



Sadi Carnot, el ciclo ideal

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 30 de Septiembre de 2013)

Resumen

Desde un punto de vista histórico, la termodinámica nació con la invención de la máquina de vapor, en particular con las mejoras introducidas por J. Watt a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX. Aunque las invenciones de Watt en el perfeccionamiento de la máquina de vapor son eminentemente prácticas, suscitaban innumerables preguntas teóricas. La termodinámica, que hoy ocupa un puesto de primer orden en la física teórica con dos principios supremamente generales, el principio de conservación de la energía en sus diferentes formas y el principio de la degradación de la energía, según el cual en todo proceso parte de la energía se pierde irremediamente. El enorme valor teórico del primer principio, el de la conservación de la energía en sus diferentes formas, se comprende, si se piensa que su descubrimiento unifica la mecánica con las otras ramas de la física, la calórica y la eléctrica. El segundo principio, el de la degradación de la energía, se conoce también como principio de Carnot. Este artículo presenta de manera sintética los trabajos de Sadi Carnot.

Palabras clave: Máquina de vapor, ciclo, máquina térmica, trabajo externo, foco caliente, foco frío, agente de trabajo, eficiencia, potencia.

Abstract

From a historical perspective, thermodynamics was born with the invention of the steam engine, especially with the improvements made by J. Watt in the late eighteenth and early nineteenth century. Although the inventions of Watt in perfecting the steam engine are eminently practical, theoretical questions raised innumerable. Thermodynamics, which now occupies a prime position in theoretical physics with two extremely general principles, the principle of conservation of energy in its various forms and the principle of energy degradation, according to which any process of energy is irretrievably lost. The huge theoretical value of the first principle, the conservation of energy in its various forms, it is understandable, if you think that your discovery mechanics unifies with the other branches of physics, heat and electricity. The second principle, the degradation of energy is also called Carnot principle. This paper presents synthetically the work of Sadi Carnot.

Keywords: steam engine, cycle, heat engine, external work, hot focus, cold focus, agent work, efficiency, power.

PACS: 01.40.-d, 01.65.+g, 05.70.-a

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La termodinámica es la parte de la física que trata del calor como una forma de energía y la relación de esta energía con otras formas como la mecánica, la química, la eléctrica, etc. Su importancia, tanto teórica como práctica, se pone de manifiesto en su relación con los motores tanto térmicos como de combustión. Desde un punto de vista histórico, la termodinámica nació con la invención de la máquina de vapor, en particular con las mejoras introducidas por J. Watt a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX.

Aunque las invenciones de Watt en el perfeccionamiento de la máquina de vapor son eminentemente prácticas, suscitaban innumerables preguntas teóricas, que al irse coordinando dieron lugar al

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 7, No. 3, Sept., 2013

nacimiento de una nueva ciencia, la termodinámica, que hoy ocupa un puesto de primer orden en la física teórica con dos principios supremamente generales, el principio de conservación de la energía en sus diferentes formas y el principio de la degradación de la energía, según el cual en todo proceso parte de la energía se pierde irremediamente.

El enorme valor teórico del primer principio, el de la conservación de la energía en sus diferentes formas, se comprende, si se piensa que su descubrimiento unifica la mecánica con las otras ramas de la física, la calórica y la eléctrica. Antes del principio, no había forma de pasar de los fenómenos calóricos a los mecánicos y viceversa. Sólo a partir del descubrimiento de Joule de que el calor no era más que una forma de energía mecánica y viceversa, se

pudieron unificar las dos ramas, permitiendo, por ejemplo la pregunta de cuánto trabajo mecánico se podría realizar con el calor que elevaría la temperatura de una masa de agua entre dos temperaturas dadas. A partir de este momento tiene entonces sentido la pregunta acerca de la eficacia de un motor térmico, si se entiende por eficacia la relación entre el calor suministrado y el trabajo realizado.

