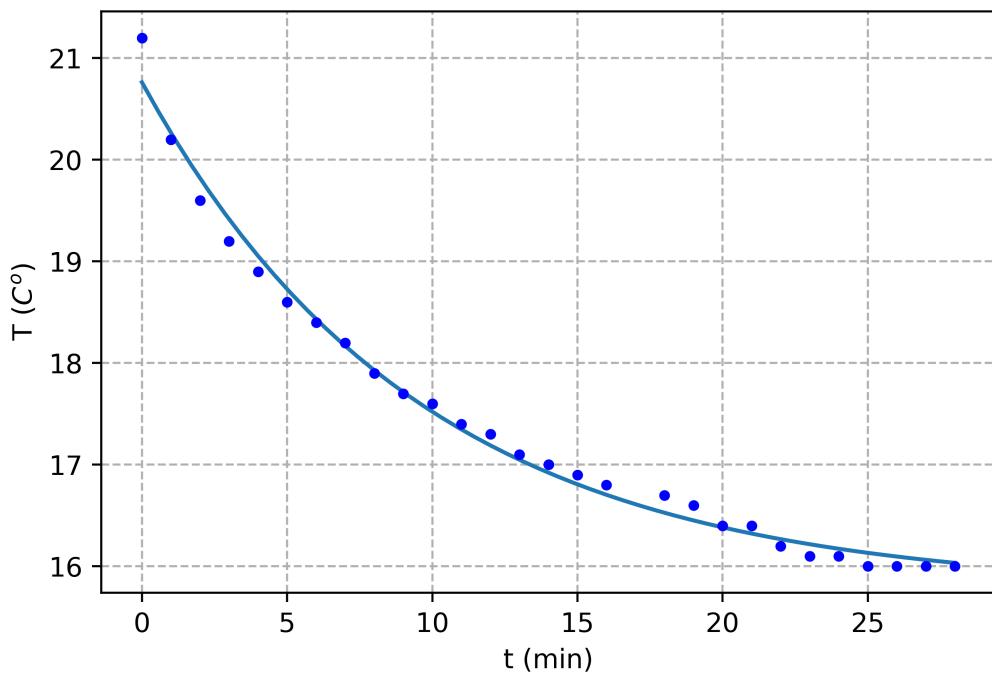


Figure 7: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 120\text{V}$ e $I = 1.001\text{A}$

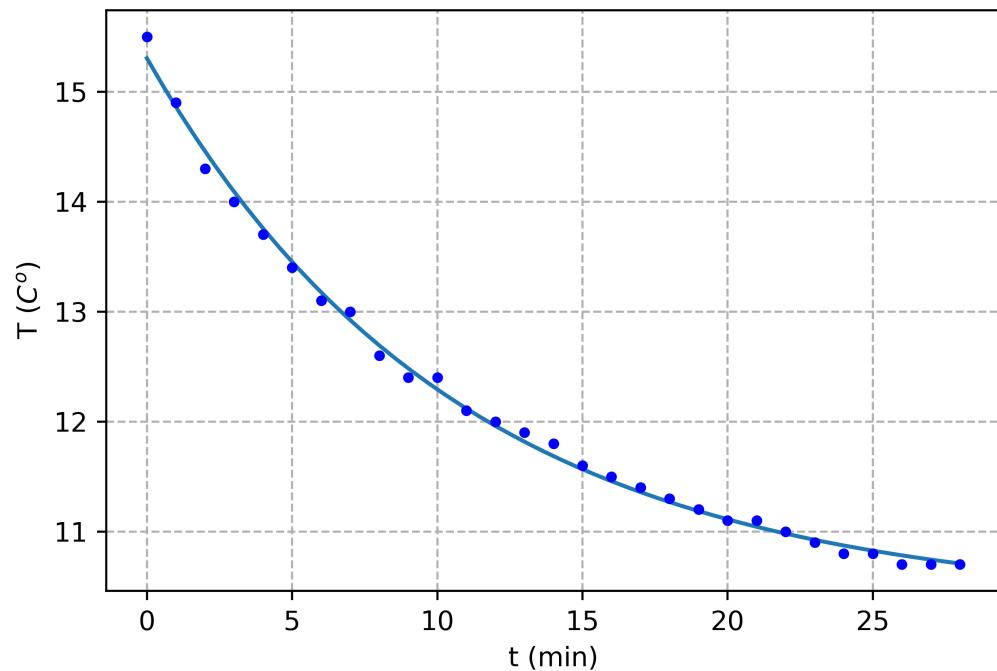


Figure 8: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 120V$ e $I = 1.522A$

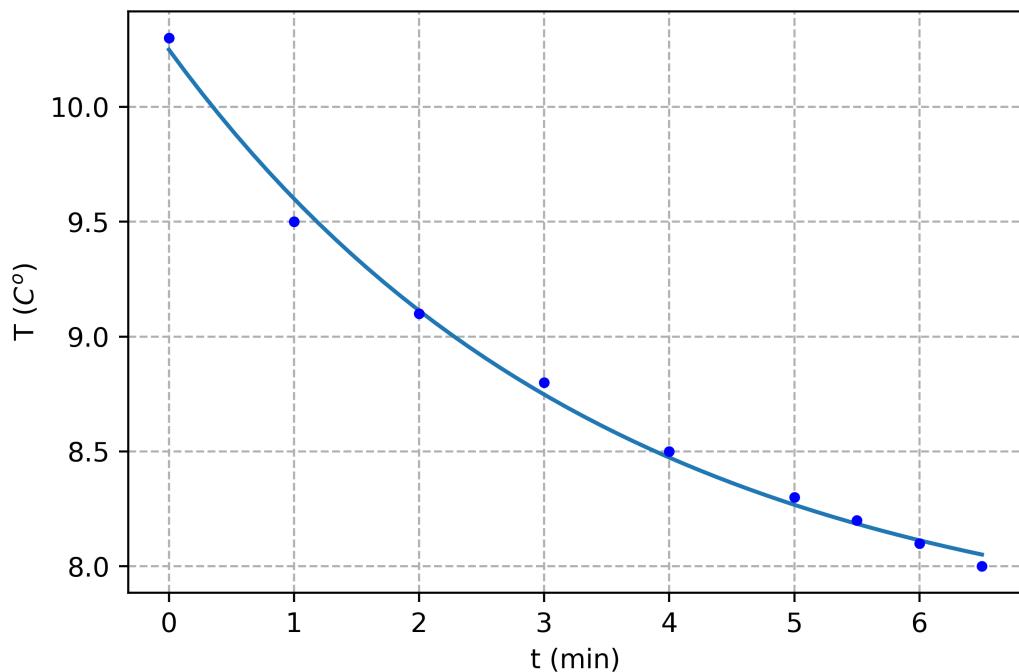


Figure 9: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 120V$ e $I = 2.000A$

