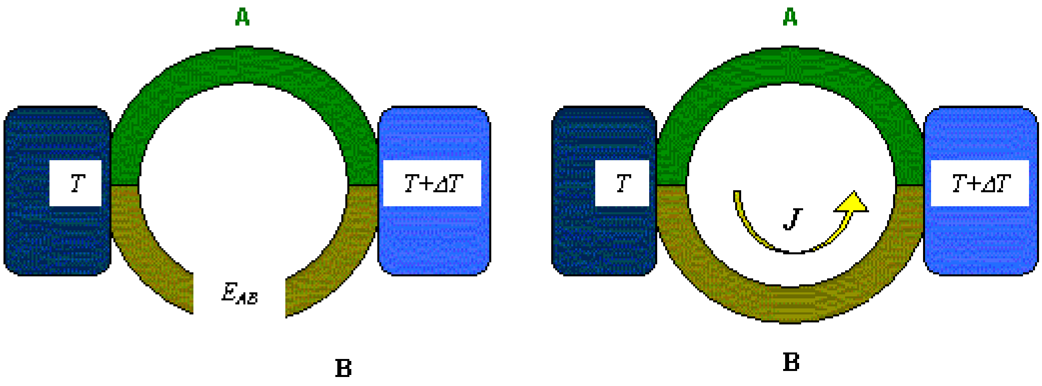
FENOMENOS TERMOELECTRICOS: EFECTO SEEBECK (TS)

1. Objetivos y Fundamento Teórico

El objetivo de esta práctica es el cálculo del coeficiente Seebeck de un dispositivo termoeléctrico. Según el efecto Seebeck, dos materiales conductores A y B conectados entre sí a diferente temperatura T y T+ΔT generan una fuerza electromotriz ε:



1a 1b

La fuerza electromotriz ε generada es directamente proporcional a la diferencia de temperatura en las dos uniones (ΔT), siendo la constante de proporcionalidad el coeficiente de Seebeck (S) objeto de estudio:

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

El dispositivo termoeléctrico que disponemos en laboratorio consta de 142 pares de conductores A y B (un semiconductor dopado tipo p y un semiconductor dopado tipo n). Los 142 pares A y B o termopares se encuentran unidos en uno de sus extremos a una unión "fría" refrigerada por el agua del grifo, mientras que en su otro extremo se encuentran unidos a una unión "caliente" que tiene asociada una resistencia calefactora R_c que proporciona a la unión una potencia W_{R_c}.

La temperatura de la unión "fría" T_1 se mantendrá (más o menos) constante ya que está controlada por el agua del grifo. Sin embargo, la temperatura de la unión "caliente" T_2 evolucionará de forma exponencial en el tiempo, como se deriva de la ecuación de balance energético establecida para esta unión:

$$C\frac{dT_2}{dt} = W_{R_c} - \lambda_T(T_2 - T_1) \qquad (2)$$

En la ecuación anterior, C es la capacidad calorífica del dispositivo termoeléctrico, y el segundo término a la derecha de la igualdad corresponde a la pérdida de energía sufrida por la unión caliente debida al efecto Fourier entre las dos uniones del dispositivo, cuya conductividad térmica es λ_T. Sabiendo que en estado estacionario $\frac{dT_2}{dT} = 0$, de la Ec. 2 obtenemos:

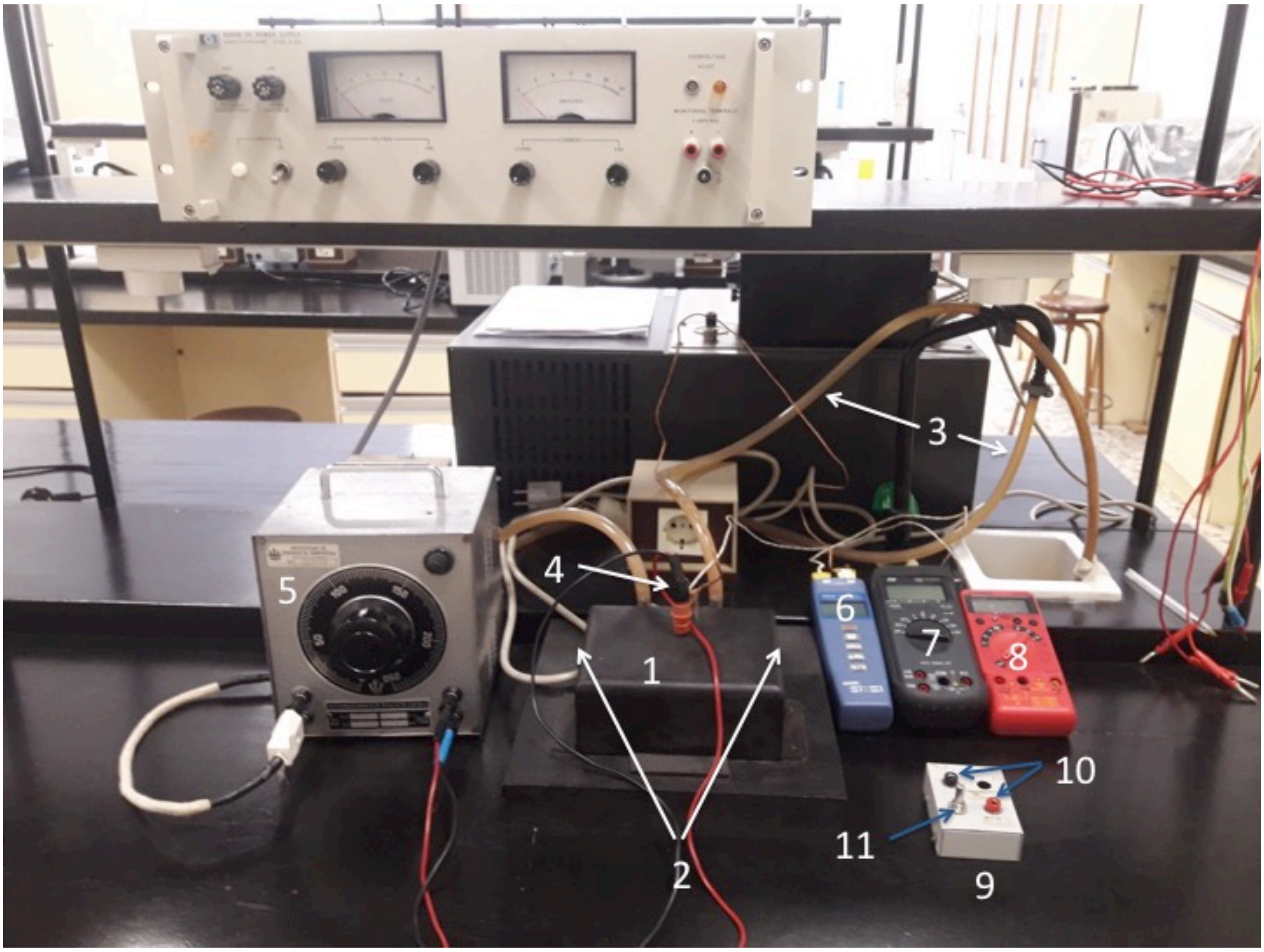
$$W_{R_c} = \lambda_T (T_2^\infty - T_1) \quad (3)$$

donde T_2^∞ es la temperatura de la unión caliente en el estado estacionario. Incorporando la Ec. 3 en la Ec. 2, separando las variables T_2 y t en esta última ecuación e integrando llegamos a:

$$T_2(t) = \underset{A}{\overset{C^\circ}{T_2^\infty}} - \underset{O}{\overset{C^\circ}{(T_2^\infty - T_2^0)}}\, e^{-\overset{S^{-1}}{\underset{C}{\frac{\lambda_T}{C}}}t} \quad (4)$$

donde T_2^0 es la temperatura de la unión caliente a $t = 0$. Es decir, esperamos que la temperatura de la unión caliente evolucione en el tiempo de forma exponencial hacia su valor asintótico T_2^∞. Como explicaremos en el apartado "Modus Operandi" más abajo, durante la sesión de laboratorio nosotros tomaremos valores de $T_2(t)$. Un tratamiento correcto de estos valores implicará su ajuste a la Ec.4 para así obtener T_2^∞, valor que utilizaremos para calcular $\Delta T = (T_2^\infty - T_1)$ en la Ec. 1 y por tanto determinar S, que es, como decimos, el objetivo último de la práctica.