El segundo principio, el de la degradación de la energía, se conoce también como principio de Carnot. El Principio se puede formular de diferentes maneras, una de ellas hace expresa mención a Carnot, *Ninguna máquina puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que opera entre las mismas dos temperaturas.*

Para el año de 1824, la revolución industrial había alcanzado su máximo desarrollo, especialmente en Inglaterra. La utilización en grandes fábricas de máquinas a vapor era de uso común, su empleo en los buques que cruzaban los océanos redujo la distancia entre los continentes; las locomotoras recorrían los campos llevando productos entre los países de Europa y las diferentes ciudades de Norte América. El científico que más contribuyó al desarrollo de la máquina de vapor fue James Watt¹. Entre sus múltiples contribuciones conviene resaltar la separación del foco caliente o caldera del foco frío o condensador. J. Watt era más un ingeniero que un teórico, su preocupación fundamental era el mejoramiento de la máquina térmica sin consideración especial a la eficiencia² [1].

Cinco años después de la muerte de J. Watt aparece la publicación de un pequeño tratado *Sobre la Potencia Motriz del Fuego*³ escrito por un ingeniero francés, Sadi Carnot⁴ [2], a la edad de 24 años, en el que se establecen algunos de los Principios fundamentales de la Termodinámica.

II. LA MÁQUINA TÉRMICA

Una máquina⁵ térmica es un dispositivo que emplea calor para realizar trabajo mecánico. De acuerdo con Watt, se pueden distinguir tres componentes en toda máquina⁶ [3]: una fuente caliente o caldera, una fuente fría o condensador y una sustancia o agente de trabajo que transfiere el calor de la fuente caliente a la fuente fría, vapor de agua, aire, alcohol, aceite, etc.

Carnot compara la máquina térmica con una rueda de molino. Así como en la rueda de molino se requiere de una fuente de agua a cierta altura y un desfogue a una altura menor, así la máquina térmica requiere un foco caliente y un foco frío⁷. El trabajo en el molino es realizado por el agua al caer de un nivel al otro; de manera análoga, el trabajo realizado por la máquina térmica se debe a la caída de calórico del foco caliente al foco frío⁸. En la rueda de molino, la máxima eficiencia se logra cuando no hay pérdida de agua. De una manera análoga, en la máquina térmica, la máxima eficiencia se logra cuando *no hay pérdida de calor* en la transferencia de un foco al otro⁹.

III. EL PROBLEMA

Toda máquina térmica consta de una serie de procesos de expansión y compresión de un agente, por ejemplo, el vapor de agua o el gas encerrado en un cilindro¹⁰. Las condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura deben ser iguales al inicio y al final del proceso, constituyendo de esta manera un ciclo. Un ciclo se caracteriza por el número de procesos y por su secuencia.

El número de ciclos posibles es teóricamente infinito¹¹. Pero no solamente los ciclos posibles son infinitos sino que los agentes son tan variados como variadas son las sustancias que experimentan dilataciones y contracciones a causa de la temperatura¹². Dentro de este contexto, surge la pregunta acerca del ciclo de máxima eficiencia.

IV. EL CICLO DE MÁXIMA EFICIENCIA

La condición de máxima eficiencia, en palabras del mismo Carnot, es que *no haya en el agente ningún cambio de temperatura que no se deba a un cambio de volumen*¹³[2].

Para que haya realización de trabajo se requiere de cambio de volumen y todo cambio de volumen debido al calor supone un cambio de temperatura. Supóngase un gas encerrado en un cilindro, si se calienta el cilindro, el gas se expande pudiendo realizar un trabajo exterior. Si se entiende por eficiencia el cociente del trabajo exterior realizado y el calor transferido por el agente, entonces es evidente que la máxima eficiencia se obtiene cuando todo el calor transferido se emplea exclusivamente en el cambio de volumen, y no, por ejemplo, en calentar el recipiente antes de que tenga lugar la expansión o contracción del gas.

De este único postulado se sigue que el ciclo de máxima eficiencia debe constar de procesos *isotérmicos* y *adiabáticos*. En una compresión o expansión isotérmica, todo el calor transferido al agente se manifiesta exclusivamente en cambio de volumen. En una expansión o compresión adiabática, donde no hay por definición transferencia de calor, el cambio de temperatura se debe exclusivamente al cambio de volumen.

