



El equivalente mecánico del calor

Sandra Milena Forero Díaz^{1,2}

¹*Candidata al título de Doctor en Educación, Doctorado Interinstitucional en Educación, énfasis en Educación en Ciencias, Universidad Pedagógica Nacional, Calle 72 No. 11 – 86, Bogotá, Colombia.*

²*Departamento de Física, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad Pedagógica Nacional, Calle 72 No. 11-86, Bogotá, Colombia.*

E-mail: milenafor@gmail.com

(Recibido el 25 de Junio de 2013; aceptado el 12 de Diciembre de 2013)

Resumen

El problema central de este artículo tiene que ver con la conciliación entre las hipótesis de S. Carnot y la J. Joule. El pequeño tratado publicado por Carnot fue recibido con entusiasmo y admiración por la inmensa mayoría de hombres de ciencia, no solamente franceses, sino ingleses y alemanes. Había sin embargo un punto álgido en las demostraciones. Carnot suponía que el trabajo realizado por la máquina térmica se debía solamente a la caída de cierta cantidad de calor de una temperatura más alta a otra más baja y que esa cantidad de calor permanecía la misma en el proceso. Pero James Joule, cuya autoridad como experimentador nadie se atrevía a poner en duda, negaba vehementemente que la cantidad de calor se conservara en la caída. William Thomson (Lord Kelvin), un prestigioso físico inglés, con importantes contribuciones científicas, intervino en la discusión y terminó por reconocer que no sabía cómo se podían conciliar las dos opiniones, la de Carnot y la de Joule. Este artículo pretende mostrar de manera sucinta los trabajos de Joule, dejando abierta la discusión sobre la solución definitiva planteada por el célebre matemático alemán, Rudolf Clausius.

Palabras clave: Trabajo mecánico, rozamiento, calor, electricidad, formas de energía, equivalente mecánico, caloría, Joule.

Abstract

The central problem of this paper is concerned with the reconciliation hypotheses S. Carnot and J. Joule. The little treatise published by Carnot was received with enthusiasm and admiration for the vast majority of scientists, not only French, but English and German. There was however a very difficult point at demonstrations. Carnot assumed that the work done by the heat engine is due only to drop a certain amount of heat from a higher temperature to a lower one and that quantity of heat remained the same in the process. But James Joule, whose authority as experimenter nobody dared to question, vehemently denied that the amount of heat is retained in the fall. William Thomson (Lord Kelvin), a prestigious English physicist, with important scientific contributions, intervened and ended the discussion by acknowledging he did not know how they could reconcile the two views, the Carnot and Joule. This article aims to show succinctly Joule's work, leaving open the discussion about the final solution proposed by the famous German mathematician Rudolf Clausius.

Keywords: Mechanical work, friction, heat, electricity, forms of energy, mechanical equivalent, calorie, Joule.

PACS: 01.40.-d, 01.40.Fk, 01.70.+wI.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El problema central de este artículo tiene que ver con la conciliación entre las hipótesis de S. Carnot y la J. Joule. Carnot supone que el trabajo realizado en las máquinas térmicas se debe solamente a la caída del calor entre dos temperaturas, de una manera semejante a como el trabajo gravitacional se debe a la caída de un cuerpo entre dos puntos a alturas diferentes, sin que la masa del cuerpo sufra menoscabo. J. Joule, por el contrario, sostiene, respaldado por experimentos incontrovertible, que el trabajo debido al calor supone necesariamente una disminución de la cantidad de calor en una proporción constante, cualquiera que sea el proceso por medio del cual se genera trabajo. Pero no solamente, lo que se gana en trabajo se pierde en calor, sino que lo que se pierde en trabajo se gana en calor.

