Termodinámica III: equivalente mecánico del calor
Versión 2.0

Héctor Cruz Ramírez[1]
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
[1]hector.cruz@ciencias.unam.mx

febrero 2017

1. Resumen

El objetivo de la práctica es medir el equivalente mecánico del calor, lo cual consiste en determinar cuanto equivale una caloría en Joule. Para obtenerlo se calcula el calor absorbido por una masa de agua cuando se eleva su temperatura mediante la transferencia de energía suministrada por una resistencia eléctrica por la cual circula una corriente i. Dado que el agua se encuentra en un calorímetro, se ha de determinar en primer lugar la masa equivalente de agua m_c de este último [1].

2. Teoría

El equivalente mecánico del calor en el Sistema Internacional de unidades, es [2]

$$1\text{J} = 4{,}184\text{cal}, \tag{1}$$

donde caloría es cantidad de energía térmica que se necesita para elevar la temperatura de un gramo de agua un grado Celsius.

Joule demostró que existen diversas formas de energía que al suministrarlas a un sistema pueden elevar la temperatura de un gramo de agua un grado Celsius. De esta forma pudo calcular el trabajo necesario (en Joule, J) para realizar este proceso. En esta práctica mediremos el trabajo eléctrico necesario para calentar un gramo de agua y elevar su temperatura un grado Celsius.

Este experimento se utilizara un calorímetro, que es un recipiente de paredes aislantes, con una resistencia en su interior de modo que al pasar corriente eléctrica por la resistencia se *calentará* el líquido (agua) que contiene el calorímetro. Un calorímetro perfecto no cede ni absorbe calor. Sin embargo, no existen calorímetros perfectos por lo que a la hora de trabajar con un calorímetro se tiene que conocer el llamado equivalente en agua del calorímetro, m_c, que se define como la masa de agua capaz de absorber la misma cantidad de calor que el calorímetro para una misma elevación de temperatura.

Para obtener el valor de m_c vamos a usar el método de las mezclas, en el cual, a una masa *caliente* de agua m_1 se le añade una masa de agua *fría* m_2. Teniendo en cuenta que el calorímetro y la masa *caliente* (que en un principio están a temperatura T_1) ceden calor a la masa *fría* (que está a temperatura T_2) hasta alcanzar una temperatura de equilibrio T_e, el balance de energía toma la siguiente forma [2]

$$c_0(m_1 + m_c)(T_1 - T_e) = c_0 m_2 (T_e - T_2) \tag{2}$$

donde c_0 es el calor específico del agua, $c_0 = 1$ cal/(g K). Por tanto, despejando

$$m_c = \frac{m_2(T_e - T_2)}{(T_1 - T_e)} - m_1 \tag{3}$$

Una vez calculado el equivalente en agua del calorímetro se procede a determinar el equivalente mecánico del calor.

El principio en el que se basa esta parte del experimento consiste en suministrar energía eléctrica a una resistencia eléctrica rodeada de agua dentro de un calorímetro, y medir el calor desarrollado en éste. Como la potencia eléctrica, P , suministrada a un sistema viene dada por $P = iV$, (donde i es la corriente eléctrica, y V la diferencia de potencial del generador, que se suponen constantes), la energía E aportada a la resistencia en un tiempo t será igual a la potencia multiplicada por el tiempo, de modo que:

$$E = Pt = Vit \tag{4}$$

Cuando la resistencia se sumerge en el calorímetro, que contiene una masa de agua $m = m_1 + m_2$, la energía eléctrica E que se necesita para elevar la temperatura del sistema (agua y calorímetro) desde una temperatura inicial T_0 a una temperatura final T_f.