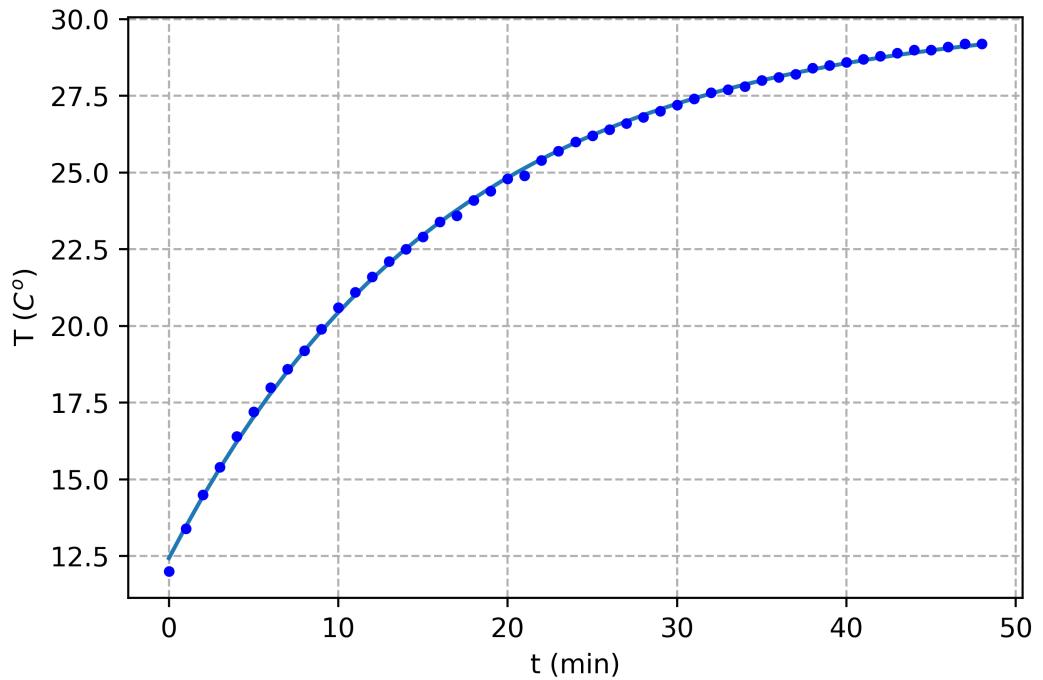


Figure 10: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 150V$ e $I = 0.512A$

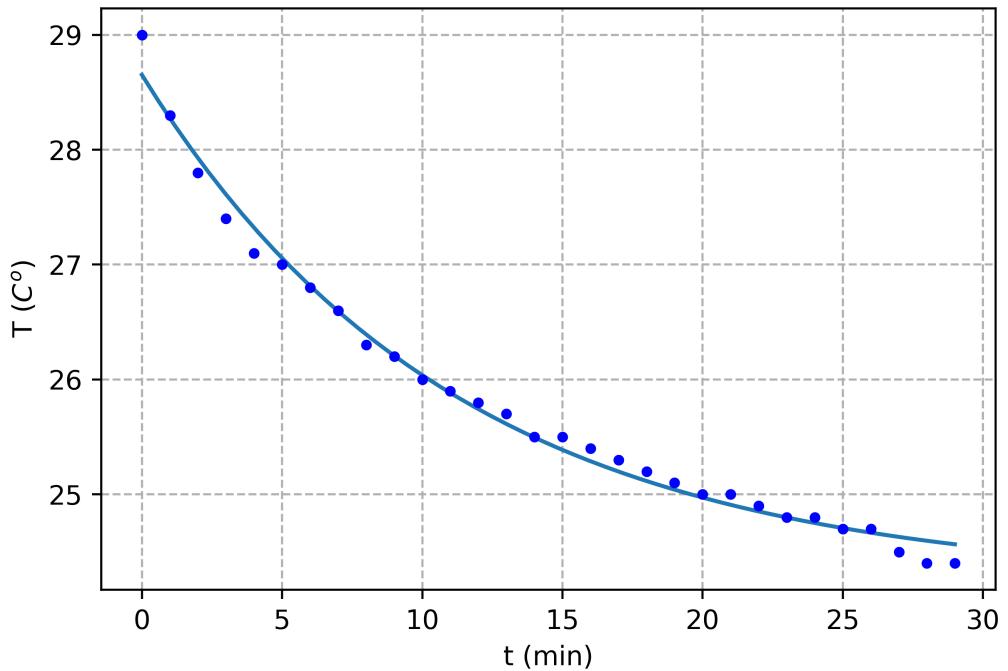


Figure 11: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 150V$ e $I = 1.013A$

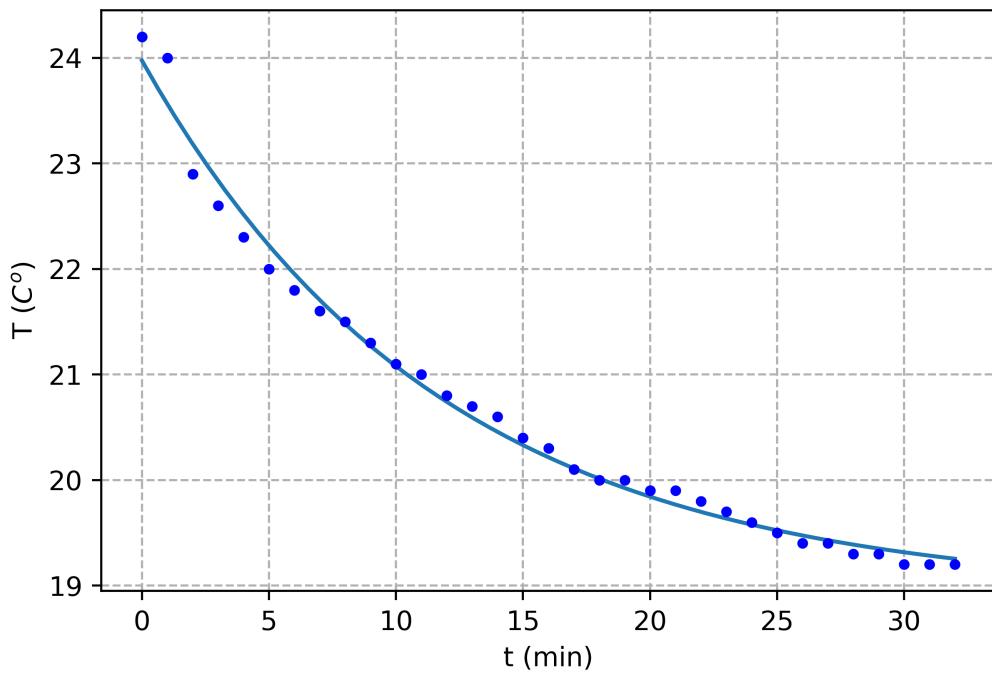


Figure 12: representación de T_2 frente a t para $V_0 = 150V$ e $I = 1.490A$

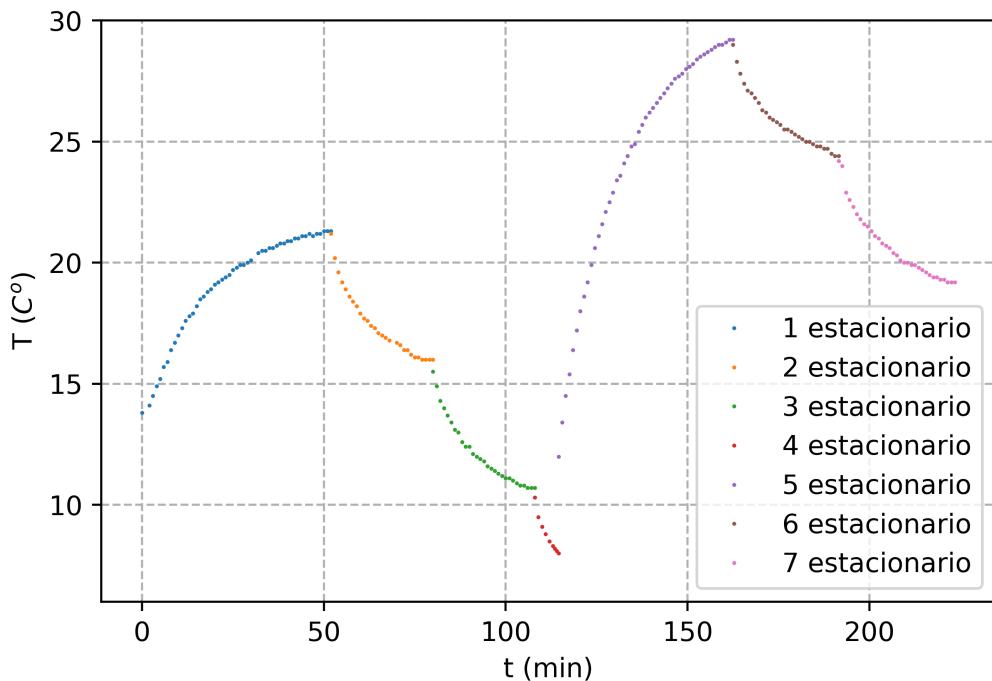


Figure 13: representación gráfica de todas las evoluciones de la temperatura

4.6 Coeficiente Peltier

Una vez tenemos los calores de Peltier para cada intensidad (y voltaje), podemos hacer un ajuste lineal tal que:

$$\dot{Q}_p = a + bI \quad (53)$$

de tal manera que podemos ver claramente la paridad $\pi_{AB} = b$ usando la ecuación 6. Por lo tanto podemos escribir las tablas de los valores de la regresión:

| a (J) | $s(a)$ (J) | π_{AB} (J/A) | $s(\pi_{AB})$ (J/A) |
|---------|------------|------------------|---------------------|
| -2.75 | 0.34 | 20.55 | 0.26 |

