

Equivalente mecánico del calor y equivalente eléctrico del calor

L. Ardila,^{1, a)} J. Florez,^{1, b)} and J. Mendez^{c)}

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

En este trabajo se presenta la comprobación experimental del equivalente mecánico y eléctrico del calor a partir de dos experimentos determinando las relaciones entre temperatura y trabajo para el primer experimento y entre la temperatura y la potencia para el segundo experimento. Como resultado se obtuvo que la mejor medición, del equivalente mecánico discrepa porcentualmente en 1,6% y la del equivalente eléctrico en 3% respecto del valor teórico ($\text{cal} = 4.186 \text{ J}$).

Palabras clave: potencia eléctrica, trabajo mecánicos, calor, calor específico, primera ley de la termodinámica

I. INTRODUCCIÓN

A. Equivalente mecánico del calor

A comienzos del siglo 18, se creía que el calor era una propiedad intrínseca de la materia, que se representaba usualmente como un fluido que podía ser intercambiado por cuerpos que se encontraran en contacto, y su flujo se daba de los cuerpos con mayor temperatura hacia los cuerpos con menor temperatura. Tal interpretación fue bastante criticada, y finalmente cedió ante la equivalencia calor-energía a mediados del siglo 19.

El principio de equivalencia calor-energía está incluido dentro de la primera ley de la termodinámica:

$$dU = \delta W + \delta Q \quad (\text{A.1})$$

En la anterior ecuación U representa la energía interna del sistema (no se tiene en cuenta la energía debido a un potencial externo o al movimiento del centro de masa), W representa el trabajo realizado, y Q el calor intercambiado en el proceso. Note que U es un diferencial exacto, pues la energía interna de un sistema es función de las variables de estado. Además, el trabajo y el calor están relacionados con el cambio de la energía interna, pero no son función de las variables de estado; esto significa que representan flujos de energía.

El calor y la energía se median en diferentes unidades, calorías y Joules respectivamente, debido a la forma en que se desarrollo la termodinámica. La caloría fue definida como la energía necesaria para elevar en 1°K la temperatura de 1 gr de agua cuya temperatura inicial es 15°C . Con los experimentos realizados por James Joule a mediados del siglo 19 se pudo establecer una relación cuantitativa entre un Joule y una caloría, $\text{cal} = 4,186\text{J}$;

este valor es el aceptado actualmente, y solamente presenta un error del 0,6% respecto del valor medido por Joule.

El calor es una forma de intercambio de energía, y la energía es una propiedad extensiva, asimismo está relacionado con el cambio de temperatura de un objeto, la cual es una propiedad intensiva, por lo tanto, es valido establecer la siguiente relación entre calor y temperatura:

$$\delta Q = C(T)\delta T \quad (\text{A.2})$$

El coeficiente de proporcionalidad $C(T)$ se conoce como capacidad calorífica, y es una propiedad extensiva. Si se utilizan medios homogéneos se puede reescribir de la siguiente manera $C(T) = c_{\text{esp}}(T)m$ con m la masa del sistema. En general el calor específico de un material (c_{esp}) depende de la temperatura, pero para mediciones en pequeños rangos de temperatura se puede suponer constante ($\Delta T < 50^\circ\text{K}$). Luego, para efectos prácticos se tiene la siguiente relación:

$$Q = c_{\text{esp}}m(\Delta T) \quad (\text{A.3})$$

Por lo tanto, el cambio en la energía interna de un sistema termodinámico en el caso extremo de un proceso irreversible ($\delta W = 0$) esta dado por la ecuación A.3. Tal cambio también puede se puede dar al realizar trabajo sobre el sistema mientras se encuentra aislado ($\delta Q = 0$), de tal forma que se puede establecer el coeficiente de proporcionalidad entre las unidades del trabajo (Joule) y las unidades de calor (caloría). En el experimento realizado se efectúa trabajo sobre un cilindro de metal, y se mide el cambio de temperatura que produce este trabajo, se utiliza la ecuación A.3 para encontrar el calor que generaría un cambio equivalente de temperatura y los valores encontrados se comparan para encontrar el coeficiente de proporcionalidad entre las unidades involucradas en el experimento.

La figura II A es un esquema del montaje experimental usado. La fricción entre la cuerda y el cilindro de metal es suficiente para mantener el balde de masa M a 5cm

^{a)}lfardilap@unal.edu.co.

^{b)}jsflorezj@unal.edu.co.