William Thomson, un notable físico del siglo XIX, reconoce públicamente que no sabe cómo se puedan conciliar las dos hipótesis, defendidas por dos científicos tan eminentes, con tantos

y tan poderosos argumentos. La solución al problema de la máquina térmica corresponde a R. Clausius en 1850, físico y matemático alemán. En ese momento, en 1850 nace el segundo principio de la termodinámica, que se conoce indistintamente como principio de Carnot o de Clausius

II. EL PROBLEMA

La cuestión de la naturaleza del calor ocupó la atención de los filósofos de la naturaleza desde comienzos del siglo XVII hasta finales del siglo XIX¹. La solución definitiva se debe al científico inglés James Joule (1818-1889)ⁱⁱ con dos célebres experimentos: el de la máquina electromotriz y el de la agitación mecánica del agua [1, 2].

Durante la vida de Joule, los científicos se dividían en dos grandes grupos: los que sostenían que el calor no era

Sandra Milena Forero Díaz

más que vibración de las moléculas de un cuerpo y los que sostenían que el calor era una sustancia imponderable, sutil, invisible, que se manifestaba en el aumento o disminución de la temperatura de los cuerpos. La teoría de la vibración era defendida especialmente por los científicos ingleses como Lockeⁱⁱⁱ, Boyle^{iv}, Leibniz^v y el mismo Newton. La teoría de la sustancia o calórico era defendida por los científicos europeos, entre los cuales el de mayor autoridad era A. Lavoisier^{vi}, químico francés de renombre mundial. A pesar de la prestancia de los científicos ingleses, la teoría del calor como sustancia predominaba a mediados del siglo XIX entre los científicos europeos por dos razones fundamentales: explicaba de una manera sencilla todos o casi todos los fenómenos en los que estaba involucrado el calor^{vii}, y permitía la definición de una unidad de calor, la caloría (la cantidad de calor para aumentar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado) [3].

Desde muy joven, Joule comprendió que el dilema entre vibración y sustancia sólo se podía zanjar estableciendo, si era posible, la equivalencia entre calor y energía mecánica. Si el calor era una vibración y no una sustancia, entonces se podía definir la caloría, no como la cantidad de calórico necesaria para elevar la temperatura del agua en un grado centígrado, sino como la cantidad de energía necesaria para elevar un cuerpo determinado a una altura determinada. Su programa, su objetivo, al que le dedicó más de 40 años de su vida científica, era determinar la equivalencia mecánica del calor [4].

III. PRIMER EXPERIMENTO: LA MÁQUINA ELECTROMOTRIZ

En la época de estudiante, Joule se interesó de manera especial por los fenómenos eléctricos^{viii}. Construyó con elementos muy rudimentarios un motor eléctrico^{ix}. Del motor pasó a la construcción de una máquina electromotriz, que no es más que lo que hoy conocemos como dínamo o máquina para generar corriente: si se hace girar un solenoide dentro de un campo magnético se genera corriente, que a su vez se puede utilizar para calentar agua por medio de un resistor.

Por medio de una serie ingeniosa de experimentos^x, Joule logra determinar que el calor desarrollado por la corriente eléctrica, generada por una batería, es proporcional al producto del cuadrado de la corriente y de la resistencia del resistor^{xi}. En este contexto surge una pregunta inquietante: ¿de dónde proviene el calor generado por la corriente? La respuesta más plausible, piensa Joule, es de la fuente, es decir de la batería. Desde el punto de vista químico en la batería tiene lugar una combustión lenta entre los electrodos y la sustancia que hace de electrolito^{xii}.

De acuerdo con la teoría del calor como sustancia, el calor generado por la corriente se debe a la conducción de éste desde la batería al agua a través del conductor. Para corroborar o negar la hipótesis, Joule utiliza la máquina electromotriz. Genera esta vez corriente, no utilizando una batería sino la acción mecánica sobre la manivela de la máquina electromotriz. El resultado es sorprendente: la

corriente así generada calienta también el agua como en el primer caso: el calor no ha sido transportado de la fuente (la batería) al objetivo (el agua), sino que fue producido por la acción mecánica sobre la manivela.

Para comprobar esta segunda hipótesis, de que el calor no es algo que se transporta, sino algo que se crea por medio de una acción mecánica, propone el siguiente experimento, olvidado completamente por la historia reciente, y que, sin embargo, consideramos muy significativo desde el punto de vista histórico. (Véase Benchmark Paper, Vol 1; on Energy).