Table 18: Valores del ajuste lineal para los pares (I, \dot{Q}_P) con voltaje $V_0 = 120V$

| a (J) | $s(a)$ (J) | π_{AB} (J/A) | $s(\pi_{AB})$ (J/A) |
|---------|------------|------------------|---------------------|
| -2.43 | 0.55 | 21.09 | 0.50 |

Table 19: Valores del ajuste lineal para los pares (I, \dot{Q}_P) con voltaje $V_0 = 150V$

| π_{AB} (J/A) | $s(\pi_{AB})$ (J/A) |
|------------------|---------------------|
| 20.66 | 0.39 |

Table 20: valor medio del coeficiente Peltier

En este caso el valor a es entendido como parte del error de la regresión lineal y la toma de datos. Como es un valor de a relativamente grande, podemos asumir que la incertidumbre de π_{AB} es mucho mayor que la que se obtiene como simple valor de la regresión lineal. Sin embargo no tenemos los suficientes conocimientos como para añadirle dicho error, ya que no sabemos como se comporta el la pendiente con cambios de a . Requeriría un estudio mucho mas riguroso de los datos, inclusive con una mayor toma de datos. Sin embargo como dicho tratamiento no es el objetivo de esta práctica, nos limitaremos a sugerir que la incertidumbre del coeficiente será cualitativamente mayor que la que escribimos.

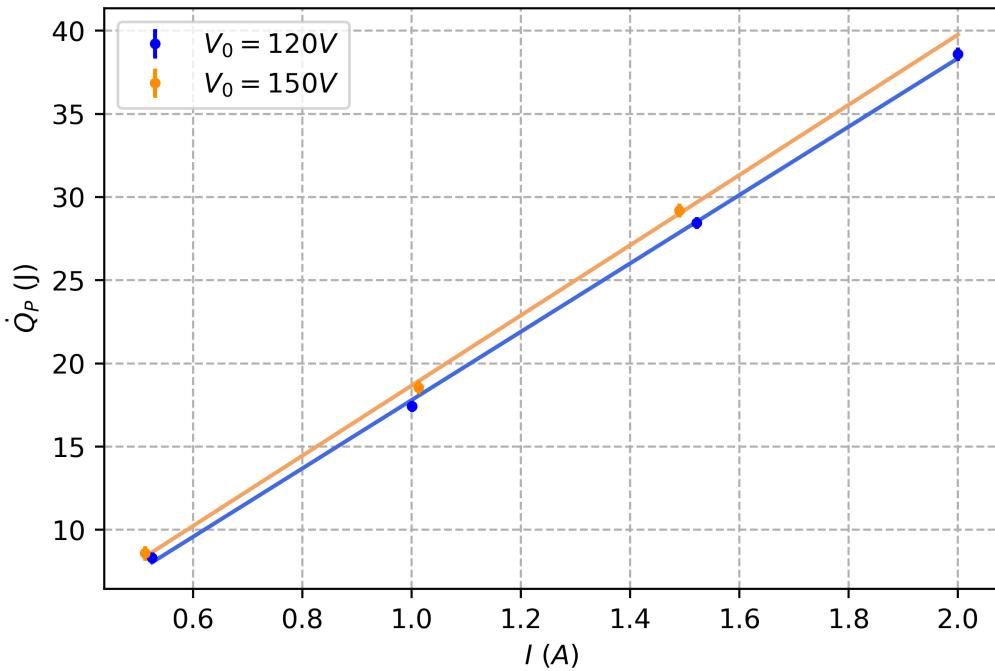


Figure 14: representación gráfica de los pares de valores (I, \dot{Q}_P) para cada voltaje

5 Conclusión

El objetivo de la práctica era estudiar los fenómenos termoeléctricos Seebeck y Peltier, calculando el coeficiente Seebeck y Peltier de un dispositivo termoeléctrico formado por diferentes pares (de dos diferentes tipos de semiconductores). Como podemos ver tanto en las tablas 17 y 20, hemos cumplido dicho objetivo, calculando los valores de los coeficientes. Ahora bien, ¿Hemos cumplido el objetivo de forma plenamente satisfactoria? Vamos a estudiarlo.

Comencemos por el coeficiente Seebeck. Está claro que ambos valores están muy próximos entre si, distanciando menos de un 10% el uno respecto del otro, y dando un valor medio bastante bueno, ya que el valor teórico que debería darnos está en torno a 0.059 V/K . Si consideramos que alguno de los termopares ya no está operativo (lo cuál es perfectamente factible dado el tiempo que tiene la práctica), podemos intuir que realmente está muy próximo al valor teórico. En general podemos decir que está parte de la práctica resulta considerablemente buena. De todos modos es importante recalcar que no hemos hecho todo lo bien que podríamos hacerlo, ya que muchas incertidumbres (como la de los polímetros o termómetros) que hemos considerado lineales podrían haber sido tratadas de manera mucho más rigurosa (viendo las especificaciones del fabricante...), y haber estudiado con más profundidad las distribuciones de frecuencia para cada valor.

Sin duda el coeficiente Peltier es quizás el mejor que los datos, ya que la diferencia entre ellos es poco menos del 5% entre los valores, y dada la elevada incertidumbre que poseen (y más si tenemos en cuenta el error a mencionado en el anterior punto), que sean tan similares es todo

un éxito. Al igual que con Seebeck, es muy mejorable está práctica (sobretodo en cuanto a incertidumbres), pero una mayor investigación es inviable, además de un exceso, ya que no nos importa tanto la precisión como estudiar físicamente el fenómeno, y una cosa está clara: existe una clara correlación lineal entre el calor de peltier y la intensidad que circula el circuito. Lo mismo para la fuerza electromotriz y la diferencia de temperatura entre los puntos del conductor.

Además de estos coeficientes termoeléctricos, tuvimos que calcular otros valores (coeficiente de Fourier, capacidad calorífica), que no tuvieron el mismo ratio de éxito. Las capacidades caloríficas de un voltaje a otro cambiaron muchísimo (en torno a un 20%), lo mismo con los λ_T . Esto es bastante sorprendente si consideramos que las regresiones son muy buenas, aunque el valor de C varía de la una a la otra; y el error en la toma de datos, copia o posterior cálculo tampoco es probable porque, de ser así, también debería afectar a los valores de los coeficientes, aunque solo tomando mas datos podríamos resolver dicho dilema. Las resistencias (tanto R_c como r_i) dan buenos valores, lo cual es bueno. Ocurre lo mismo con la fuerza electromotriz.

Otra forma de mejorar la práctica y que personalmente me hubiera gustado es estudiar mejor los comportamientos al variar la potencia, es decir, hacer estudios con mas potenciales, ya que si nos damos cuenta tanto S como π_{AB} aumentaron al aumentar la potencia, y sin embargo C_a descendió. También hay que decir que la temperatura de foco frío no se mantuvo constante en ningún momento, siempre oscilando, ya que al depender del flujo de agua y de la temperatura de está (que varía a lo largo del día) pudo introducir un error. Por ello haber trabajado con un foco mas constante (y reducir esta parte del error) y un flujo también mas constante mejoraría el experimento.

