

Objetivos

Estudiar la relación entre el trabajo eléctrico y el calor. Determinar la relación entre el Joule y la caloría. Estudiar experimentalmente un calorímetro de mezclas [1].

Introducción

El principio de conservación de la energía dice que si una dada cantidad de energía de algún tipo se transforma completamente en calor, la variación de la energía térmica resultante debe ser equivalente a la cantidad de energía entregada. En el presente experimento, se busca demostrar la equivalencia entre la energía entregada a un sistema y el calor en que se convierte. Si la energía se mide en Joules y el calor en calorías, se propone también encontrar la equivalencia entre estas unidades. A la relación cuantitativa entre Joules y calorías se la llamará *equivalente eléctrico* (o *mecánico*) del calor, y se la notará J_e [2]. Se recuerda que el Joule es la unidad de energía del Sistema Internacional de unidades: $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$; y una caloría es la cantidad de calor que hay que suministrar a un gramo de agua para elevarle la temperatura 1°C (desde 14.5°C hasta 15.5°C).

Experimental

A) Determinación del equivalente en agua del calorímetro

Un dispositivo muy útil para los experimentos de termodinámica es el calorímetro de mezclas que consiste en un recipiente con una buena aislación térmica y que contiene un líquido (por lo regular agua), un termómetro o sensor de temperatura y otros elementos, como un agitador y un calefactor (resistencia eléctrica). No hay que olvidar que el calorímetro participa como parte integrante en los procesos de transferencia de calor que se realicen en él y por tal motivo es importante caracterizar su comportamiento térmico. Aquí se da un método para obtener el parámetro del calorímetro denominado *equivalente en agua del calorímetro*, M_{eq} .

Si por algún método se suministra una cantidad de calor Q al sistema, la temperatura del calorímetro aumentará una cantidad ΔT . La relación entre estas cantidades será

$$Q = (c_{agua} \cdot m_{agua} + c_{termom} \cdot m_{termom} + c_{xx} \cdot m_{xx}) \cdot \Delta T \quad (1a)$$

$$Q = c_{agua} \cdot \left(m_{agua} + \left\{ \frac{c_{termom} \cdot m_{termom} + c_{xx} \cdot m_{xx}}{c_{agua}} \right\} \right) \cdot \Delta T \quad (1b)$$

$$Q = c_{agua} \cdot (m_{agua} + \{M_{eq}\}) \cdot \Delta T \quad (1c)$$

donde c_{agua} es el calor específico del agua (1 cal / g °C), c_{termo} representa el calor específico del termómetro y c_{xx} el calor específico del recipiente, agitador y demás elementos dentro del calorímetro, estos dos últimos desconocidos en general. Las masas correspondientes son m_{agua} , m_{termo} y m_{xx} . Para un dado calorímetro, el término entre llaves de (1b) es una constante con dimensión de masa, y puede agruparse en una sola constante M_{eq} que se designa como el equivalente en agua del calorímetro. M_{eq} tiene un significado físico simple: representa una masa de agua cuya capacidad calorífica es igual a la del conjunto constituido por el termómetro, recipiente, agitador y todos los demás componentes del calorímetro.

Existen varios métodos para determinar el valor de M_{eq} . Un modo simple de obtenerlo consiste en mezclar dos volúmenes de agua a distintas temperaturas: una masa de agua m_1 a T_1 (agua fría, una decena de grados debajo de la temperatura ambiente, T_{amb}), que se supone está en el calorímetro junto a los demás componentes, y otra masa de agua m_2 a T_2 (agua caliente, una decena de grados arriba de T_{amb}). Una vez medidas las temperaturas T_1 y T_2 , los dos volúmenes de agua se mezclan en el calorímetro, el cual se equilibrará térmicamente a una temperatura T_f . Por conservación de la energía tenemos

$$Q = c_{agua} \cdot (m_1 + M_{eq}) \cdot (T_f - T_1) = c_{agua} \cdot (m_2) \cdot (T_2 - T_f) \quad (2)$$

de donde

$$M_{eq} = m_2 \cdot \frac{(T_2 - T_f)}{(T_f - T_1)} - m_1 \quad (3)$$

Dado que el calorímetro no está totalmente aislado del medio, siempre hay intercambio de calor entre el calorímetro y el medio, lo cual altera la igualdad (2). Para minimizar los errores sistemáticos introducidos por este intercambio térmico con el medio es aconsejable partir de una decena de grados debajo de la T_{amb} y procurar que la T_f esté una cantidad similar de grados por arriba de T_{amb} , esto es:

$$T_2 - T_f \approx T_f - T_1 \quad (4)$$

De este modo, parte del calor que el medio entrega al sistema antes de la mezcla es devuelto por el sistema al medio después de la mezcla.