Considérese la figura 1:

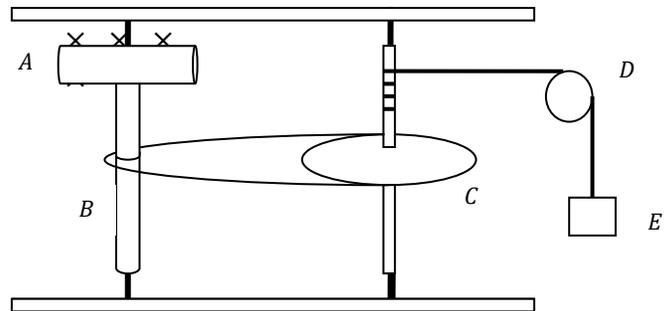


FIGURA 1. Acerca de los efectos calóricos de la magneto-electricidad y sobre el valor mecánico del calor. [Phil. Mag. Ser. 3. Vol XXIII. Read before the Chemical Section of Mathematical and Physical Science of the British-Association. 21 August, 1843].

El dispositivo AB consta de dos cilindros, uno horizontal y otro vertical B. El cilindro horizontal, lleno de agua, contiene una bobina. Si se hace girar el dispositivo AB dentro de un campo magnético perpendicular al plano de la hoja, como se muestra en la figura 1, se genera una corriente en la bobina. La bobina, cuyas extremos están unidos, se calienta por efecto de la corriente, comunicándole calor al agua donde está sumergida. Si se conoce la cantidad de agua en el cilindro y su temperatura inicial y final, se puede determinar la cantidad de calor generado por la corriente.

El campo magnético se genera por medio de un electroimán doblado en forma de U, de manera que el cilindro horizontal, que contiene la bobina gire dentro del espacio dejado por sus dos extremos. La dirección del campo magnético se indica en la figura. La corriente que alimenta el electroimán es proporcionada por una serie de pilas voltaicas.

La rotación del dispositivo AB se obtiene por medio de una par de poleas y de sendos pesos colocados en los extremos del montaje. En el esquema propuesto solo se representa una de las poleas para no complicar la figura.

El experimento tiene dos momentos. En el primer momento, se elimina el campo magnético abriendo el circuito que alimenta la corriente del electroimán. El dispositivo AB gira, pero no hay corriente inducida en la bobina. La energía proporcionada por las pesas al descender equivale al trabajo necesario para vencer la resistencia inercial del dispositivo. En el segundo momento se

restablece el campo magnético, se induce corriente en la bobina, el agua se calienta, para conservar la velocidad de rotación se aumenta el peso E. La diferencia de las energías medidas en los dos momentos corresponde a la energía empleada exclusivamente en el calentamiento del agua^{xiii}.

Después de innumerables ensayos, supremamente meticulosos, Joule concluye en su comunicación a la Asociación británica, en 1843, que, de acuerdo con los resultados de sus experimentos con la máquina electromotriz, *la cantidad de calor necesaria para calentar una libra de agua en un grado Fahrenheit es igual y puede ser convertida en la energía necesaria para levantar 838 lb a una altura vertical de 1 pie*. El valor obtenido por Joule, corresponde, en unidades más familiares para nosotros a 4,45 julios, por gramo de agua, por grado centígrado. Un resultado no muy lejano del que proporcionan los libros de texto, de 4,19 julios por gramo por grado centígrado.

IV. SEGUNDO EXPERIMENTO: EL CALORÍMETRO DE PALETAS GIRATORIAS (1845)

Después de los experimentos con la máquina electromotriz, Joule continuó una serie interminable de experimentos encaminados a confirmar los resultados anteriores, entre los que cabe mencionar los experimentos con chorros de agua a presión a través de orificios^{xiv}, de compresión y expansión de gases^{xv}, etc. Uno de sus últimos experimentos, que aparece con frecuencia en los libros de texto, aparece en una comunicación a la Sociedad Británica en agosto de 1845.

Si el calor no es una sustancia sino una vibración, más exactamente, una forma de energía mecánica, entonces la agitación mecánica del agua se debe manifestar en un aumento de temperatura. Para comprobar una vez más la hipótesis que dirigió su actividad científica durante más de 40 años, ideó el siguiente experimento.