2. Dispositivo Experimental



En el laboratorio, el dispositivo termoeléctrico (1) se encuentra debajo de una placa que lo protege y fija al puesto de trabajo. En los extremos del dispositivo dispondremos de dos bornes (2) que nos permitirán, entre otras cosas, la medida directa de la fuerza electromotriz ε, como se explica en "Modus Operandi".

La temperatura de una de las uniones del dispositivo (unión "fría") viene controlada por un circuito de agua del grifo (3), mientras que la temperatura de la otra unión (unión "caliente") viene determinada por una resistencia externa (4), la cual está conectada a un generador de corriente alterna (5). De esta forma, si fijamos el voltaje del generador a un valor V, la resistencia externa calefactora R_c disipará por efecto Joule una potencia $W_{R_c} = \frac{V^2}{R_c}$ que tendrá como efecto el aumento de la temperatura de la unión "caliente".

Podremos saber en cada instante la temperatura de la unión "fría" (T_1) y la temperatura de la unión "caliente" (T_2) mediante un termómetro digital (6), el cual dispone de dos sondas, asociada cada una de ellas a cada una de las dos uniones del dispositivo termoeléctrico. Además, dispondremos de dos multímetros que utilizaremos para medir voltajes (7) e intensidades (8), y de un potenciómetro (9) que actúa como una resistencia variable y que conectaremos al dispositivo termoeléctrico mediante sus bornes (10), según se explica en "Modus Operandi". El flujo de la corriente eléctrica que pasa a través del potenciómetro lo controlaremos girando la rueda 11, mediante la que aumentaremos o disminuiremos la resistencia variable.

3. Modus Operandi

A continuación se describe paso a paso todo el procedimiento experimental que se ha de llevar a cabo en el laboratorio.

<u>1. Cálculo de la resistencia calefactora R_c:</u>

1.1. En el circuito formado por el generador de corriente alterna y la resistencia calefactora, intercalamos el amperímetro en serie y el voltímetro en paralelo, como se muestra en la **Fotografía 1 del "Anexo"**. En los multímetros, nos acordamos de poner las unidades de voltaje e intensidad correspondientes a corriente alterna y no a las de continua. Los valores de la intensidad se moverán en el rango de los mA dado el valor alto de la resistencia calefactora.

1.2. En la rueda de voltajes del generador, fijamos 10 voltajes diferentes (hasta los 200 V), y anotamos los valores de voltaje e intensidad dados por los dos multímetros. Con estos 10 pares de datos (V,I) realizamos un ajuste lineal del cual obtendremos el valor de R_c según la ley de Ohm, $V = IR_c$.

1.3. Eliminamos del circuito el amperímetro, dejando el voltímetro, el cual utilizaremos en el punto siguiente para saber el valor preciso de voltaje suministrado por el generador a la resistencia calefactora.

2. Calentamiento de la unión “caliente” y evolución al estado estacionario:

2.1. Encendemos el termómetro digital y nos aseguramos de que el grifo del agua fría que refrigera la unión “fría” se encuentra abierto. Fijamos el voltaje del generador de corriente alterna a 125 V (ver **Fotografía 2 en el “Anexo”**). La temperatura de la unión “caliente” T_2 comienza a subir.

