



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

SADI CARNOT Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La Historia de la Ciencia como Pedagogía Natural

SANDRA MILENA FORERO DÍAZ

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
DOCTORADO INTERINSTITUCIONAL EN EDUCACIÓN
ENFÁSIS EN CIENCIAS
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ELABORACIÓN DE LOS
CONCEPTOS CIENTÍFICOS
BOGOTÁ, COLOMBIA
2014**

SADI CARNOT Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La Historia de la Ciencia como Pedagogía Natural

SANDRA MILENA FORERO DÍAZ

**Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Educación**

**DIRECTOR
Dr. FABIO VELEZ URIBE**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: ELABORACIÓN DE LOS
CONCEPTOS CIENTÍFICOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN: CIENCIAS, ACCIONES Y
CREENCIAS**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL
DOCTORADO INTERINSTITUCIONAL EN EDUCACIÓN
BOGOTÁ, COLOMBIA
2014**

DEDICATORIA

Dedico esta tesis doctoral realizada con mucho esfuerzo, dedicación y sacrificio, pero con mucho amor a mis padres Carmenza y Juan Antonio por su amor y compañía incondicional.

A mi esposo Rafael y nuestra hijita que pronto vendrá a llenar de felicidad nuestro hogar, por su ejemplo y comprensión.

A mamá Evita quien me ha apoyado incondicionalmente.

A Patty y John Jairo y sus respectivas familias por su apoyo y solidaridad.

A todas las personas que siempre me han apoyado, y tuvieron a bien acompañarme en la obtención de esta meta, la cual me ha permitido crecer como persona y como profesional.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de este largo proceso, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y desfallecimiento, por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias, retos, y sobre todo la felicidad de tener personas maravillosas a mi lado.

Le doy gracias a mis padres Carmenza y Juan Antonio por apoyarme en todo momento y en todo sentido, por brindarme la oportunidad de una excelente educación y por ser el mejor ejemplo a seguir.

A mis hermanos y sus familias, por ser parte muy importante de mi vida y representar la unidad familiar.


A mama Evita por ser el motor de nuestra familia, porque con su cariño, apoyo y liderazgo, nos ha mostrado que no importa los obstáculos o enfermedades siempre se puede salir triunfador.

A Rafael mi esposo y a nuestra hijita que viene en camino, por su apoyo incondicional, su amor y confianza sin límite, gracias por cada palabra, acción, sacrificio y dedicación.

Infinitas gracias al Dr. Fabio Vélez, por ser el tutor, guía y orientador de la presente tesis. Trabajo que sin su rigurosidad, dedicación y compromiso en mi formación, no hubiese llegado a feliz término.

A mis familiares, amigos y compañeros de trabajo, quienes de una u otra manera contribuyeron para alcanzar cada uno de los requisitos necesarios para obtener este nuevo logro en mi vida.


Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Aplicada del Instituto Politécnico Nacional (CICATA-IPN), y en especial al grupo de doctores del programa de Doctorado en Física Educativa por sus valiosos aportes a la presente tesis durante la estancia de investigación que desarrolle a lo largo de tres meses.

	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 1 de 5	

1. Información General	
Tipo de documento	Tesis de grado de doctorado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	SADI CARNOT Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA. La Historia de la Ciencia como Pedagogía Natural
Autor(es)	Forero Díaz, Sandra Milena
Director	Vélez Uribe, Fabio
Publicación	Bogotá, Universidad Pedagógica Nacional
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional UPN
Palabras Claves	Calor, eficiencia térmica, trabajo, máquina térmica, pedagogía natural, equivalente mecánico, termodinámica.

2. Descripción
<p>Uno de los grandes problemas de la enseñanza es su artificialidad, que se puede definir como la separación entre los temas de la clase y los temas de la vida. Para hacer más naturales los problemas, especialmente a nivel universitario, la historia es posiblemente el medio más adecuado para hacer la enseñanza más natural. En el caso de la presente tesis doctoral, el problema central es un problema alrededor del cual se mueven personajes reales, célebres por su contribución a la construcción de las ciencias.</p> <p>Desde el punto de vista de la física, el problema es la aparente contradicción entre la hipótesis de Carnot de que el calórico no disminuye al pasar de una temperatura mayor a una temperatura menor y la hipótesis de Joule de que sí disminuye y que esta disminución es proporcional al trabajo realizado por la máquina. Desde el punto de vista pedagógico, el problema, para el profesor, es cómo hacer que un problema aparentemente artificial, se convierta en un problema vital para la consolidación de la segunda ley de la termodinámica. Nuestra hipótesis es que el enfoque histórico, en el planteamiento y solución del problema, proporciona los elementos de naturalidad, vitalidad y espontaneidad que hace de la enseñanza de la ciencia y en particular de la Física, una actividad profundamente humana y, como tal, supremamente atractiva para el estudiante.</p> <p>La presente tesis doctoral parte del presupuesto, que sirve de base a la línea de investigación denominada <i>la elaboración de los conceptos científicos</i>, de que <i>el análisis histórico de algunos problemas científicos relevantes contribuye, de una manera significativa, a la profundización de los conceptos relacionados con tal situación</i>. Los conceptos científicos, en contraposición a los conceptos matemáticos y lógicos, no son resultado de definiciones, sino de procesos lentos, de ensayo y error, de <i>adecuación</i> y <i>acomodación</i>, según la feliz expresión de Piaget. Son ciertamente construcciones del espíritu humano, pero no en el sentido de un trabajo dirigido, de acuerdo con un plan, y a partir de elementos dados, como en la construcción de una máquina, sino más bien, en el sentido de un trabajo de avances y retrocesos. El análisis histórico de las explicaciones y construcciones de conceptos que permiten comprender, fenómenos naturales en una época determinada, se convierte en trabajos originales, no solo por lo exhaustivo de la investigación sino por la escasez y dificultad de conseguir información primaria.</p>

3. Fuentes
<p>MONOGRAFÍAS Carnot, S (1988). <i>Reflections on the motive power of fire and other papers on the second law of</i></p>

	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 2 de 5	

thermodynamics by É. Clapeyron and R. Clausius (Segunda edición). Dover Publications, Inc. New York.