Considérese la figura 2.

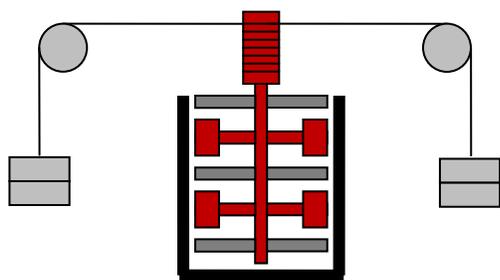


FIGURA. 2 Sobre la existencia de una relación equivalente entre el calor y las formas ordinarias de potencia mecánica. Carta a los editores de la *Philosophical Magazine*, Manchester, agosto 6 de 1845.

Dentro de un recipiente con agua se hace girar un cilindro de bronce con paletas laterales también de bronce. Para aumentar el rozamiento del agua se intercala entre las paletas sendos tabiques horizontales, como se puede

El equivalente mecánico del calor

apreciar en la figura 2. En realidad se trata de un calorímetro con un dispositivo para agitar el agua. El movimiento de rotación se comunica por medio de un hilo doble, enrollado en el cilindro central, que, después de pasar por sendas poleas, sostiene dos pesas.

El experimento tiene tres momentos: en el primer momento se calcula la capacidad calórica de la rueda de paletas y del recipiente, como se procedía normalmente en la utilización de calorímetro mucho antes de Joule. En segundo lugar, se mide la cantidad de trabajo necesaria para poner en movimiento la rueda de paletas, en vacío, es decir sin agua. En tercer lugar, se mide la cantidad de trabajo necesaria para mover la rueda de paletas venciendo la resistencia del agua, a la misma velocidad que en el segundo caso. La diferencia del trabajo entre el segundo momento y el tercero, corresponde, de acuerdo con la hipótesis, a la energía necesaria para elevar la temperatura del agua del recipiente

De acuerdo con la carta de Joule a los Editores de la *Philosophical Magazine* de agosto de 1845^{xvi}, las pesas, cada una de 4 libras, descendían 12 yardas (10,8 m). Después de 16 descensos se medía el aumento de temperatura. El experimento se repitió nueve veces. Teniendo en cuenta la cantidad de agua inicial y el aumento de temperatura, se averigua la cantidad de calor (en kilocalorías) correspondientes a ese aumento de temperatura. El cociente del trabajo y de la cantidad de calor adquirida por el agua constituye la equivalencia mecánica del calor. De acuerdo con los cálculos, el calor necesario para calentar una libra de agua en un grado Fahrenheit equivale al trabajo necesario para levantar 890 libras a una altura vertical de 1 pie, lo que equivale a 4,7 julios por caloría *pequeña* (la cantidad de calor para elevar la temperatura de 1 gramo de agua en 1 grado centígrado).

Al final de su comunicación Joule a la Asociación Británica, Joule hace una breve relación de los resultados de los experimentos más significativos y calcula el valor medio de la equivalencia mecánica del calor.

A continuación hacemos un breve resumen de los valores obtenidos en diferentes experimentos, en donde Q corresponde a la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra de agua en un grado Fahrenheit y q la cantidad de calor para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado.

TABLA I. Resultados obtenidos por Joule en diferentes experimentos.

Experimento	Equivalencia $\left[\frac{lb \cdot pie}{Q}\right]$	Equivalencia $\left[\frac{julios}{q}\right]$	Valor actual $\left[\frac{julios}{q}\right]$
Máquina Electromotriz	823	4,3	4,19
Agua, tubos estrechos	774	4,1	4,19
Gases	795	4,2	4,19
Calorímetro, paletas	890	4,6	4,19
Promedio	817	4,3	4,19