- 1) Usando el procedimiento descrito, determinar el equivalente en agua del calorímetro y su incertidumbre ($M_{eq} \pm \Delta M_{eq}$).
- 2) Si se cumple (4) en el experimento, ¿cómo deben ser m_2 y m_1 ? Medir las masas con una balanza que aprecie las décimas de gramo.

B) Equivalente eléctrico del calor

El principio de este experimento consiste en suministrar energía eléctrica a un calefactor (resistencia eléctrica) sumergido en el agua dentro de un calorímetro y medir el calor transferido.

Cuando por el calefactor circula una corriente eléctrica I y se desarrolla en él una diferencia de potencial V , la potencia P que disipa el calefactor por efecto Joule está dada por

$$P = IV \quad (5)$$

Si I se mide en Ampere y V en Volt, la potencia queda expresada en Watt.

La energía suministrada al calefactor en un tiempo Δt_{exp} será

$$W_{\text{eléctrico}} = \int_{t=t_i}^{t_{\text{exp}}} i(t) \cdot V(t) \cdot dt \approx i \cdot V \cdot \Delta t_{\text{exp}} = P \cdot \Delta t_{\text{exp}} \quad (6)$$

donde se hizo la suposición que I y V son aproximadamente constantes.

Si se expresa la energía eléctrica $W_{\text{eléctrico}}$ en Joules, es posible deducir cuál es la cantidad de Joules requeridos para generar una caloría. La cantidad de calorías entregada al agua se calcula a través de la medición de la variación de temperatura ΔT de la misma, conociendo la masa de agua m_{agua} , y el equivalente en agua del calorímetro M_{eq}

$$Q = c_{\text{agua}} \cdot (m_{\text{agua}} + M_{\text{eq}}) \cdot \Delta T \quad (7)$$

Si se supone que toda la energía eléctrica entregada se convierte en calor, se puede escribir la igualdad

$$W_{\text{eléctrico}} \text{ (J)} = J_e \cdot Q \text{ (cal)} \quad (8)$$

donde J_e tiene unidades de Joule/cal y representa la cantidad de Joules requeridos para producir una caloría.

- 1) Medir la temperatura ambiente T_{amb} . Llenar un calorímetro con agua fría hasta que el calentador eléctrico quede inmerso en el agua (por lo discutido previamente, es conveniente que el agua esté aproximadamente a unos $10\text{ }^\circ\text{C}$ por debajo de T_{amb}). Conectar la fuente de tensión a los terminales del calentador y el amperímetro y el voltímetro (Figura 1) de manera de poder medir I y V en el calentador simultáneamente.

NOTA: Si no se dispone de alguno de estos dos instrumentos de medición (amperímetro o voltímetro), medir I o V y obtener P mediante la ecuación (5) usando la ley de Ohm.

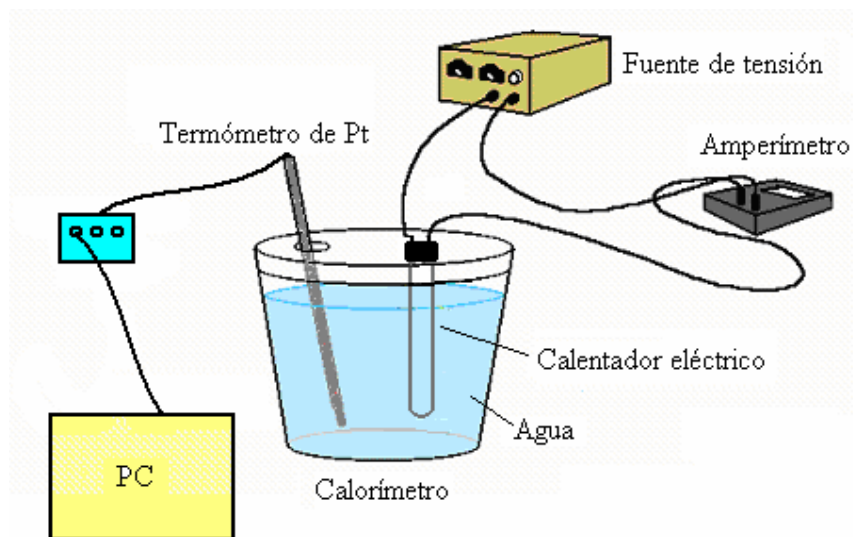


Figura 1. Dispositivo empleado para estudiar el equivalente eléctrico del calor.