Dicho todo esto, podemos concluir la práctica, diciendo que en general, ha sido una buena práctica, con conclusiones bastante satisfactorias, que, por lo menos, no contradicen las ideas de Peltier y Seebeck.

6 Datos

6.1 Primer día

| V_{R_c} (V) | I (A) | V_{R_c} (V) | I (A) |
|---------------|---------|---------------|---------|
| 20 | 0.022 | 120 | 0.121 |
| 40 | 0.042 | 140 | 0.14 |
| 60 | 0.062 | 160 | 0.159 |
| 80 | 0.082 | 180 | 0.176 |
| 100 | 0.102 | 200 | 0.195 |

Table 21: Valores para (V, I) para el cálculo de la resistencia R_c

| ΔV_{R_X} (V) | I (mA) | ΔV_{R_X} (V) | I (mA) |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| 0.049 | 100.7 | 0.323 | 65.3 |
| 0.107 | 92.5 | 0.354 | 61.4 |
| 0.155 | 86.2 | 0.382 | 58.0 |
| 0.189 | 81.9 | 0.406 | 55.1 |
| 0.237 | 75.9 | 0.447 | 50.0 |
| 0.285 | 70.1 | - | - |

Table 22: Valores de los pares $(\Delta V_{R_X}, I)$ para $V = 125V$

| ΔV_{R_X} (V) | I (mA) | ΔV_{R_X} (V) | I (mA) |
|----------------------|----------|----------------------|----------|
| 0.089 | 140.5 | 0.439 | 94.7 |
| 0.184 | 125.1 | 0.487 | 89.2 |
| 0.258 | 118.1 | 0.528 | 84.3 |
| 0.315 | 111.0 | 0.581 | 77.8 |
| 0.362 | 104.9 | 0.63 | 71.5 |
| 0.418 | 98.4 | 0.677 | 65.6 |

Table 23: Valores de los pares $(\Delta V_{R_X}, I)$ para $V = 150V$

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 16.6 | 12.0 | 0 | 26.8 | 12.5 | 30 |
| 17.1 | 12.0 | 2 | 27.0 | 12.6 | 31 |
| 18.4 | 12.1 | 4 | 27.2 | 12.6 | 32 |
| 19.5 | 12.0 | 6 | 27.3 | 12.7 | 33 |
| 20.7 | 12.1 | 7 | 27.4 | 12.7 | 34 |
| 21.6 | 12.2 | 8 | 27.6 | 12.7 | 35 |
| 22.0 | 12.2 | 10 | 27.7 | 12.6 | 36 |
| 22.7 | 12.0 | 11 | 27.7 | 12.6 | 37 |
| 23.3 | 12.0 | 15 | 27.8 | 12.5 | 38 |
| 23.6 | 12.3 | 16 | 27.9 | 12.6 | 39 |
| 23.9 | 12.4 | 17 | 28.0 | 12.6 | 40 |
| 24.2 | 12.4 | 18 | 28.1 | 12.6 | 41 |
| 24.6 | 12.4 | 19 | 28.1 | 12.7 | 42 |
| 24.9 | 12.5 | 20 | 28.2 | 12.7 | 43 |
| 25.1 | 12.4 | 21 | 28.3 | 12.7 | 44 |
| 25.4 | 12.4 | 22 | 28.4 | 12.7 | 45 |
| 25.6 | 12.4 | 23 | 28.4 | 12.9 | 46 |
| 25.8 | 12.4 | 24 | 28.5 | 12.9 | 47 |
| 26.0 | 12.5 | 25 | 28.5 | 12.7 | 48 |
| 26.2 | 12.5 | 26 | 28.6 | 12.7 | 49 |
| 26.3 | 12.5 | 27 | 28.6 | 12.7 | 50 |
| 26.5 | 12.5 | 28 | 28.6 | 12.9 | 51 |
| 26.7 | 12.5 | 29 | 28.6 | 12.9 | 52 |

Table 24: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 28.8 | 13.0 | 0 | 34.6 | 13.5 | 23 |
| 29.1 | 13.1 | 1 | 34.7 | 13.5 | 24 |
| 29.5 | 13.1 | 2 | 34.8 | 13.5 | 25 |
| 29.9 | 13.2 | 3 | 34.9 | 13.5 | 26 |
| 30.4 | 13.2 | 4 | 34.9 | 13.5 | 27 |
| 30.8 | 13.3 | 5 | 34.9 | 13.5 | 28 |
| 31.2 | 13.4 | 6 | 35.0 | 13.5 | 29 |
| 31.5 | 13.4 | 7 | 35.1 | 13.5 | 30 |
| 31.9 | 13.5 | 8 | 35.2 | 13.5 | 31 |
| 32.1 | 13.5 | 9 | 35.2 | 13.5 | 32 |
| 32.4 | 13.5 | 10 | 35.3 | 13.5 | 33 |
| 32.7 | 13.5 | 11 | 35.3 | 13.5 | 34 |
| 32.9 | 13.5 | 12 | 35.4 | 13.5 | 35 |
| 33.2 | 13.6 | 13 | 35.4 | 13.5 | 36 |
| 33.4 | 13.6 | 14 | 35.5 | 13.5 | 37 |
| 33.6 | 13.6 | 15 | 35.5 | 13.5 | 38 |
| 33.8 | 13.5 | 16 | 35.6 | 13.6 | 39 |
| 34.0 | 13.5 | 17 | 35.6 | 13.6 | 40 |
| 34.1 | 13.5 | 18 | 35.7 | 13.7 | 41 |
| 34.2 | 13.5 | 19 | 35.7 | 13.7 | 42 |
| 34.3 | 13.5 | 20 | 35.8 | 13.7 | 43 |
| 34.4 | 13.6 | 21 | 35.8 | 13.6 | 45 |
| 34.5 | 13.5 | 22 | 35.8 | 13.5 | 46 |

Table 25: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 150V

6.2 Segundo día

| $T_2 (C^\circ)$ | $T_1 (C^\circ)$ | $t (min)$ | $T_2 (C^\circ)$ | $T_1 (C^\circ)$ | $t (min)$ |
|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------|
| 13.8 | 13.8 | 0 | 19.9 | 14.5 | 27 |
| 14.1 | 13.9 | 2 | 19.9 | 14.5 | 28 |
| 14.5 | 13.9 | 3 | 20.0 | 14.6 | 29 |
| 14.9 | 14.0 | 4 | 20.1 | 14.6 | 30 |
| 15.2 | 14.1 | 5 | 20.4 | 14.6 | 32 |
| 15.7 | 14.1 | 6 | 20.5 | 14.6 | 33 |
| 15.9 | 14.2 | 7 | 20.5 | 14.6 | 34 |
| 16.4 | 14.3 | 8 | 20.6 | 14.5 | 35 |
| 16.7 | 14.4 | 9 | 20.6 | 14.4 | 36 |
| 17.0 | 14.4 | 10 | 20.7 | 14.5 | 37 |
| 17.3 | 14.6 | 11 | 20.8 | 14.5 | 38 |
| 17.6 | 14.6 | 12 | 20.8 | 14.5 | 39 |
| 17.8 | 14.6 | 13 | 20.9 | 14.4 | 40 |
| 17.9 | 14.6 | 14 | 20.9 | 14.5 | 41 |
| 18.2 | 14.7 | 15 | 21.0 | 14.5 | 42 |
| 18.5 | 14.8 | 16 | 21.0 | 14.5 | 43 |
| 18.6 | 14.7 | 17 | 21.1 | 14.5 | 44 |
| 18.8 | 14.7 | 18 | 21.1 | 14.7 | 45 |
| 18.9 | 14.7 | 19 | 21.2 | 14.6 | 46 |
| 19.1 | 14.6 | 20 | 21.1 | 14.6 | 47 |
| 19.2 | 14.6 | 21 | 21.2 | 14.5 | 48 |
| 19.3 | 14.5 | 22 | 21.2 | 14.5 | 49 |
| 19.4 | 14.5 | 23 | 21.3 | 14.6 | 50 |
| 19.5 | 14.5 | 24 | 21.3 | 14.5 | 51 |
| 19.7 | 14.6 | 25 | 21.3 | 14.5 | 52 |
| 19.8 | 14.6 | 26 | 0.0 | 0.0 | 0 |