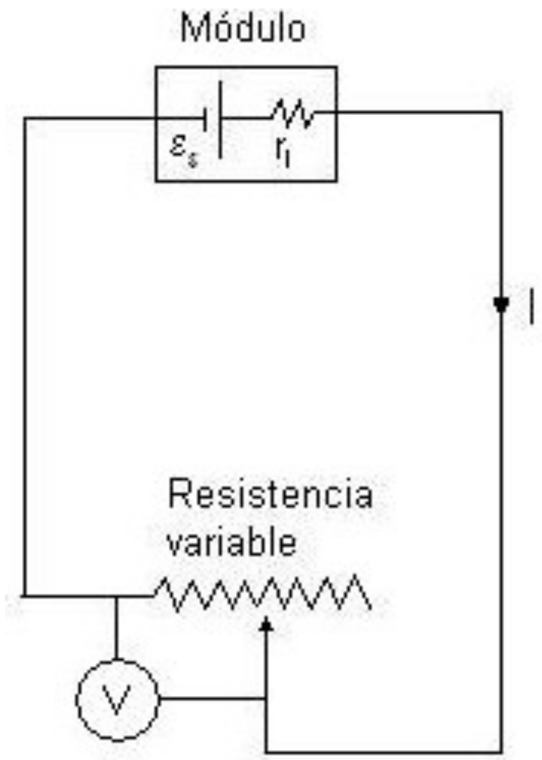
2.2. Anotamos T_1 y T_2 cada minuto hasta que observemos que T_2 no suba más de 0.1°C cada 2 minutos. Llegados a este punto, supondremos que estamos muy próximos al estado estacionario del dispositivo termoeléctrico.

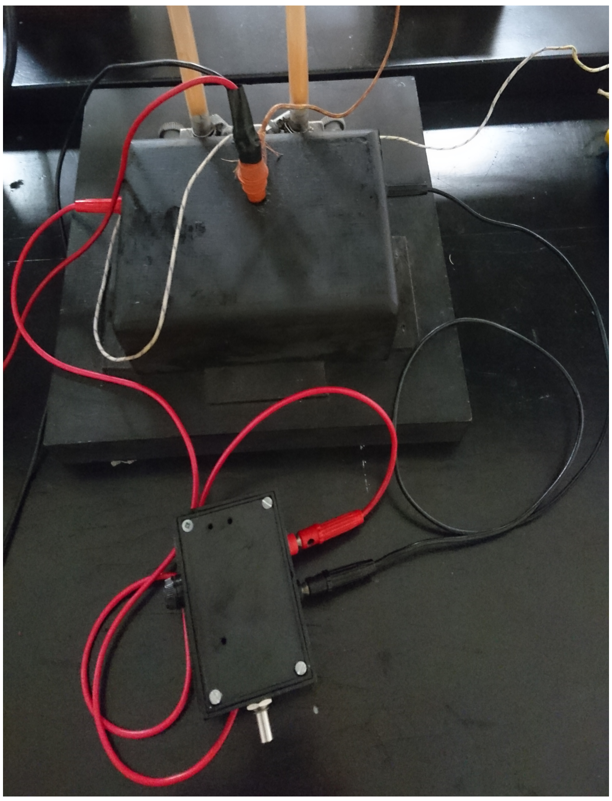
3. Análisis del estado estacionario: Medida de la fuerza electromotriz ε

3.1. Sin modificar el voltaje del generador (si lo hacemos alteraríamos el estado estacionario), quitamos el voltímetro del circuito generador-resistencia calefactora y pasamos a medir la fuerza electromotriz Seebeck. Lo hacemos de dos formas, en “abierto” y en “cerrado”.

3.2. Abierto: con el voltímetro medimos directamente en los bornes del dispositivo termoeléctrico ε (ver **Fotografía 3 en el “Anexo”**). Trabajamos ahora con unidades de corriente continua.

3.3. Cerrado: conectamos el módulo termoeléctrico al potenciómetro que actúa como resistencia variable cerrando por tanto circuito. Por el circuito circula una intensidad I:





Ahora tenemos dos caídas de potencial debidas a la resistencia interna r_i del módulo termoeléctrico y a la resistencia variable R_x. La fuerza electromotriz será por tanto igual a la suma de estas dos caídas de potencial:

$$\varepsilon = \Delta V_{r_i} + \Delta V_{R_x}$$

y puesto que $\Delta V_{r_i} = I r_i$:

$$\Delta V_{R_x} = \varepsilon - I r_i \qquad (5)$$

Midiendo por tanto la caída de potencial en los bornes de la resistencia variable y la intensidad que circula por el circuito podremos calcular ε y r_i. Para ello, obtendremos diferentes pares (ΔV_{R_x},I) y ajustaremos estos datos a una regresión lineal con término independiente en acuerdo con la Ec. 5, como se explica a continuación.