^{c)}jocmendezca@unal.edu.co

del suelo. Al girar el cilindro de metal N veces se realiza un trabajo equivalente a:

$$W = MgR(2\pi N) \quad (\text{A.4})$$

Tal trabajo es realizado por la fricción, luego, genera un aumento de la energía interna del sistema (aumento de la temperatura). El sistema considerado incluye el cilindro de metal y la cuerda que sostiene el balde, y se debe tener en cuenta la pérdida de energía debido a intercambio de calor con el ambiente. Luego, se tiene la siguiente relación para el calor:

$$Q = C_{total}\Delta T + Q_{perdido}, \quad C_{total} = C_{Aluminio} + C_{cuerda} \quad (\text{A.5})$$

Ya que la masa de la cuerda es despreciable respecto de la masa del cilindro de aluminio, y el aluminio es mejor conductor térmico que la tela de la cuerda, se supone que $C_{cuerda} \approx 0$. Además, las mediciones se realizan en intervalos de tiempo cortos para evitar la pérdida de calor por convección, luego $Q_{perdido} \approx 0$. Por lo tanto, se tiene que:

$$c_{Au}m_{Au}\Delta T = MgR(2\pi N) \quad (\text{A.6})$$

B. Equivalente eléctrico del calor

Los procesos eléctricos como ya sabemos dependen de la propiedad de carga que tienen los electrones. Estos procesos se explican bajo cierta aproximación mediante interacciones que se describen con potenciales, en particular el potencial de Coulomb. La intensidad de corriente es el desplazamiento de los electrones a través de un medio conductor producido por una diferencia de potencial; el movimiento es aleatorio y en ocasiones los electrones no pasan de un átomo del medio a otro, sino que terminan chocando con el núcleo. El choque con el núcleo es una interacción mediada por el potencial de Coulomb y por lo tanto se le puede asociar una energía, entonces la energía que llevaba el electrón antes de chocar iba asociada a una diferencia de potencial o a un campo y luego del choque le transmitió parte de esa energía al núcleo, ya que este adquiere un pequeño movimiento, esto quiere decir, que se transformó la energía eléctrica en energía mecánica del núcleo. Los múltiples choques hacen que los núcleos del medio conductor ahora tengan una energía asociada a vibraciones producidas por los choques. Este aumento de vibraciones a escala macroscópica se entiende como un aumento en la temperatura. Y es donde se dice que la energía eléctrica tiene un equivalente en calor, asociado a los cambios de temperatura.

El procedimiento descrito anteriormente se conoce como efecto Joule. El efecto Joule se entiende como la energía

disipada por una resistencia al paso de una corriente por ella. La energía disipada se convierte en calor y por lo tanto la resistencia se calcula. Cuando se tiene una corriente estacionaria a una diferencia de potencial constante la potencia se describe como:

$$P = IV$$

y por lo tanto la energía disipada es:

$$W_{ele} = \int_0^t I(t)V(t)dt \approx IVt = P_{ele}t \quad (\text{B.1})$$

La energía disipada es directamente proporcional a la corriente, el voltaje y el tiempo. Si usamos la ley de Ohm se encuentra que:

$$W_{ele} = IVt = I^2Rt = \frac{V^2}{R}t$$

Ahora esta energía es transformada en calor y este se puede determinar en el cambio de temperatura de la resistencia o con la energía transferida a un determinado medio en el que se encuentre, como puede ser el agua. Este calor se puede determinar usando:

$$Q = c_{agua}(m_{agua} + M_{equi})\Delta T \quad (\text{B.2})$$

en donde c_{agua} es el calor específico del agua, m_{agua} la cantidad de masa de agua, M_{equi} el equivalente en agua del recipiente donde el agua se encuentra (calorímetro, agitador) y T la temperatura.

La masa equivalente M_{equi} corresponde a las masas y respectivos calores específicos del recipiente, el agitador y demás cosas en el calorímetro, y está dada por:

$$M_{equi} = \frac{c_{recep}m_{recep} + c_{xx}m_{xx} + c_{agit}m_{agit}}{c_{agua}}$$

Usando dos cantidades de agua distintas m_1 y m_2 a temperaturas distintas T_1 y T_2 , y considerando el calorímetro junto a la masa m_1 y el hecho de que luego de un cierto tiempo el sistema alcanza un equilibrio a una temperatura final T_f , se tiene:

$$Q = c_{agua}(m_1 + M_{equi})(T_f - T_1) = c_{agua}m_2(T_2 - T_f)$$

Finalmente se puede determinar el valor de masa equivalente con la siguiente formula:

$$M_{equi} = m_2 \frac{(T_2 - T_f)}{(T_f - T_1)} - m_1 \quad (\text{B.3})$$

Otra forma de determinar el valor de la masa equivalente del calorímetro M_{equi} es usando las ecuaciones B.1 y B.2 y realizando una gráfica de ΔT vs t_a , luego calculando la pendiente se obtiene:

$$Pendiente(\Delta T vs t_a) = \frac{P_{ele}}{c_{agua}(m_{agua} + M_{equi})} \quad (\text{B.4})$$

de donde se puede despejar M_{equi} .

II. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

A. Equivalente mecánico del calor

Para este experimento se empleó:

- Termómetro (Termocupla)
- Mechanical Equivalent of Heat [PASCO]
- Grafito
- Masas colgantes

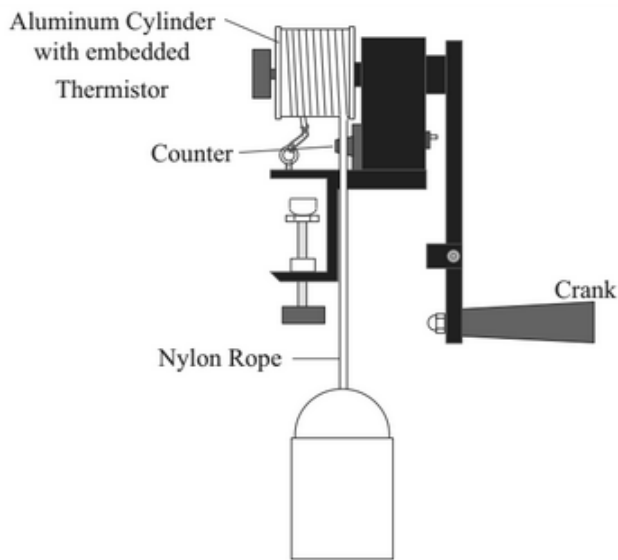


Figura 1. [1] Equipo PASCO del equivalente mecánico del calor.

El experimento consiste en calentar dos cilindros de aluminio mediante la fricción producida por un cordón, este se enrolla en el cilindro que está sujeto a una manivela, luego se coloca un poco de grafito entre el cordón y el cilindro para que se pueda dar vueltas al cilindro y éste se caliente por efecto de la fricción con el cordón. Al otro lado del cordón se suspende una masa y la idea es levantarla a una altura de cinco centímetros mediante la fricción, tal que al girar el cilindro se sostenga en esa posición. Antes de comenzar a girar la manivela se mide la temperatura del cilindro, luego de comenzar a girar se lleva el registro del número de vueltas que se dan a la manivela, posteriormente cuando se detiene el proceso se mide la temperatura final del cilindro.

B. Equivalente eléctrico del calor

Los implementos usados para esta practica fueron:

- Calorímetro (Con agitador)

- Estufa
- Beaker
- Termómetro (Termocupla)
- Fuente de voltaje
- Multímetros (Amperímetro y Voltímetro)
- Resistencia cerámica de $5K\Omega$ y 10W.

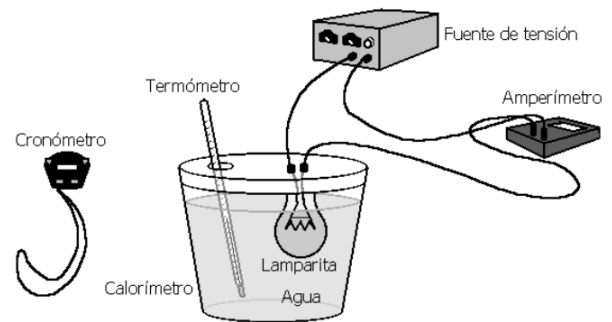


Figura 2. Montaje equivalente eléctrico.

En primer lugar para encontrar la masa equivalente en agua de los componentes (como el calorímetro, el agitador y la resistencia), estos se depositaron dentro del calorímetro y se introdujeron 136 gr de agua a una temperatura T_1 , 10° por debajo de la temperatura ambiente. Luego se calentaron 86 gr de agua usando estufa y beaker hasta alcanzar una temperatura T_2 , 10° por encima de la temperatura ambiente. Como la temperatura ambiente en ese momento era de 15° las temperaturas T_1 y T_2 corresponden a 5° y a 25° respectivamente.