Habiendo determinado los procesos de máxima eficiencia, su integración en un ciclo es una cuestión obvia: *Expansión isotérmica, expansión adiabática, compresión isotérmica, compresión adiabática.*

Durante los dos primeros procesos, el agente realiza trabajo exterior, durante los dos últimos, se realiza trabajo interior, sobre el agente, pero como es fácilmente comprobable, el trabajo exterior es mayor que el trabajo interior, dando por resultado un trabajo neto, debido exclusivamente, como supone Carnot, a la transferencia de calor entre el foco caliente y el foco frío.

La representación del ciclo de máxima eficiencia en un diagrama presión-volumen¹⁴ se debe a Émile Clapeyron¹⁵, quien en 1834 escribió una célebre monografía *Sobre la Potencia motriz de Fuego*, estableciendo los fundamentos matemáticos del trabajo de Carnot [4].

altura en cada ciclo sin que haya nuevo suministro de calor¹⁶ y así sucesivamente, a 2 metros, 3 metros, 100 metros, etc.

Ahora bien, la realización indefinida de trabajo sin consumo de energía, es decir, el movimiento perpetuo de segundo orden, es, de acuerdo con todos los filósofos de la naturaleza una imposibilidad física¹⁷. Por consiguiente, no hay ningún agente, en las máquinas térmicas, superior a otro, en cuanto a la eficiencia¹⁸.

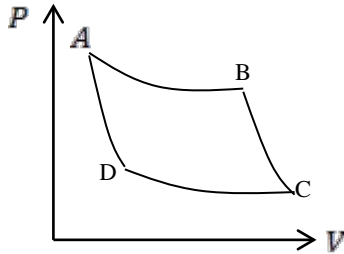


FIGURA 1. Ciclo de Carnot. E. Clapeyron. Journal de L'Ecole Polytechnique, XIV, (1834).

A→B: Expansión isotérmica a la temperatura del foco caliente.

B→C: Expansión Adiabática.

C→D: Compresión isotérmica a la temperatura del foco frío.

D→A: Compresión Adiabática.

V. EL AGENTE MÁS EFICIENTE

Una vez que se determinan los procesos del ciclo más eficiente posible, denominado ciclo de Carnot, queda por resolver una cuestión bastante más difícil: la del agente más eficiente. La transferencia de calor de la caldera al condensador se lleva a cabo a través de una sustancia o agente transmisor. Teóricamente, los agentes posibles son innumerables: el vapor de agua, el aceite, el alcohol, un gas cualquiera, etc. ¿Es el trabajo realizado por uno cualquiera de estos agentes, siguiendo el ciclo de Carnot, y suponiendo la misma cantidad de calor transferido, mayor que el trabajo realizado por los otros agentes? Y si la respuesta es afirmativa, ¿cómo excluir la posibilidad de que más tarde se encuentre otro agente más eficiente, y así sucesivamente? A primera vista parece que la cuestión del agente es insoluble y en este caso, no se podría formular un principio general sobre la eficiencia de la máquina térmica.

El genio de Carnot encuentra una respuesta a la cuestión del agente, que no ha sido superada desde entonces: el ciclo de máxima eficiencia es reversible. Si existiera un agente más eficiente que otro, entonces se podría construir un dispositivo formado por dos máquinas térmicas que utilizaran el ciclo de Carnot con dos agentes diferentes, uno de estos más eficiente que el otro.

Supóngase que la máquina más eficiente (A) puede elevar un cuerpo de un kilogramo de masa a una altura de 2 metros, de tal manera que, como el proceso es reversible, cuando el cuerpo regresa a su posición inicial, el calor transferido de la caldera al condensador, regresa a la caldera (las condiciones de temperatura, presión y volumen del agente, antes y después de los diferentes procesos son iguales). Supóngase que la máquina menos eficiente (B) eleva un cuerpo de un kilogramo a 1 metro de altura, de tal manera que, como el proceso es reversible, cuando el cuerpo regresa a su posición inicial, el calor transferido de la caldera al condensador, regresa a la caldera. Teniendo en cuenta lo anterior, si las dos máquinas se acoplan, es posible elevar dicho cuerpo a 1 metro de

VI. REPRESENTACIÓN DE UN MOVIMIENTO PERPETUO DE SEGUNDO ORDEN

Considérese la figura 2.