La intensidad la controlaremos aumentando o disminuyendo la resistencia variable (girando la rueda del potenciómetro en sentido horario o antihorario, respectivamente). Nuestra resistencia variable puede tomar valores entre 0 y 100 Ω, pudiéndose realizar diez giros completos de la rueda del potenciómetro (es decir, cada giro completo corresponde aproximadamente a un incremento de 10 Ω de la resistencia variable).

Utilizaremos únicamente los dos primeros giros de la rueda en sentido horario ya que para valores mayores de la resistencia ahogaremos muy rápidamente en intensidad el circuito. Para cada posición de la rueda del potenciómetro calcularemos ΔV_{R_x}e I intercalando en el circuito el voltímetro en paralelo y el amperímetro en serie, como se muestra en la **Fotografía 4 del "Anexo"**. Tomaremos 10 pares de valores (ΔV_{R_x},I) y llevaremos a cabo el ajuste dado por la Ec. 5 para obtener ε y r_i. Comprobamos que el valor de ε resultante del ajuste es consistente con el valor obtenido en el punto 3.2. anterior, cuando hicimos su medición en "abierto".

3.4. Desmontamos el circuito módulo termoeléctrico-resistencia variable y volvemos a colocar el voltímetro en paralelo en los bornes del generador de corriente alterna.

<u>4. Nuevo estado estacionario:</u>

4.1. Repetimos los puntos 2 y 3 anteriores fijando el voltaje del generador de corriente alterna a 150 V.

4.2. En caso de tener tiempo, repetimos el punto anterior para un voltaje de 175 V.

4. Tratamiento de datos

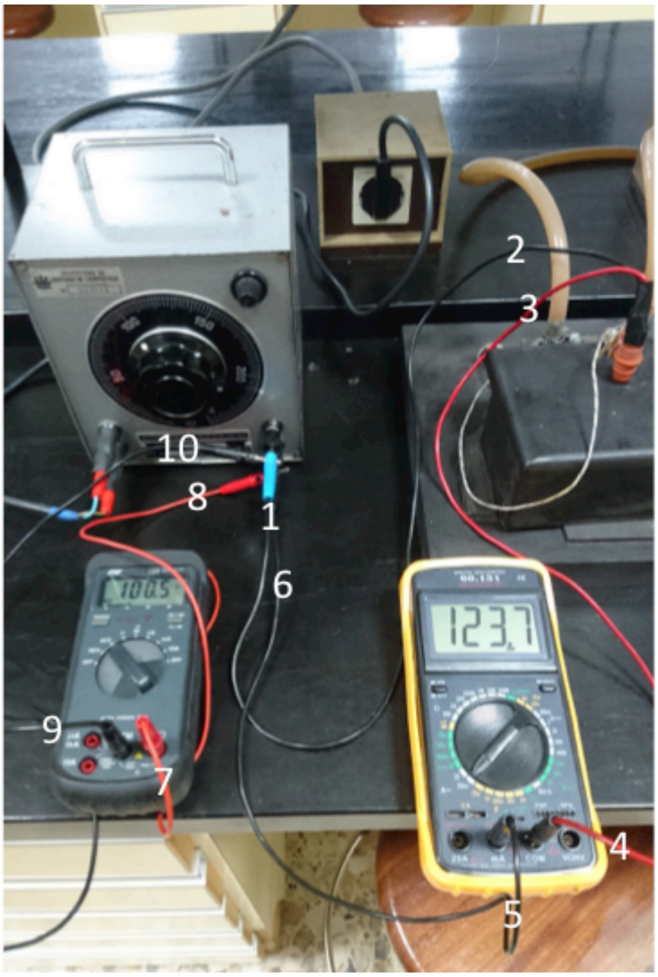
El objetivo de nuestra práctica es el cálculo del coeficiente de Seebeck de nuestro dispositivo termoeléctrico. Para ello calcularemos $\Delta T = (T_2^{\infty} - T_1)$ y ε de la forma explicada anteriormente y utilizaremos la Ec.1.