Por tanto, el calor absorbido por el agua y el calorímetro desde una temperatura T_0 a una T_f es [2]:

$$Q = c_0(m + m_c)(T_f - T_0) \tag{5}$$

De este modo, la relación entre trabajo y calor, o lo que es lo mismo, el equivalente mecánico del calor queda:

$$J = \frac{E}{Q} = \frac{Vit}{c_0(m + m_c)(T_f - T_0)} \tag{6}$$

3. Experimento

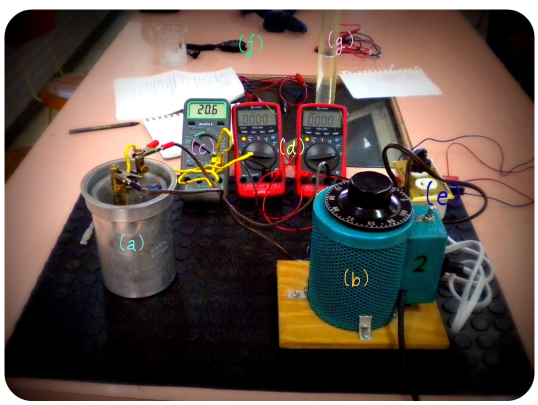

Figura 1: Arreglo experimental [3]. (a) Calorímetro con una resistencia eléctrica. (b) Viriac (transformador variable). (c) Multimetro para medir temperatura con un termopar. (d) Multimetros para medir voltaje y corriente eléctrica. (e) Caja de conexiones hecha en el laboratorio. (f) Cronómetro. (g) Probeta.

La imagen del arreglo experimental se muestra en la Figura (1). Primero se mide el equivalente en agua del calorímetro (m_c). Se implementa un volumen de agua $V_1 = 250$ cm^3 (medir ese volumen con una probeta graduada). Medir la temperatura T_{01} de dicho volumen de agua. Calcular la masa m_1

correspondiente a este volumen de agua utilizando la expresión obtenida de una regresión polimonial,

$$\begin{aligned}\rho(T) = 0{,}99981 &+ (7{,}8526 \times 10^{-5})T - \\ &(9{,}3371 \times 10^{-6})T^2 + (6{,}4141 \times 10^{-8})T^3 + \\ &(1{,}5151 \times 10^{-10})T^4,\end{aligned} \tag{7}$$

donde ρ es la densidad en g/cm^2 y T en °C. Luego se vierte en el calorímetro el volumen de agua V_1. Se procede a calentar esta masa m_1 utilizando la resistencia eléctrica hasta una temperatura T_1 (unos 10°C por encima de la temperatura ambiente). Debe cuidarse que el termómetro no esté en contacto con la resistencia eléctrica y, al desconectar el circuito, es conveniente agitar el calorímetro para homogeneizar la temperatura más rápidamente. En otro volumen $V_2 = 200$ cm^3 de agua y medir su temperatura T_{02}. Añadir a esta masa una pequeña cantidad de hielo hasta alcanzar una temperatura T_2 (5°C por debajo de la temperatura T_{02}). Calcular la masa m_2 utilizando la ecuación 7. Entonces, se añade esta masa m_2 de agua fría al calorímetro (cuídese que no caiga hielo). Medir la temperatura T_e de la mezcla cuando se alcanza el equilibrio. Finalmente se aplica la ecuación del balance de energía para obtener el valor de m_c, Ecuación (2)

El segundo paso es medir el equivalente mecánico del calor (J). Tomar el valor de la temperatura de un volumen de agua V que se encuentra en el calorímetro (T_0). Calcular con la Ecuación (7) la masa de agua m que se encuentra en el calorímetro. Cerrar el circuito y con un cronómetro medir el tiempo (t) que tarda el volumen V de agua en calentarse 10 grados por encima de T_0. Medir el valor de la corriente eléctrica (i) y del voltaje (V) con dos multímetros. Finalmente se calcula el valor del equivalente mecánico del calor (J) a partir de la Ecuación (6).

4. Pormenores de la práctica

Cantidad de sesiones en el laboratorio: 2 sesiones.

5. Agradecimientos

Estas notas fueron realizadas con el apoyo de los proyectos PAPIME PE106415 (version 1) y PAPIME PE105917 (version 2). Agradecemos al

estudiante Jorge Arturo Monroy Ruz por su contribución a la elaboración de estas notas.