Table 26: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad 0.525 A

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 21.2 | 14.5 | 0 | 17.0 | 15.1 | 14 |
| 20.2 | 14.5 | 1 | 16.9 | 15.1 | 15 |
| 19.6 | 15.2 | 2 | 16.8 | 15.1 | 16 |
| 19.2 | 15.3 | 3 | 16.7 | 15.1 | 18 |
| 18.9 | 15.3 | 4 | 16.6 | 15.1 | 19 |
| 18.6 | 15.2 | 5 | 16.4 | 15.1 | 20 |
| 18.4 | 15.3 | 6 | 16.4 | 15.1 | 21 |
| 18.2 | 15.2 | 7 | 16.2 | 15.1 | 22 |
| 17.9 | 15.2 | 8 | 16.1 | 15.1 | 23 |
| 17.7 | 15.2 | 9 | 16.1 | 15.1 | 24 |
| 17.6 | 15.0 | 10 | 16.0 | 15.1 | 25 |
| 17.4 | 15.0 | 11 | 16.0 | 15.1 | 26 |
| 17.3 | 15.1 | 12 | 16.0 | 15.1 | 27 |
| 17.1 | 15.2 | 13 | 16.0 | 15.1 | 28 |

Table 27: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad 1.001 A

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 15.5 | 15.3 | 0 | 11.6 | 15.8 | 15 |
| 14.9 | 16.0 | 1 | 11.5 | 15.8 | 16 |
| 14.3 | 16.0 | 2 | 11.4 | 15.8 | 17 |
| 14.0 | 16.1 | 3 | 11.3 | 15.7 | 18 |
| 13.7 | 16.0 | 4 | 11.2 | 15.7 | 19 |
| 13.4 | 16.0 | 5 | 11.1 | 15.8 | 20 |
| 13.1 | 16.0 | 6 | 11.1 | 15.8 | 21 |
| 13.0 | 15.9 | 7 | 11.0 | 15.8 | 22 |
| 12.6 | 15.9 | 8 | 10.9 | 15.8 | 23 |
| 12.4 | 15.9 | 9 | 10.8 | 15.8 | 24 |
| 12.4 | 15.9 | 10 | 10.8 | 15.8 | 25 |
| 12.1 | 15.8 | 11 | 10.7 | 15.8 | 26 |
| 12.0 | 15.8 | 12 | 10.7 | 15.7 | 27 |
| 11.9 | 15.8 | 13 | 10.7 | 15.8 | 28 |
| 11.8 | 15.8 | 14 | 0.0 | 0.0 | 0 |

Table 28: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad 1.522 A

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 10.3 | 16.0 | 0 | 8.3 | 16.9 | 5 |
| 9.5 | 16.8 | 1 | 8.2 | 16.9 | 5 |
| 9.1 | 17.0 | 2 | 8.1 | 16.8 | 6 |
| 8.8 | 17.1 | 3 | 8.0 | 16.8 | 6 |
| 8.5 | 17.0 | 4 | 0.0 | 0.0 | 0 |

Table 29: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad 2.00 A

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 12.0 | 13.3 | 0 | 26.2 | 15.1 | 25 |
| 13.4 | 13.4 | 1 | 26.4 | 15.1 | 26 |
| 14.5 | 13.7 | 2 | 26.6 | 15.2 | 27 |
| 15.4 | 13.7 | 3 | 26.8 | 15.1 | 28 |
| 16.4 | 13.8 | 4 | 27.0 | 15.0 | 29 |
| 17.2 | 13.8 | 5 | 27.2 | 15.0 | 30 |
| 18.0 | 14.0 | 6 | 27.4 | 15.0 | 31 |
| 18.6 | 14.1 | 7 | 27.6 | 15.2 | 32 |
| 19.2 | 14.3 | 8 | 27.7 | 15.1 | 33 |
| 19.9 | 14.2 | 9 | 27.8 | 15.2 | 34 |
| 20.6 | 14.2 | 10 | 28.0 | 15.2 | 35 |
| 21.1 | 14.4 | 11 | 28.1 | 15.2 | 36 |
| 21.6 | 14.5 | 12 | 28.2 | 15.2 | 37 |
| 22.1 | 14.5 | 13 | 28.4 | 15.3 | 38 |
| 22.5 | 14.6 | 14 | 28.5 | 15.3 | 39 |
| 22.9 | 14.6 | 15 | 28.6 | 15.4 | 40 |
| 23.4 | 14.6 | 16 | 28.7 | 15.3 | 41 |
| 23.6 | 14.7 | 17 | 28.8 | 15.4 | 42 |
| 24.1 | 14.7 | 18 | 28.9 | 15.4 | 43 |
| 24.4 | 14.7 | 19 | 29.0 | 15.4 | 44 |
| 24.8 | 14.8 | 20 | 29.0 | 15.4 | 45 |
| 24.9 | 14.8 | 21 | 29.1 | 15.4 | 46 |
| 25.4 | 14.9 | 22 | 29.2 | 15.4 | 47 |
| 25.7 | 15.0 | 23 | 29.2 | 15.4 | 48 |
| 26.0 | 15.1 | 24 | 0.0 | 0.0 | 0 |

Table 30: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad A

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 29.0 | 15.6 | 0 | 25.5 | 16.4 | 15 |
| 28.3 | 16.4 | 1 | 25.4 | 16.2 | 16 |
| 27.8 | 16.5 | 2 | 25.3 | 16.2 | 17 |
| 27.4 | 16.5 | 3 | 25.2 | 16.2 | 18 |
| 27.1 | 16.5 | 4 | 25.1 | 16.2 | 19 |
| 27.0 | 16.5 | 5 | 25.0 | 16.2 | 20 |
| 26.8 | 16.4 | 6 | 25.0 | 16.2 | 21 |
| 26.6 | 16.4 | 7 | 24.9 | 16.2 | 22 |
| 26.3 | 16.4 | 8 | 24.8 | 16.1 | 23 |
| 26.2 | 16.2 | 9 | 24.8 | 16.1 | 24 |
| 26.0 | 16.2 | 10 | 24.7 | 16.1 | 25 |
| 25.9 | 16.2 | 11 | 24.7 | 16.2 | 26 |
| 25.8 | 16.2 | 12 | 24.5 | 16.1 | 27 |
| 25.7 | 16.2 | 13 | 24.4 | 16.1 | 28 |
| 25.5 | 16.2 | 14 | 24.4 | 16.2 | 29 |

Table 31: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad 1.013 A

| T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) | T_2 (C°) | T_1 (C°) | t (min) |
|---------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|
| 24.2 | 16.9 | 0 | 20.1 | 17.2 | 17 |
| 24.0 | 16.9 | 1 | 20.0 | 17.2 | 18 |
| 22.9 | 17.4 | 2 | 20.0 | 17.2 | 19 |
| 22.6 | 17.4 | 3 | 19.9 | 17.2 | 20 |
| 22.3 | 17.4 | 4 | 19.9 | 17.2 | 21 |
| 22.0 | 17.3 | 5 | 19.8 | 17.2 | 22 |
| 21.8 | 17.3 | 6 | 19.7 | 17.2 | 23 |
| 21.6 | 17.2 | 7 | 19.6 | 17.2 | 24 |
| 21.5 | 17.3 | 8 | 19.5 | 17.2 | 25 |
| 21.3 | 17.2 | 9 | 19.4 | 17.2 | 26 |
| 21.1 | 17.2 | 10 | 19.4 | 17.1 | 27 |
| 21.0 | 17.2 | 11 | 19.3 | 17.2 | 28 |
| 20.8 | 17.3 | 12 | 19.3 | 17.0 | 29 |
| 20.7 | 17.3 | 13 | 19.2 | 16.9 | 30 |
| 20.6 | 17.3 | 14 | 19.2 | 16.9 | 31 |
| 20.4 | 17.3 | 15 | 19.2 | 16.9 | 32 |
| 20.3 | 17.2 | 16 | 0.0 | 0.0 | 0 |