Como dijimos, T_2^{∞} lo obtendremos mediante el ajuste dado en la Ec. 4 a los datos $T_2(t)$, mientras T_1 será la temperatura del agua del grifo obtenida en laboratorio; ε lo obtendremos de las dos formas explicadas en los puntos 3.2. y 3.3. de "Modus Operandi". Calcularemos el coeficiente de Seebeck para cada estado estacionario estudiado en laboratorio, con lo que podremos realizar un tratamiento estadístico de los resultados.

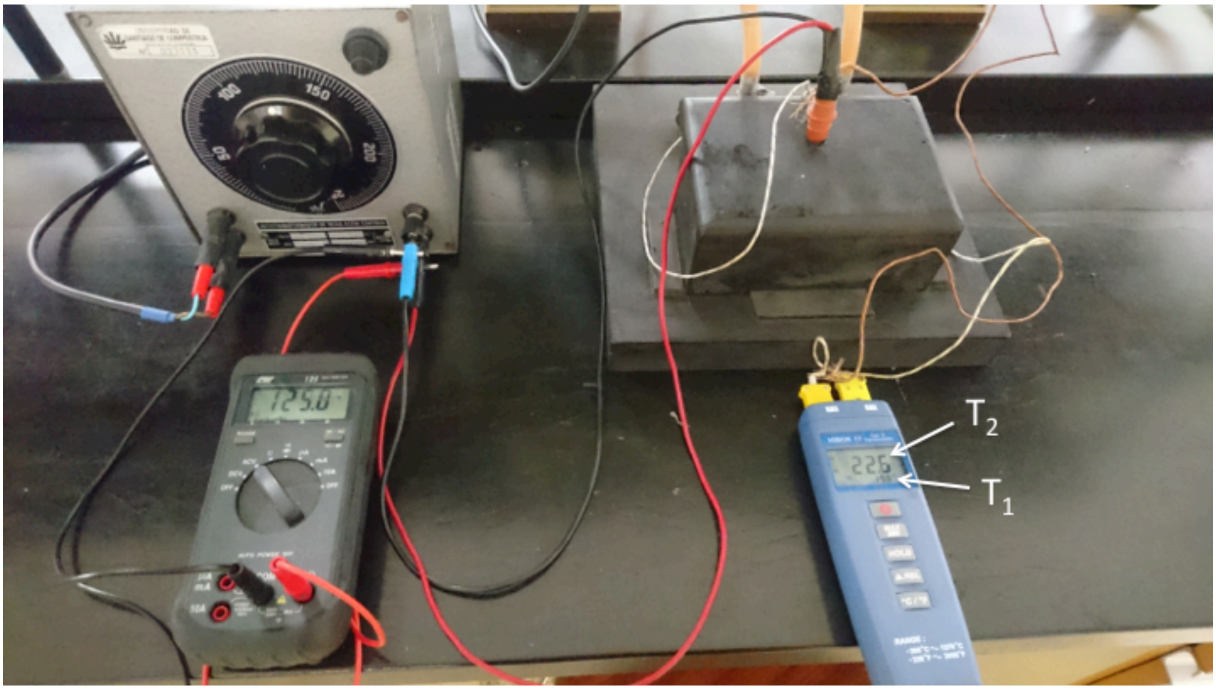
La constante de Seebeck de cada uno de los termopares del dispositivo tiene una valor tabulado $S_{AB} = 4{,}13\ 10^{-4}$ V/K. Sabiendo que los 142 termopares se encuentran conectados en serie, y **suponiendo que cada uno de ellos funcione correctamente**, es esperable que el coeficiente Seebeck de nuestro dispositivo termoeléctrico tenga una valor $\sim 142 \times S_{AB}$=0,059 V/K. Este valor lo podremos tomar como valor de referencia y compararlo con el valor que obtengamos aplicando la Ec.1.