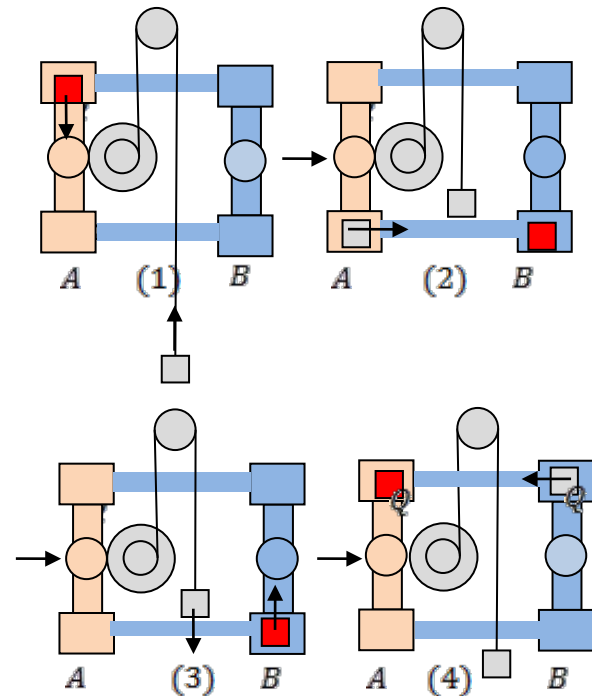


FIGURA 2. Si un agente es superior a otro se pueden acoplar dos máquinas térmicas para construir un dispositivo que realiza trabajo indefinidamente sin consumo de energía: movimiento perpetuo de segundo orden. (Esquema propuesto por el director de Tesis en uno de sus Apuntes inéditos).

(1) Acoplamiento de dos máquinas térmicas, la máquina A y la máquina B. La máquina A posee un agente de trabajo más eficiente que el agente de la máquina B.

(2) El agente de trabajo transfiere una cantidad determinada de calor de la caldera de la máquina A al condensador de la máquina B, que está conectado con el condensador de la máquina A. El resultado es el levantamiento de un cuerpo a 2 metros de altura, por ejemplo.

(3) La máquina B, que por la transferencia de esa misma cantidad de calor (calórico) puede elevar un cuerpo a una altura de 1 metro, trabajando en sentido inverso, ya que los procesos de Carnot son reversibles, puede elevar dicha cantidad de calor nuevamente a la caldera de A, que está

comunicada con su propia caldera, si el cuerpo desciende 1 metro.

(4) La máquina B transfiere a la caldera de A, por medio de su agente de trabajo, la misma cantidad de calor que había salido inicialmente. Las condiciones iniciales y finales, de presión, temperatura y volumen son las mismas. El cuerpo se encuentra por encima de su posición inicial sin que haya habido variación de las condiciones iniciales.

El proceso se puede repetir indefinidamente. *El dispositivo equivale a un movimiento perpetuo de segundo orden, imposible, de acuerdo con el postulado de que no es posible construir una máquina que realiza trabajo indefinidamente sin consumo de energía. Por lo tanto, la eficiencia de una máquina de Carnot es independiente del agente utilizado.*

VII. CONCLUSIÓN

Carnot sentó las bases teóricas para que más tarde Rudolf Clausius¹⁹, físico y matemático alemán, demostrara, en 1850, que ninguna máquina de Carnot puede tener una eficiencia del 100%.

Dos son los grandes aportes históricos de Carnot: los procesos que definen el ciclo de máxima eficiencia y la demostración de que la eficiencia de ese ciclo no depende de la naturaleza del agente que transfiere el calor de la fuente caliente a la fuente fría. Durante 30 años nadie

NOTAS

¹ James Watt (1736-1819) Matemático e ingeniero escoses. Watt no era un simple mecánico, sus habilidades le permitieron ser catalogado como El ingeniero de la Máquina de Vapor. Las mejoras que realizó a la maquina atmosférica de Newcomen, dieron lugar a la máquina de vapor, que resultaría fundamental en el desarrollo de la Revolución Industrial tanto en Inglaterra como en toda Europa.