Table 32: Valores (T_2, T_1, t) tomados en el laboratorio para voltaje 125V e intensidad 1.502A

| A (C°) | $s(A)$ (C°) | B (C°) | $s(B)$ (C°) | C (min^{-1}) | $s(C)$ (min^{-1}) |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| 21.775221 | 0.003000 | -8.412728 | 0.003300 | 0.055884 | 0.000001 |

Table 33: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 120V$ e $I = 0.525A$

| $A (C^o)$ | $s(A) (C^o)$ | $B (C^o)$ | $s(B) (C^o)$ | $C (\min^{-1})$ | $s(C) (\min^{-1})$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------------|--------------------|
| 15.767466 | 0.009300 | 4.995179 | 0.010000 | 0.104656 | 0.000040 |

Table 34: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 120V$ e $I = 1.001A$

| $A (C^o)$ | $s(A) (C^o)$ | $B (C^o)$ | $s(B) (C^o)$ | $C (\min^{-1})$ | $s(C) (\min^{-1})$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------------|--------------------|
| 10.347455 | 0.004300 | 4.956257 | 0.003700 | 0.093529 | 0.000012 |

Table 35: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 120V$ e $I = 1.522A$

| $A (C^o)$ | $s(A) (C^o)$ | $B (C^o)$ | $s(B) (C^o)$ | $C (\min^{-1})$ | $s(C) (\min^{-1})$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------------|--------------------|
| 7.648912 | 0.017000 | 2.599763 | 0.014000 | 0.287077 | 0.001100 |

Table 36: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 120V$ e $I = 2.000A$

| $A (C^o)$ | $s(A) (C^o)$ | $B (C^o)$ | $s(B) (C^o)$ | $C (\min^{-1})$ | $s(C) (\min^{-1})$ |
|-----------|--------------|------------|--------------|-----------------|--------------------|
| 30.170666 | 0.003400 | -17.737908 | 0.003500 | 0.060058 | 0.000000 |

Table 37: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 150V$ e $I = 0.512A$

| $A (C^o)$ | $s(A) (C^o)$ | $B (C^o)$ | $s(B) (C^o)$ | $C (\min^{-1})$ | $s(C) (\min^{-1})$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------------|--------------------|
| 24.238308 | 0.009800 | 4.413459 | 0.008500 | 0.089707 | 0.000033 |

Table 38: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 150V$ e $I = 1.013A$

| $A (C^o)$ | $s(A) (C^o)$ | $B (C^o)$ | $s(B) (C^o)$ | $C (\min^{-1})$ | $s(C) (\min^{-1})$ |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------------|--------------------|
| 18.924071 | 0.011000 | 5.050366 | 0.011000 | 0.085228 | 0.000028 |

Table 39: Valores del ajuste exponencial para $V_0 = 150V$ e $I = 1.490A$

7 Anexo

En la siguiente figura tenemos un montaje de los elementos del laboratorio para el cálculo del coeficiente seebeck. Son los mismos elementos que hemos mencionado en el subapartado de material, pero aquí vamos a mostrarlos. Tenemos que:

1. Dispositivo termoeléctrico. Aunque no se vea, dentro de la caja está nuestro dispositivo termoeléctrico, formado por 142 termopares de semiconductores de tipo n y p. En general la diferencia entre ambos es como transmiten la electricidad: uno transmite electricidad mediante electrones (portadores de carga negativos) y el otro mediante huecos (huecos electrónicos, portadores de carga positivos). La diferencia está en que ambos semiconductores tienen densidades electrónicas diferentes debido a esta forma de transmitir la carga: uno será aceptor y otro dador.
2. Bornes del dispositivo. En estas regiones podemos conectar los polímetros (o lo que sea) para calcular el potencial generado por el efecto Seebeck.
3. Tubos de agua. Permiten refrigerar la unión fría y mantenerla a temperatura constante.
4. Resistencia calefactora. La usamos para aumentar la temperatura de la unión caliente, y así tener una diferencia de temperatura lo suficientemente grande como para que aparezca un potencial observable. Usa el efecto Joule para calentar el dispositivo. Siempre estará conectada a 5. por cables.
5. Generador de corriente alterna. Aportará la potencia necesaria a nuestra resistencia calefactora para que aumente la temperatura. Usamos corriente alterna debido a su eficiencia a la hora de transmitir grandes voltajes.
6. Termómetro digital. Mide la temperatura de la unión fría y caliente en cada momento.
7. Polímetro.
8. Polímetro.
9. Resistencia variable que podremos controlar accionando la rueda 11. Por cada vuelta aumentará 10Ω la resistencia, hasta 100Ω , aunque no será necesario llegar a dicha cantidad.
10. Bornes mediante los cuales conectaremos los cables para el montaje de la imagen