Luego se mezclaron las dos cantidades de agua dentro del calorímetro y se esperó a que alcanzaran una temperatura de equilibrio T_f . Usando la ecuación B.3 se puede encontrar un valor para la masa equivalente en agua de los dispositivos en contacto con el agua.

Teniendo este valor, se puede emprender la tarea de encontrar el equivalente eléctrico del calor. En este caso se hace transitar una corriente de valor constante por la resistencia a una diferencia de potencial igualmente constante, y si los valores son altos, se calentará la resistencia y a la vez ésta calentará una cantidad de agua con la que se encuentra en contacto. Para evitar el error por la energía que gana el calorímetro a temperaturas menores y la energía que pierde a temperaturas mayores de la temperatura ambiente, se inicia a una temperatura que se encuentre en los mismos grados por debajo que los grados por encima que va a tener la temperatura final. Este procedimiento se repitió usando distintos valores para la corriente y la diferencia de potencial. Usando la ecuación B.4 también se puede determinar la masa equivalente en

agua del calorímetro y los otros implementos. Finalmente el equivalente eléctrico del calor se determina al calcular la potencia $W_{ele}[Joules]$ y el calor $C[cal]$.

III. RESULTADO Y ANÁLISIS

A. Equivalente mecánico del calor

Los cálculos para comprobar el equivalente mecánico se llevan a cabo a partir del análisis del cambio de la temperatura en los dos cilindros producido por el trabajo necesario para mantener suspendida una masa de $[3852.5 \pm 0.5]g$. Las masas de los cilindros son de $[202.2 \pm 0.5]g$ y $[202.1 \pm 0.5]g$ ambos tienen diámetro de $[7.6 \pm 0.1]cm$.

Con los datos obtenidos se calcula el trabajo a partir de la ecuación (A.4) y el calor generado con la ecuación (A.3). Las cantidades medidas y calculadas se presentan en las tablas I y II.

TABLA I. Datos de la temperatura inicial (T_i) y final (T_f), numero de vueltas N , Trabajo W y calor Q para el cilindro con masa de $[202.2 \pm 0.5]g$

$[T_i \pm 1]^\circ C$	$[T_f \pm 1]^\circ C$	$[N]$	$[W]J$	$[Q \pm 60]Cal$
23	25	50	280 ± 40	90
25	29	100	570 ± 80	180
29	32	100	570 ± 80	130
32	34	97	550 ± 70	90
28	33	200	1100 ± 100	220
20	24	105	590 ± 80	180
25	31	340	1900 ± 300	270

TABLA II. Datos de la temperatura inicial (T_i) y final (T_f), numero de vueltas N , Trabajo W y calor Q para el cilindro con masa de $[202.1 \pm 0.5]g$

$[T_i \pm 1]^\circ C$	$[T_f \pm 1]^\circ C$	$[N]$	$[W]J$	$[Q \pm 60]Cal$
20	26	303	1700 ± 200	260
26	29	143	800 ± 100	130
16	31	670	3800 ± 500	660
17	25	327	1800 ± 200	350

A partir de los datos calculados se determina en las Tablas III y IV la equivalencia entre calor y trabajo y además se determina la discrepancia porcentual con el valor ya comprobado ($1 \text{ caloria} = 4,2 \text{ Joules}$).

Se observa a partir de los datos en las tablas III y IV que los valores presentan una discrepancia porcentual muy elevada. Este error experimental se atribuye a lo intrincado y poco cuidadoso del proceso de medición. Una de las acciones que hacen que durante el experimento se aumente el error es el hecho de que manualmente se está proporcionando un trabajo, lo que hace que el suministro

TABLA III. Equivalente con los datos del cilindro con masa de $[202. \pm 0.5]g$

$[W/Q]J/Cal$	%Error
3 ± 2	23.8
3 ± 1	23.8
4 ± 2	1.6
6 ± 4	47.8
5 ± 1	21.9
3 ± 1	20.0
7 ± 2	72.7

TABLA IV. equivalente con los datos del cilindro con masa de $[202.1 \pm 0.5]g$

$[W/Q]J/Cal$	%Error
6 ± 1	53.8
6 ± 2	45.2
5.7 ± 0.9	36.1
5 ± 1	24.5

sea poco uniforme y con esto el calentamiento también. Otro de los aspectos relevantes es que este experimento se hace al aire libre, lo que provoca que a medida que este se calienta, parte del calor se transfiera al medio y por tanto el valor final del calor no es el auténtico. El último aspecto que se considera que induce error es que cuando el cilindro se enfría y se usa enseguida en un tiempo posterior sobre este se condensaba agua y esto mezclado con el grafito aumentaba la fuerza de fricción y con esto se interrumpía el procedimiento de medición, ya que en ciertas ocasiones las pesas no permanecían suspendidas sino que comenzaban a ascender.