² Los grandes mejoramiento realizados por Watt a la máquina de vapor fueron principalmente debidos, a su conocimiento del vapor, él aplicó la ciencia a la ingeniería y mejoro la economía de las máquinas. Sus sucesores, sin embargo, no siguieron su ejemplo, sus esfuerzos fueron orientados hacia el incremento de la capacidad de las máquinas, con el propósito de disminuir el costo de funcionamiento. La diferencia entre estas dos: la capacidad es un problema mecánico, mientras que la economía es un problema térmico.

³ Reflections on the Motive Power of Fire by Sadi Carnot and Other Papers on the Second Law of Thermodynamics by E. Clapeyron and R. Clausius editado por E. Mendoza, publicado por Dover Publications en 1960.

⁴ Durante el curso de su corta vida (1796 – 1832), Carnot escribió solo un libro, el cual ha sido considerado como una de cien páginas más notables de la literatura científica. Documento que sentó los principios de la segunda Ley de la Termodinámica.

⁵ En el sentido moderno del término se entiende por máquina todo dispositivo que puede realizar trabajo exterior aprovechando las fuerzas de la naturaleza, de una forma continua. El dispositivo, del cual depende el funcionamiento de la máquina, es precisamente el motor. Hasta la aparición del motor de Papín, todos los

cuestionó el razonamiento que sirvió de base a la monografía de Carnot, publicada en 1824, hasta las comunicaciones a la Asociación Británica de James Prescott Joule²⁰ a partir de 1843. De acuerdo con los experimentos de Joule, siempre que se realiza trabajo por medios térmicos hay una pérdida de calor. Si es así, la hipótesis fundamental de Carnot de que el trabajo se debe exclusivamente a la transferencia de calor del foco caliente al foco frío está en abierta contradicción con los resultados experimentales: *Toda la argumentación carece por lo tanto de validez.* La conciliación entre Carnot y Joule es el objetivo de otro artículo a publicar.

REFERENCIAS

[1] Mott, S., *The concept of energy simply explained*, 2^a Edición, (Dover Publications, Inc. New York, 1964).

[2] Carnot, S., *Reflections on the motive power of fire and other papers on the second law of thermodynamics* by É. Clapeyron and R. Clausius, 2^a edición, (Dover Publications, Inc. New York, 1988).

[3] Hart, I., *James Watt and the history of steam power*, (Henry Shuman, New York, 1949).

[4] 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).

dispositivos antiguos que aprovechaban la fuerza expansiva del vapor de agua, más que máquinas en el sentido estricto del término no eran más que artilugios o mecanismos contruados más para llamar la atención que para realizar trabajo mecánico de una manera ininterrumpida, como los célebres artilugios de Herón de Alejandría en el siglo primero.

⁶ Hasta el mejoramiento realizado por Watt, que consistió en la separación del cilindro de condensación del cilindro de expansión, todas las máquinas de vapor realizaban los procesos de expansión y de condensación en un mismo recipiente, lo que significa un desperdicio notable de la potencia motriz del fuego.

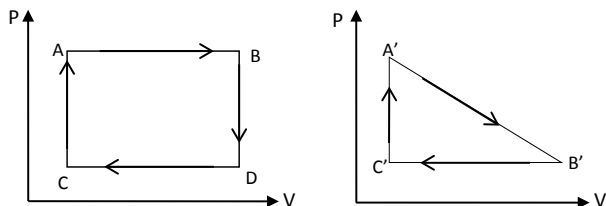
⁷ El calor siempre fluye de mayor a menor temperatura.

⁸ Carnot: *“La producción de movimiento en la máquina de vapor es siempre acompañada por una circunstancia sobre la cual fijaremos nuestra atención: esta circunstancia es el restablecimiento del equilibrio en el calórico cuando este pasa desde un cuerpo en el cual la temperatura es más o menos elevada a otro en el cual es más baja, ¿Qué sucede en la máquina de vapor ya en movimiento? El calórico producido en la caldera por el efecto de la combustión atraviesa las paredes de la caldera, produciendo vapor, y de esta misma manera se incorpora con el vapor. Este vapor es llevado al cilindro donde realiza alguna función, de allí es llevado al condensador donde es licuado por contacto con agua fría. Entonces, como resultado final se obtiene, que el agua fría del condensador toma posesión del calórico producido por la combustión”.*

⁹ *“La producción de potencia motriz en la máquina de vapor, es debida no al consumo del calórico sino a su transferencia de un cuerpo caliente a otro cuerpo frío, esto es, el restablecimiento del equilibrio, un equilibrio que se considera destruido por cualquier causa, como por ejemplo, la acción química, tal como en la combustión o cualquier otro”.*

¹⁰ “Para considerar la forma más general, el principio de la producción de movimiento por calor debe ser considerado independiente de cualquier mecanismo o cualquier agente en particular. Es necesario establecer principios aplicables no solo a las máquinas de vapor sino a cualquier máquina de calor imaginable, con cualquier sustancia trabajando y con cualquier método por el cual este funcione”.