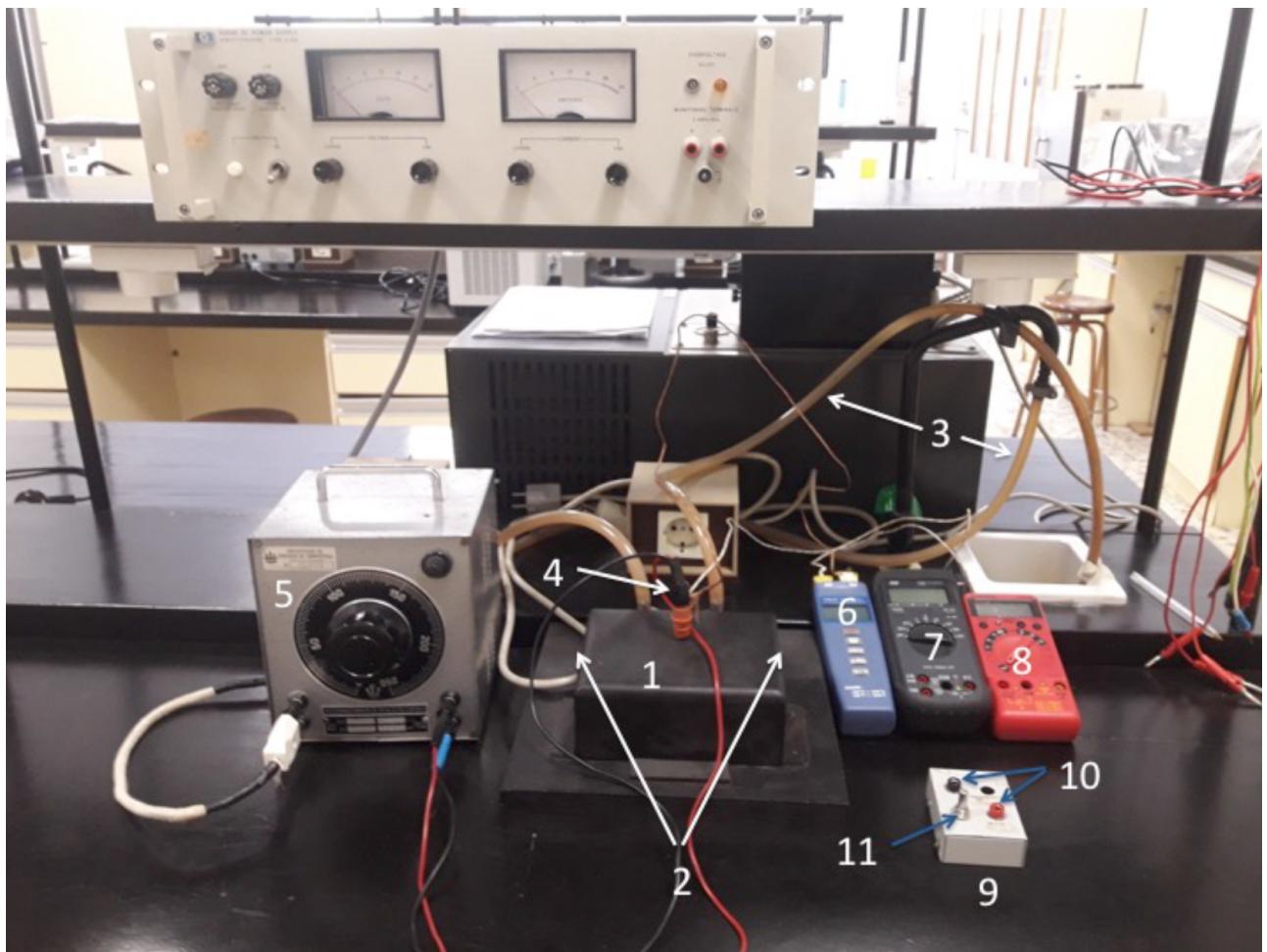


Figure 15: montaje para la toma de datos de la temperatura.

En la figura siguiente mostramos el montaje experimental llevado acabo para calcular la resistencia R_c . Como podemos ver tenemos la resistencia conectada por los cables 1-2 al generador, y por 3-4 a un polímetro conectado en serie, por lo que podemos intuir que actuará como un amperímetro. Luego el 5-6 volverá al generador, cerrando el circuito. Además podemos ver un polímetro conectado en paralelo a los bornes del generador, por lo que actuará como un voltímetro. Es muy importante conectar bien los bornes del polímetro, ya que es muy probable que salten chispas o entren en contacto, provocando un cortocircuito y romper el fusible del voltímetro. Recordemos que también calculamos R_c conectando los cables 2-3 directamente a un polímetro y seleccionando la parte de ohmímetro.

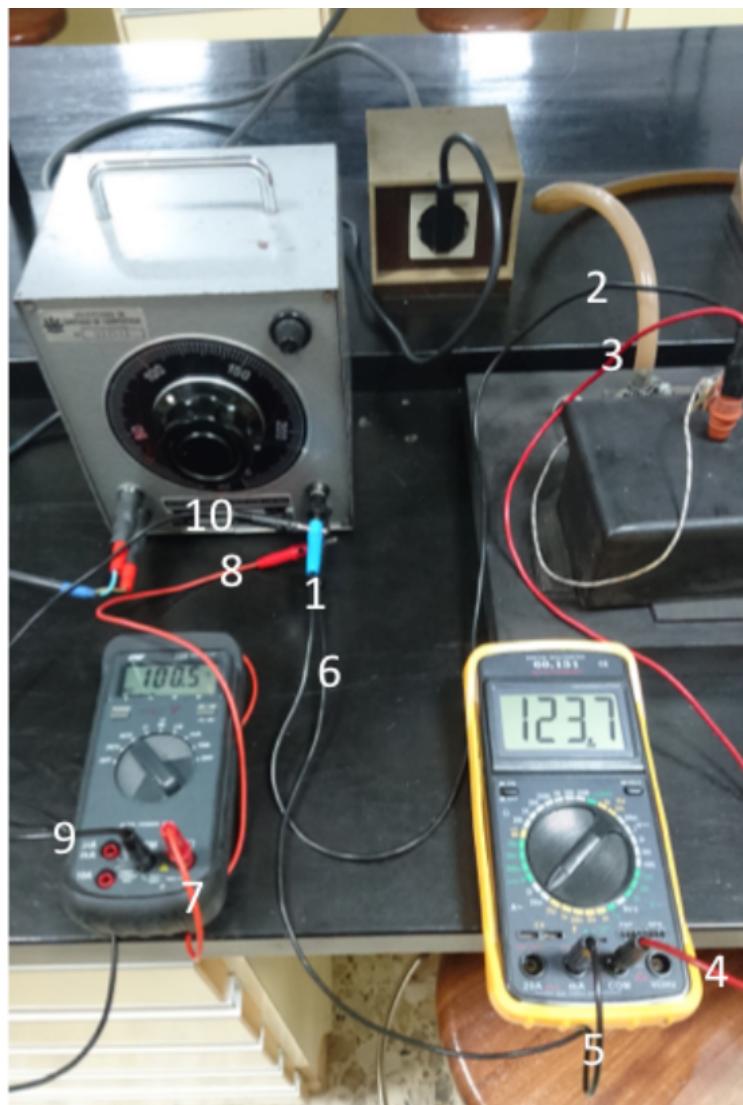


Figure 16: montaje experimental para el cálculo de R_c .

En la siguiente figura tenemos el montaje para la toma de datos para la evolución de la temperatura. Tenemos conectada la resistencia R_c al generador, y un voltímetro en paralelo que nos indique constantemente la potencia que trasmite el generador. Además tenemos el termómetro, y donde aparecen ambas temperaturas.

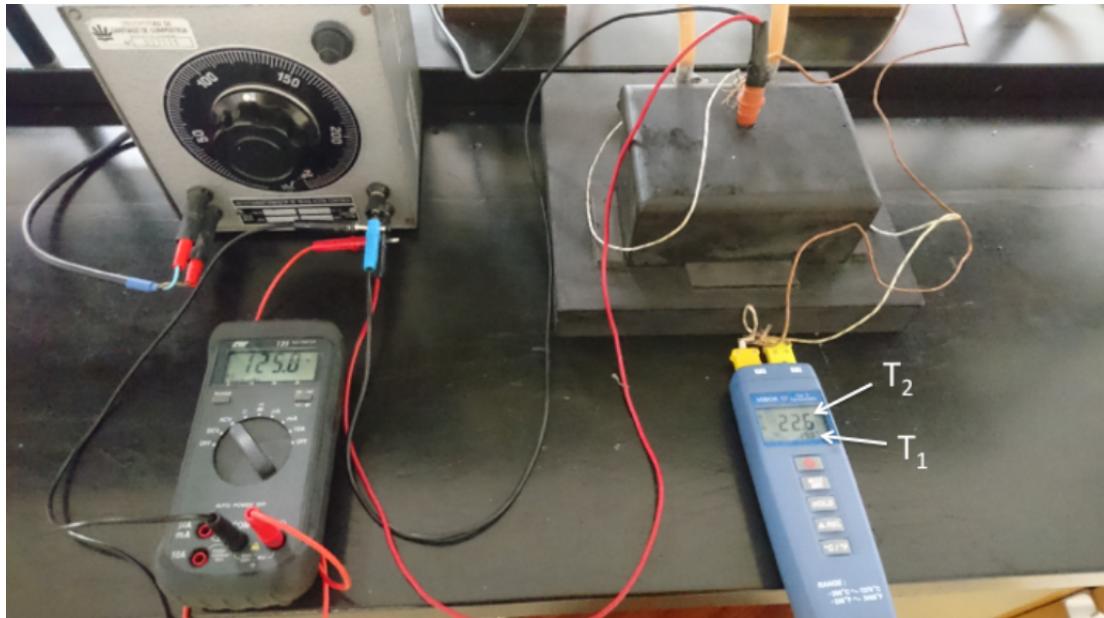


Figure 17: montaje experimental para la toma de datos de la temperatura.

En la siguiente imagen podemos ver un voltímetro conectado en serie a los bornes del dispositivo termoeléctrico, para tomar directamente la potencia. No importa si 3-4 y 1-2 o 2-3 y 4-1, solo cambiará el signo del potencial.