Además del coeficiente de Seebeck, calcularemos r_i (punto 3.3. en "Modus operandi"), y otras magnitudes propias del dispositivo termoeléctrico como son su capacidad calorífica C y su conductividad térmica utilizando las Ecs. 3 y 4. Los valores de r_i y λ_T los necesitaremos para la realización de la práctica relativa al efecto Peltier (TP).

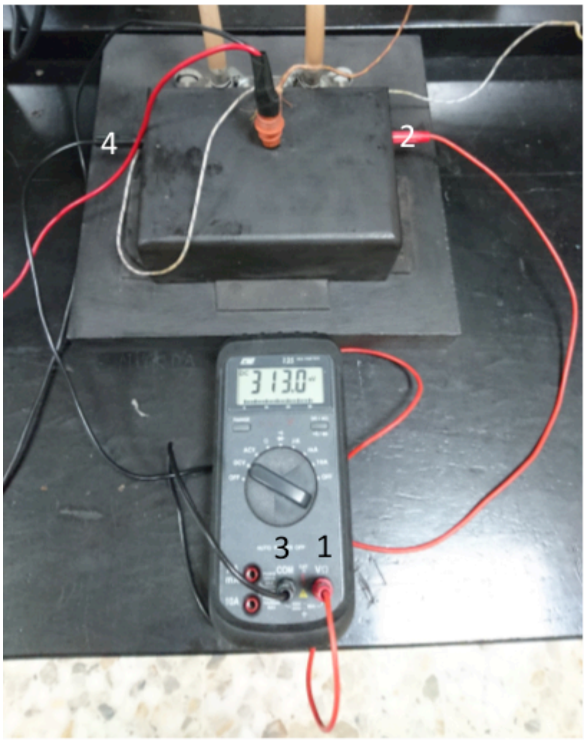
5. Anexo



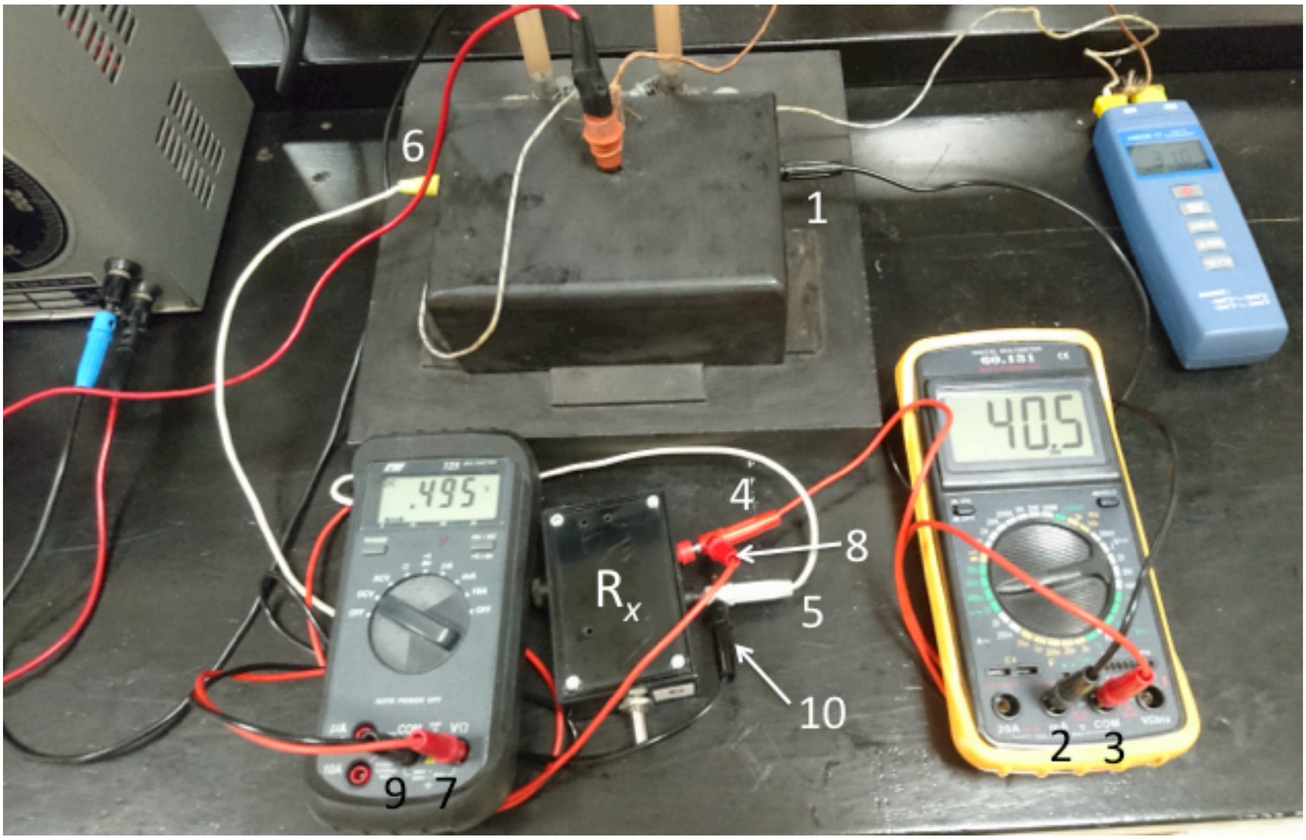
Fotografía 1: En el circuito formado por el generador de corriente alterna y la resistencia calefactora, intercalamos el amperímetro en serie y el voltímetro en paralelo. La corriente sale de uno de los bornes del generador y llega a la resistencia calefactora (1→2); pasa a través de la resistencia y llega al amperímetro (3→4); pasa por el amperímetro y llega de nuevo al generador de corriente, al borne restante (5→6). El voltímetro mide la caída de potencial en los bornes del generador "tocando" el circuito en paralelo (cables 7→8 y 9→10). Con los pares de datos (V,I) realizamos un ajuste lineal del cual obtendremos el valor de R_c según la ley de Ohm, $V = IR_c$. En los multímetros, nos acordamos de poner las **unidades de voltaje e intensidad correspondientes a corriente alterna** ($\sim$) y no a las de continua ($\overline{--}$). Trabajaremos en el rango de los mA.