6. Apéndice

Supongamos que tenemos un sistema termodinámico σ que inicialmente esta aislado. En esas condiciones σ tiene una temperatura T_i y masa m. Después permitimos el intercambio de energía con sus alrededores (que llamaremos τ). Si queremos elevar su temperatura a T_f (con $T_f > T_i$), la energía que debe transferir sus alrededores es

$$\Delta W_{\tau\to\sigma} = c_0\, m\, (T_f - T_i), \tag{8}$$

donde c_0 es la capacidad calorífica del sistema σ.

Supongamos ahora, que tenemos dos sistemas termodinámicos, los sistemas σ_1 y σ_2. Inicialmente están aislados por separado. El sistema σ_1 en estas condiciones tiene una temperatura $T_{\sigma_1 i}$ y masa m_{σ_1}; y de igual forma para el sistema σ_2 tenemos una temperatura inicial $T_{\sigma_2 i}$ y masa m_{σ_2}. Supongamos si perdida de generalidad

$$T_{\sigma_2 i} > T_{\sigma_1 i}, \quad \text{y} \tag{9}$$

$$m_{\sigma_1} > m_{\sigma_2}. \tag{10}$$

A continuación ponemos en contacto térmico a los dos sistemas. Después de un tiempo alcanzan el equilibrio térmico, lo cual significa que ambos sistemas alcanzan una misma temperatura, T_e; además, se debe cumplir

$$T_{\sigma_1 i} < T_e < T_{\sigma_2 i}. \tag{11}$$

Desde el punto de vista del sistema σ_1 hubo un aumento de la temperatura, por lo cual recibió del sistema σ_2 energía. La cantidad de energía transferida es igual

$$\Delta W_{\sigma_2\to\sigma_1} = c_1\, m_{\sigma_1}\, (T_e - T_{\sigma_1 i}). \tag{12}$$

Desde el punto de vista del sistema σ_2 hubo una disminución de la temperatura, por lo cual el sistema σ_2 tuvo que transferir energía al primer sistema. La cantidad de energía transferida es igual

$$\Delta W_{\sigma_1 \to \sigma_2} = c_2\, m_{\sigma_1}\,(T_{\sigma_2 i} - T_e) = -\Delta W_{\sigma_2 \to \sigma_1}. \tag{13}$$

Por lo cual, por conservación de la energía, la energía que σ_1 se recibió debe ser igual a la energía que σ_2 perdió; entonces

$$c_1\, m_{\sigma_1}\,(T_e - T_{\sigma_1 i}) = c_2\, m_{\sigma_1}\,(T_{\sigma_2 i} - T_e). \tag{14}$$

De donde

$$T_e = \frac{c_1\, m_{\sigma_1} T_{\sigma_1 i} + c_2\, m_{\sigma_2} T_{\sigma_2 i}}{c_1\, m_{\sigma_1} + c_2\, m_{\sigma_2}} \tag{15}$$

Considerando que en nuestro caso, $c_1 = c_2 = c_0$, tenemos

$$T_e = \frac{m_{\sigma_1} T_{\sigma_1 i} + m_{\sigma_2} T_{\sigma_2 i}}{m_{\sigma_1} + m_{\sigma_2}}. \tag{16}$$

La ecuación anterior nos muestra que la temperatura de equilibrio es un promedio ponderado de la temperaturas iniciales de los dos sistemas. El sistema 1 tiene mayor *peso estadístico* que el sistema 2 ya que tenemos que $m_{\sigma_1} > m_{\sigma_2}$.

Referencias

[1] La práctica esta basada en los reportes del Departamento de física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología), Facultad de Ciencias Físicas, Ciudad Universitaria s/n Universidad Complutense de Madrid.

[2] L. García-Colín, "Introducción a la termodinámica clásica," Trillas, 1995.

[3] Imagen tomada del reporte final de Sonia, Axel y Arturo en el semestre 2003-I.