¹¹ Las posibilidades de diferentes ciclos térmicos son infinitas. Véase por ejemplo dos máquinas térmicas con ciclos diferentes:



A→B: Expansión a volumen constante.

B→C: Disminución de la presión a volumen constante.

C→D: Compresión a presión constante.

D→A: Aumento de la presión a volumen constante.

A'→B': Expansión con disminución de la presión.

B'→C': Compresión a presión constante.

C'→A': Aumento de la presión a volumen constante.

¹² “Donde sea que exista una diferencia de temperatura, cualquiera donde sea posible restablecer el equilibrio del calórico, es posible también la producción de una potencia impulsora. El vapor es un medio para darse cuenta de esta potencia, pero este no es el único. Todas las sustancias en la naturaleza pueden ser empleadas para este propósito, todas son susceptibles a cambios de volumen, de sucesivas contracciones y dilataciones, a través de alternar calor y frío. Todas son capaces de sobrepasar en sus cambios de volumen ciertas resistencias, y así desarrollar la potencia impulsora”.

¹³ “La potencia motriz en las máquinas de vapor es debida al restablecimiento del equilibrio del calórico, este toma lugar no solo en las máquinas de vapor sino también en cada máquina de calor, esto es, para cada máquina en la cual el calórico es el motor. El calor puede evidentemente ser una causa de movimiento solamente por virtud de cambios de volumen o de forma, los cuales son producidos en los cuerpos”.

¹⁴ Estas gráficas indican que el área encerrada por el polígono representa el trabajo exterior realizado por la máquina. Hoy en día conocidas como gráfica de Clapeyron.

¹⁵ Benoit Paul Émile Clapeyron (1799-1864). Ingeniero y Físico francés. Dos años después del fallecimiento de Carnot, publicó un documento titulado Puissance motrice de la Chaluer (La potencia motriz del fuego), en el que presenta el trabajo de Carnot de una forma sencilla y gráfica.

¹⁶ Carnot: “Si existiese una forma más perfecta de obtener potencia motriz desde el calor que la ya descrita, un método por el cual más potencia pudiese ser obtenida a partir de la misma cantidad de calor y las mismas temperaturas, entonces, se podría desviar una parte de la potencia obtenida por esta máquina pluscuamperfecta, y usar esta parte por medio de las operaciones inversas para restaurar el calor total a la fuente. Por la repetición indefinida de las operaciones, la parte de calor no utilizada puede ser multiplicada sin límite. Esta combinación puede así, por el simple uso de la misma cantidad de calor una y otra vez, producir una cantidad de potencia ilimitada, sin la transferencia ilimitada de cualquier calor a baja temperatura”.

¹⁷ Carnot: “podría no ser solamente un movimiento perpetuo sino una creación ilimitada de potencia motriz sin consumo ni de calórico ni de cualquier otro agente. Tal creación es completamente contraria a las ideas aceptadas, a las leyes de la mecánica y de la física el sonido. Esto es inadmisibles”.

¹⁸ Carnot: “el máximo de potencia motriz obtenido desde el uso de vapor es también el máximo de potencia motriz obtenible por cualquier otro medio”.

¹⁹ Su trabajo más importante *Über die bewegende Kraft der Wärme* (Sobre la fuerza motriz del calor) publicado en 1850, donde estableció las ideas básicas de la segunda ley de la Termodinámica.

²⁰ James Prescott Joule (1818 – 1889). Físico británico que, con ingeniosos experimentos, demostró que siempre que se realiza trabajo mecánico por medios térmicos, hay una pérdida de cierta cantidad de calor, perfectamente determinable.