- 2) Colocar un termómetro de Pt (previamente calibrado) en el calorímetro para medir la temperatura del agua. Revolver el agua con el termómetro o con un agitador hasta que la temperatura se equilibre (en T_i) por debajo de T_{amb} .
- 3) Encender la fuente de tensión mientras se toma el tiempo t_i . Tomar nota de I y/o V y controlar que no varíen demasiado (de lo contrario tomar un valor promedio). Cuando la temperatura sea tal que $T - T_{amb} \approx T_{amb} - T_i$ apagar la

fuente y anotar el tiempo t_f . Continuar mezclando y leer el termómetro hasta que la temperatura alcance un valor máximo, T_f .

- 4) De acuerdo a la igualdad mostrada en la ecuación (8) y a las expresiones (6) y (7), se espera que ΔT y Δt_{exp} tengan una relación lineal. Entonces, la idea sería tomar varios valores de t_i , t_f y sus respectivos valores de T_i y T_f . ¿Por qué? Para ello, medir nuevamente T_i que será similar a T_f anterior. Prender la fuente y medir t_i . Tomar nota de I y/o V , apagar la fuente y anotar el tiempo t_f . Continuar mezclando y leer el termómetro hasta que la temperatura alcance un valor máximo, T_f . Realizar este procedimiento varias veces (¿cuántas?). Graficar ΔT en función del Δt_{exp} y analizar la dependencia observada.
- 5) Representar gráficamente $W_{el\acute{e}ctrico}$ (expresado en J) en función de Q (expresado en cal) calculándolos mediante los valores obtenidos de m_{agua} , c_{agua} y M_{eq} (ecuaciones (6) y (7), respectivamente). Obtener el equivalente eléctrico del calor J_e a partir de dicho gráfico y teniendo en cuenta la ecuación (8).
- 6) Comparar el valor experimental de J_e con el valor aceptado [2]: $J_e = 4,186$ J/cal. Si hubiera una discrepancia significativa entre el valor experimental y el aceptado, analizar las posibles causas de tal discrepancia (revisar los supuestos que pudieran estar insatisfechos en el experimento, posibles errores sistemáticos, errores de procedimiento, etc.).

Referencias

- [1] S. Gil y E. Rodríguez, *Física re-Creativa: Experimentos de Física usando nuevas tecnologías*, Prentice Hall, Buenos Aires (2001) (www.fisicarecreativa.com) y referencias citadas.
- [2] T. B. Greenslade, Jr., *Phys. Teach.* **40** (4), 243 (2000). Este artículo contiene descripciones de los experimentos diseñados en el siglo XIX para medir el equivalente eléctrico del calor y muestra los valores obtenidos hasta llegar al actual valor definido como 4,186 J/cal.

Anexo

El calorímetro que se va a utilizar no es ideal. Por lo tanto:

- 1) no es perfectamente adiabático sino que entrega o recibe una cierta cantidad de calor del medio ambiente y por lo tanto la temperatura en su interior no permanece constante, es decir hay pérdidas;
- 2) los materiales de los que está hecho el calorímetro intercambian calor al contenido del mismo (equivalente agua).

Para determinar el equivalente agua del calorímetro (y de los elementos que contiene: termómetro, resistencia, agitador) y el equivalente eléctrico (J) se utilizará el siguiente método:

- Se medirá el cambio de temperatura en función del tiempo (T vs t) para al menos cinco (5) masas de agua diferentes. Luego, por las ecuaciones (7) y (8) se tiene que:

$$i V t = J c_{\text{agua}} (m_{\text{agua}} + M_{\text{eq}}) \Delta T \quad (A1)$$

$$T = \frac{i V}{J c_{\text{agua}} (m_{\text{agua}} + M_{\text{eq}})} t \quad (A2)$$

$$\text{pend} = \frac{i V}{J c_{\text{agua}} (m_{\text{agua}} + M_{\text{eq}})} \quad (A3)$$

- Se calcularán las pendientes de dichos gráficos y con estos datos se graficará:

$$m_{H_2O} \text{ vs } 1/\text{pend}$$

de la ecuación (3)

$$m_{H_2O} = \frac{i V}{J c_{\text{agua}}} \frac{1}{\text{pend}} - M_{\text{eq}} \quad (A4)$$

Por lo tanto, J y M_{eq} se obtendrán de la pendiente y la ordenada al origen de dicho gráfico.

Estimar las pérdidas del calorímetro.