V. CONCLUSIÓN

El Tema de este artículo, *La Equivalencia Mecánica del Calor*, está íntimamente relacionado con el tema central de la Tesis doctoral, *Carnot y la Segunda Ley de la Termodinámica*. De acuerdo con Carnot, la máquina térmica de máximo rendimiento es aquella en la que no se pierde la más mínima cantidad de calor en todo el proceso^{xvii}. De acuerdo con Joule, siempre que hay realización de trabajo exterior por medio del calor, se pierde una cantidad determinada de calor, aproximadamente, de acuerdo con los resultados experimentales, de una caloría pequeña por cada 4,3 julios de trabajo exterior. La hipótesis de Joule tiene lugar en un momento de general aceptación por todos los hombres de ciencia de Europa de los Principios termodinámicos establecidos por Carnot en 1824, después de la publicación de *las reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*. El Dilema es tan serio que un científico de tanta prestancia como Lord Kelvin^{xviii}, confiesa públicamente que no ve cómo se pueda resolver el dilema^{xix}: Carnot o Joule.

NOTAS

ⁱ La evolución histórica del concepto de energía esta inextricablemente conectado con el problema de la naturaleza del calor. Aunque esto no fue evidente en los primeros días, es difícil creer que las personas no tuviesen curiosidad por la aparente asociación entre el incremento del calor de un cuerpo con su esfuerzo físico.

De las visiones contradictorias sobre la naturaleza del calor que persistieron por siglos, las dos predominantes fueron la materialista y la de movimiento. La visión materialista consideraba el calor como una sustancia, mucho más sutil que la materia ordinaria. Esta puede ser de carácter continuo o atómico. Su presencia hace que los objetos se caliente y su ausencia hace que ellos parezcan estar fríos. La teoría del calor como movimiento asume el calor, como el resultado del movimiento de las partes constitutivas de la materia. Tomado de Benckmank papers on Energy. Lindsay Bruce.

ⁱⁱ James Prescott Joule, ofrece uno de los mejores ejemplos de un científico aficionado, que logra el éxito genuino y renombre en su campo. Nació en una familia de cerveceros de Salford cerca a Manchester, Inglaterra. Joule fue en gran parte autodidacta, a la edad de 16 años y durante dos años estudio bajo la tutoría de John Dalton. A la edad de 19 años llego a estar interesado en la relativa nueva ciencia del electromagnetismo, y dedico mucho tiempo al desarrollo de lo era llamado una maquina electromagnética hoy en día conocido como un motor eléctrico, con la idea de probar que tales máquinas proporcionar una mayor eficiencia que las máquinas de vapor.

ⁱⁱⁱ Locke consideraba el calor como una agitación fuerte de las partes insensibles de los objetos.

^{iv} Boyle fue uno de los grandes filósofos naturales del siglo XVII, se interesó en todos los aspectos de los fenómenos naturaleza. Para Boyle el calor es un movimiento molecular y cuando este es

REFERENCIAS

- [1] Elkana, Y., *The Emergence of the Energy Concept* (Disertación Doctoral). Department of History of Ideas, The Faculty of the Graduate School Arts and Sciences, Brandeis University, USA, (1967).
- [2] Fox, R., *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault*, (Oxford University Press., London, 1971).
- [3] Joule, J., *On the Mechanical Equivalent of Heat*, *Philosophical Transactions of the royal Society of London* **140**, 61-82 (1850).
- [4] Joule, J., *New Determination of the Mechanical Equivalent of Heat*, *Philosophical Transactions of the royal Society of London* **169**, 365-383 (1878).
- [5] Linsay, B., *Benchmark Papers on Energy/1. Energy: Historical Development of the Concept*, (Dowden Hutchinson, Pennsylvania, 1975).
- [6] Mott, S., *The concept of energy simply explained* (Segunda Edición), (Dover Publications, Inc. New York, 1964).
- [7] Rumford, B., *An Inquiry concerning the Source of the Heat Which is Exited by Friction*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **88**, 80-102 (1798).

generado por medios mecánicos este es un “nuevo calor”, es decir, se produce calor.

^v En un nivel totalmente diferente a Locke, Boyle y Bacon, Leibniz defendió la teoría del calor como movimiento, con gran influencia a lo largo de todo el continente aunque no de manera inmediata a las postulaciones de sus antecesores.