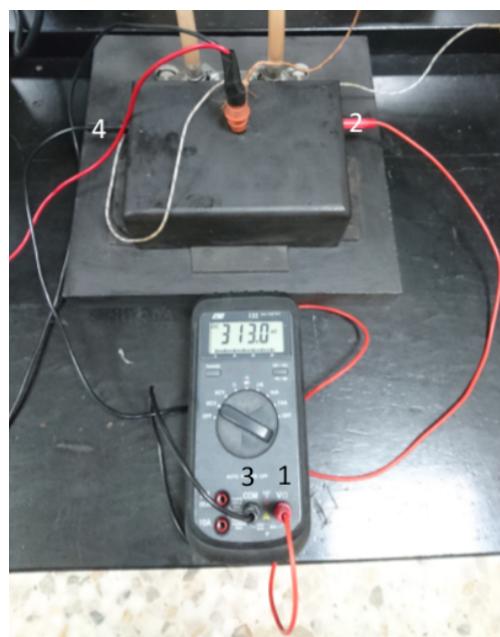


Figure 18: montaje experimental para la ε directamente.

Tenemos que uno de los bornes del dispositivo están conectados de 1-2 a un amperímetro (por eso en serie) midiendo la intensidad del circuito en todo momento. Luego el circuito se cierra conectando el amperímetro a la resistencia variable R_v 3-4 y está otra vez al borne del dispositivo 5-6. Además tendremos un voltímetro conectado a la resistencia variable (en paralelo a esta) que medirá la diferencia de potencial entre los dos puntos de la resistencia en cada momento (mediante 7-8 y 9-10).

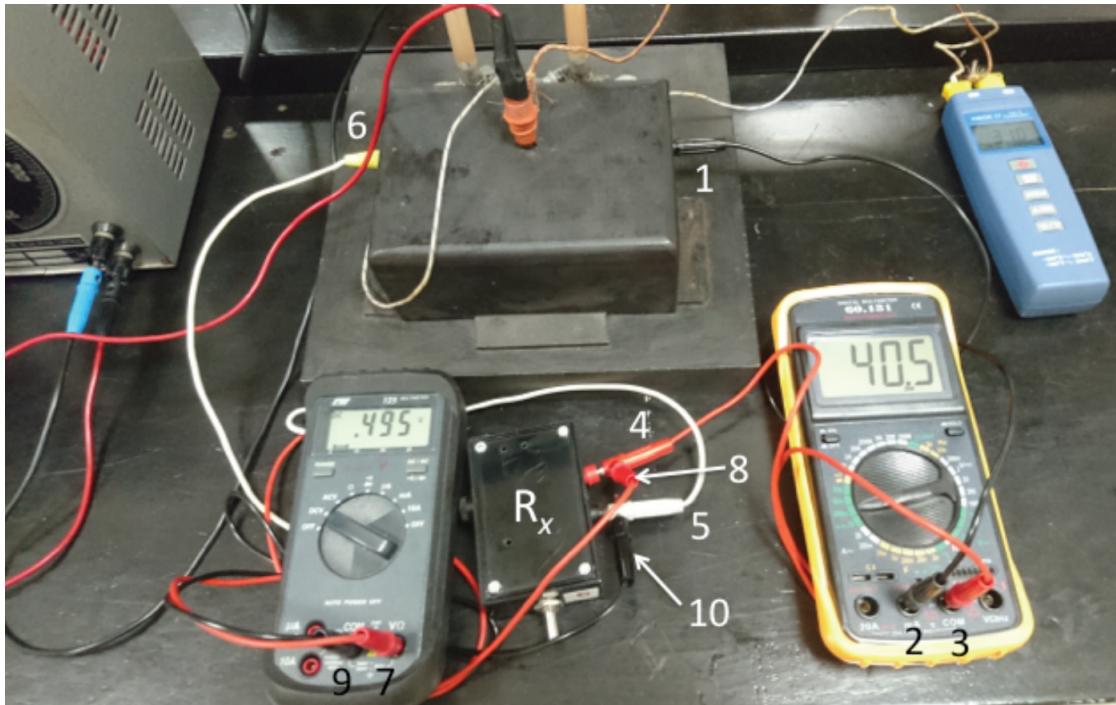


Figure 19: montaje experimental para el cálculo de ε indirectamente.

En la figura siguiente 20 vemos el material necesario para calcular el calor de Peltier y el coeficiente de Peltier. Muchos elementos ya los conocemos porque han sido mencionados en la figura 15. Solo introduciremos uno:

- 1. Es nuestro generador de corriente continua que conectaremos mediante 2. a los bornes del dispositivo (3.) con un amperímetro conectado en serie. Es importante no cambiar la posición de los cables una vez hemos encontrado el sentido correcto, ya que cambia el sentido de la corriente y por tanto del calor.

El montaje final debe quedar como en la figura 21.

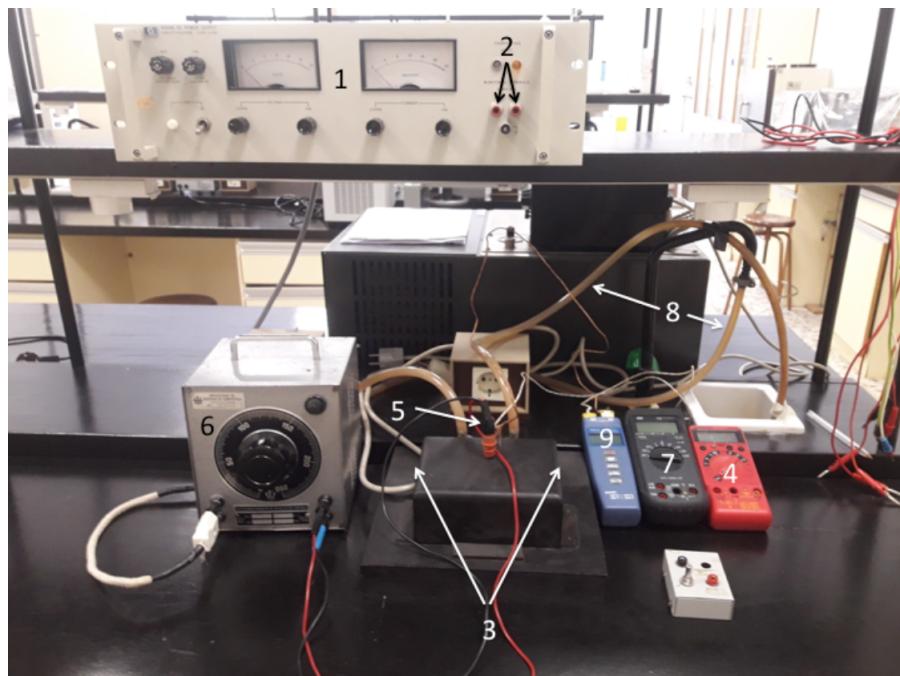


Figure 20: elementos para obtener las evoluciones de la temperatura para Peltier

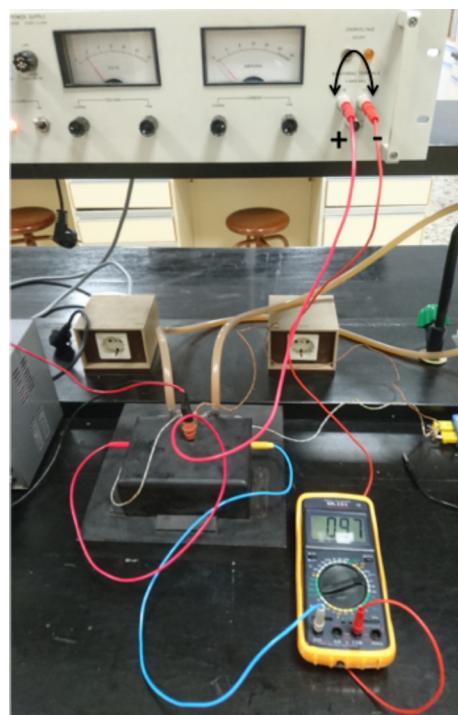


Figure 21: montaje para obtener las evoluciones de la temperatura para Peltier