B. Equivalente eléctrico del calor

Se calculó el equivalente en agua del calorímetro, para ello se vertieron $[138 \pm 1]g$ de agua en el calorímetro, dentro del cual se encontraban el agitador y el termómetro, y se espero hasta que el sistema calorímetro agua tuviera temperatura constante ($T_i = 4^\circ C$). Luego se vertieron $[86 \pm 1]g$ de agua a $T_{agua} = 27^\circ C$, y se esperó a que el sistema nuevamente tuviera una temperatura homogénea, la temperatura final fue $T_f = 17^\circ C$. Utilizando la ecuación B.3 se calculó la masa equivalente de agua del sistema calorímetro, termómetro, agitador: $M_{equ} = 23 \pm 2gr$.

Se realizaron 5 medidas con diferentes valores de potencia eléctrica y diferente cantidad de agua, buscando obtener un promedio para el valor de la razón $Joule/caloria$. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos, y el equivalente Joule-caloría obtenido para cada prueba:

TABLA V. Datos equivalente eléctrico del calor

Prueba	$\Delta T \pm 1^\circ\text{C}$	$M_{\text{agua}}(\text{gr})$	P (Watts)	[tiempo ± 5]
1	14	213 \pm 1	11.6 \pm 0,2	1161
2	10	148 \pm 1	14.5 \pm 0,2	443
3	13	176 \pm 1	9.8 \pm 0,1	932
4	6	125 \pm 1	8.9 \pm 0,1	595
5	14	160 \pm 1	11.7 \pm 0,2	928

Se calculó el trabajo realizado y el calor absorbido, se utilizaron estos datos para calcular el coeficiente Joule/caloría, y luego se promediaron estos datos para obtener el mejor calculo posible de este coeficiente. Para calcular el calor absorbido por el agua se utilizó el siguiente valor para el calor específico del agua $c_{\text{agua}} = [1 \pm 10_{-3}] \text{cal}/(\text{gr} \cdot K)$:

TABLA VI. Equivalencia Joule-caloría

[W ± 80]	[Q ± 30]	calorías	Joule/caloría
13553	3308		4.09 \pm 0.5
6355	1713		3.71 \pm 0.4
9120	2590		3.52 \pm 0.4
5349	889		6.01 \pm 0.4
10847	2566		4.22 \pm 0.5

Por lo tanto, se obtuvo $Joule/caloría = 4,31 \pm 0,5$. El valor calculado no corresponde con el teórico dentro del margen de error, y tiene un error porcentual de $Error = 3\%$. Se puede observar que la precisión en el cálculo del coeficiente Joule/caloría es mucho mayor si se utilizan instrumentos electrónicos, ya que el trabajo realizado es una variable controlada, lo cual no sucede en la practica realizada para encontrar el equivalente mecánico, pues la velocidad con la cual se realizaba el trabajo no era

constante, y se tenía un sistema en contacto con el aire, lo cual añade un error considerable si el experimento se realiza con cambios de temperatura grandes y la practica toma bastante tiempo es desarrollarse.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye a partir de las observaciones sobre el experimento y del análisis de los datos que el procedimiento empleado para determinar el equivalente mecánico no es el más idóneo ya que al final las discrepancias son bastante elevadas. En cuanto al experimento del equivalente eléctrico se obtuvo un valor de $4,31 \pm 0,5$ para la razón entre Joule y caloría, el cual tiene un error porcentual de 3% respecto del valor aceptado en la bibliografía. Para obtener valores más precisos se deben utilizar montajes con condiciones más controladas (montajes aislados, con sensores de temperatura bastante precisos, y un método para realizar trabajo de forma controlada sobre el sistema); se sugiere realizar un experimento donde se haga un seguimiento de la temperatura del cilindro durante todo el experimento, para poder lidiar con la pérdida de calor por convección y dar cuenta numéricamente de este factor.

REFERENCIAS

- ¹ *Pasco scientific, MECHANICAL EQUIVALENT OF HEAT, Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model TD-8551A, 1990 Pasco scientific*
- ² *Julio E Rodriguez L, Equivalente mecanico del calor, Guías de laboratorio, Universidad Nacional de Colombia*
- ³ *Julio E Rodriguez L, Equivalente electrico del calor, Guías de laboratorio, Universidad Nacional de Colombia*