^{vi} En las manos de Black y Lavoisier la teoría materialista del calor se desarrolló como una ciencia cuantitativa, intentando explicar todos los fenómenos del calor en términos de un fluido elástico o como también fue llamado “fluido ígneo”. Esta hipótesis fue desarrollada en su trabajo titulado “Memoire sur La Chaleur” el cual fue escrito en compañía de Laplace en 1750.

^{vii} Entre los fenómenos estudiados y explicado por esta teoría se encuentran: El comportamiento de las diferentes sustancias frente al calor, los diferentes estados de la materia, explica por qué no hay incremento de temperatura cuando ocurre un cambio de estado, explica satisfactoriamente la relación entre volumen y temperatura de los gases, explica el experimento de Newton sobre la propagación del calor en el vacío y la ebullición del agua a baja temperatura.

^{viii} Para esa época, las brillantes investigaciones de Faraday habían dejado la creencia de que la electricidad podía llegar a suplantar la potencia del vapor, y este llego a ser el sueño del joven Joule, quien quería transformar la planta cervecera de su padre.

^{ix} Este motor que funcionaba con ayuda de una batería, lo construyo en 1837 cuando contaba con 19 años. Este motor rudimentario lo llevo a otra de sus grandes pasiones, las mediciones exactas, observando la fuente de un efecto, midiendo con gran cuidado la disminución de la fuente comparada con el incremento de su efecto.

^x En total realizó 6 series de experimentos tomando en promedio 40 mediciones para cada una de las series.

^{xi} Los primeros experimentos desarrollados le habían dejado la preocupación: si el calor generado por una corriente eléctrica era simplemente generado o transferido desde los alambres de la

bobina, los cuales terminaban enfriándose después de inducir la corriente.

^{xii} Joule consideró la oxidación del zinc en la batería análoga a la quema de carbón bajo la caldera de una máquina de vapor. Midiendo el zinc consumido y comparándolo con el trabajo hecho por su máquina, anunció en la lectura entregada en Manchester en 1841, que por el consumo de una libra de zinc en su batería solamente se podía obtener 1/5 del trabajo hecho por la misma cantidad de carbón en la mejor máquina de vapor de Cornish, renunciando así a su idea de transformar la cervecera.

^{xiii} Por tanto el calor que aparece debe ser creado por este trabajo extra, a través de la corriente eléctrica intermediadora.

^{xiv} Joule pensó que si el trabajo puede ser convertido en calor a través de una corriente eléctrica, entonces debería ser posible hacer esta conversión directamente. Para probarlo Joule midió el calor producido por la fricción en el agua, cuando esta se contiene en un cilindro y es forzada a pasar a través de pequeños agujeros en un pistón que es presiona sobre ella. En este experimento obtuvo 700 libra-pie para el equivalente mecánico del calor (422 kg).

^{xv} En este experimento midió el trabajo requerido y el calor producido cuando un gas se comprime. Esta fue la primera vez que estas dos cantidades fueron relacionadas en una investigación experimental. Él obtuvo de esta manera 823 pie-libra para el equivalente. Posteriormente midió el calor perdido y el trabajo hecho por un gas cuando se expande en contra de una presión, obteniendo un valor para el equivalente de 798 pie-libra.

^{xvi} El escrito impreso se tituló "On the Changes of Temperature produced by Rarefaction and Condensation of Air", aunque en esta época no fue recibido con gran expectativa.

^{xvii} Carnot muestra convincentemente que la potencia motriz es generada solamente por la "caída" del calor sin ninguna alteración en su cantidad.

^{xviii} William Thomson o Lord Kelvin (1824 – 1907) Físico y matemático Inglés, escribió en 1849 una exposición acerca de la teoría de Carnot, en la cual mostro se adhirió a al planteamiento de Carnot. En este mismo escrito admitió que los experimentos de Joule habían mostrado la conversión de trabajo en calor, pero se niega a creer que cualquier experimento pueda mostrar la conversión contraria.

^{xix} Le correspondió a Clausius con su gran perspicacia teórica, en 1850 modificar la teoría de Carnot conforme a los resultados de Joule.