Fotografía 2: Fijamos el voltaje en el generador de corriente a 125 V y esperamos a que el dispositivo termoeléctrico alcance el estado estacionario. Vamos anotando las temperaturas T_1 y T_2 de las uniones "fría" y "caliente" del dispositivo que nos indica el termómetro digital.



Fotografía 3: Una vez que el dispositivo termoeléctrico haya alcanzado el estado estacionario, medimos la fuerza electromotriz ε en "abierto". Para ello conectamos directamente el voltímetro a los bornes del dispositivo (cables 1→2 y 3→4). En el voltímetro seleccionamos las **unidades correspondientes a corriente continua** (⎓).



Fotografía 4: Cerramos el módulo termoeléctrico con la resistencia variable R_x. Por el circuito módulo termoeléctrico-resistencia variable circula una corriente I, e intercalamos en el circuito el amperímetro en serie y el voltímetro en paralelo. La corriente sale de uno de los bornes del módulo termoeléctrico y llega al amperímetro (cable 1→2); pasa a través del amperímetro y llega a la resistencia variable (3→4); pasa a través de la resistencia variable R_x y llega de nuevo al dispositivo termoeléctrico, al borne restante (5→6). El voltímetro mide en paralelo la caída de potencial en la resistencia variable, ΔV_{R_x}, utilizando los cables 7→8 y 9→10.

Girando la rueda de la resistencia variable modificamos la intensidad I que circula por el circuito. Únicamente utilizamos las dos primeras vueltas de la rueda en sentido horario, de un total de 10. Obtenemos diferentes pares (ΔV_{R_x},I) y realizamos el ajuste de la Ec. 5 a los datos para obtener ε y r_i, la fuerza electromotriz y resistencia interna del modulo termoeléctrico, respectivamente. En los multímetros, nos acordamos de poner las **unidades de voltaje e intensidad correspondientes a corriente continua** ($\overline{}\,\overline{}$). Trabajaremos en el rango de los mA.