Joule, J (1850). *On the Mechanical Equivalent of Heat*. Philosophical Transactions of the royal Society of London. Vol. 140, pp. 61-82

Joule, J (1878). *New Determination of the Mechanical Equivalent of Heat*. Philosophical Transactions of the royal Society of London. Vol 169. Pp. 365 -383.

Mayer, J. Joule, J. Carnot, S. (1929). *The Discovery of the Law of Conservation of Energy*. Isis, Vol. 13, No. 1, pp. 18-44. The University of Chicago Press on behalf of The History of Science Society..

Rumford, B. (1798). *An Inquiry concerning the Source of the Heat which is Exited by Friction*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Vol. 88. P. 80 – 102.

Thompson, B. (1786). *New Experiments upon Heat. By Colonel Sir Benjamin Thompson*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 76 (1786), pp. 273-304. The Royal Society.

Thomson W (Lord Kelvin) (1897). *Reflecions On The Motive Power of Heat*. John Wiley and Sons, London. Reprint by Kessinger Publishing's Rare Reprints.

LIBROS CONSULTADOS

Bachelard, G (1973). *Etude sur L'evolution d'un probleme de Physique*. Vrin. Paris.

Brown, S (1949). *Count Rumford and the Caloric Theory of Heat*. Proceedings of the American Philosophical Society, Vol. 93, No. 4, pp. 316-325.

Duhem, P (1969). *To save the Phenomena*. The University of Chicago Press.

Elkana, Y (1967). *The Emergence of the Energy Concept* (Disertación Doctoral). Department of History of Ideas. The Faculty of the Graduate School Arts and Sciences. Brandeis University.

Fox, Robert (1969). *Reviewed work(s), Benjamin Thompson, etc.* The British Journal for the History of Science, Vol. 4, No. 3 pp. 290-291. Cambridge University Press on behalf of The British Society for the History of Science Stable.

Fox, Robert (1971). *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault*. Oxford University Press. London.

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

Koyré, A (1965). *La revolution astronomique, Histoire de la Pensée III*. Hermann.

Koyré, A (1965). *Newtonian Studies*. The University of Chicago Press.

Koyré, A (1978). *Estudios de Historia del Pensamiento Científico*. Siglo XXI editores.

Lindsay, B. *Benchmark Papers on Energy/1. Energy: Historical Development of the Concept*. Dowden Hutchinson. Pennsylvania, (1975).

Matthews, M (1991). *Un lugar para la historia y la filosofía en la enseñanza de las ciencias*. Comunicación, Lenguaje y Educación. Dialnet.

Muirhead, James Patrick (1859). *The Life of James Watt with selections from his correspondence*. John Murray, London.


Morris, R (1972). *Lavoisier and the Caloric Theory*. The British Journal for the History of Science, Vol. 6, No. 1, pp. 1-38. Cambridge University Press on behalf of The British Society for the History of Science.

Mott, N (1964). *The concept of energy simply explained*, (Segunda Edición). Dover Publications, Inc. New York.

Vélez, F. Documento de presentación del énfasis educación en ciencias. Doctorado interinstitucional en Educación, Universidad Pedagógica Nacional. P. 39 – 42.

4. Contenidos

La intención de la investigación no fue descubrir nuevos datos sobre un hecho histórico, sino aprovechar los datos disponibles para reconstruir el proceso mental que llevó a científicos eminentes a plantear y resolver un problema importante de la física, con el propósito de proporcionar a estudiantes y profesores un documento que ayude en la profundización en los conceptos de la termodinámica, en particular de la segunda ley.

	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 3 de 5	

En este sentido, el documento está compuesto por 7 capítulos, en el primer capítulo se presenta la fundamentación teórica de la línea de investigación: la elaboración de los conceptos científicos. Desde el capítulo 2 hasta el capítulo 6 se presenta la discusión alrededor del dilema Carnot- Joule. El capítulo 2 se titula la máquina de vapor, J. Watt; el capítulo 3, el calor como sustancia y el calor como vibración; (el capítulo 4, el ciclo de ideal según Carnot; el capítulo 5, la objeción de Joule; el capítulo 6, Clausius y la solución al dilema Carnot-Joule; finalmente en el capítulo 7 se presenta a manera de reflexión final la recapitulación de las conclusiones obtenidas en los capítulos anteriores.


5. Metodología

La investigación se desarrolló en tres etapas. En la primera etapa, de aproximación, se revisaron los documentos relacionados con el problema elegido: la objeción de Joule a Carnot. En la segunda etapa, de profundización, se investigaron los argumentos de cada una de las partes, teniendo el cuidado de ser lo más objetivo posible. En la tercera etapa, de consolidación, se reconstruyó la solución propuesta por Clausius, presentada en el capítulo seis. Finalmente se presenta, a manera de recapitulación, en el capítulo siete, la síntesis de las discusiones de los seis capítulos precedentes.

6. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de cada uno de los capítulos desarrollados:

- Capítulo I: La historia problemática de la ciencia y de la Física en particular es, desde el punto de vista de la Línea de Investigación *La Elaboración de los conceptos Científicos*, un método pedagógico supremamente valioso, no solamente para transmitir la *materia* de conocimiento, sino su *espíritu*, que es el espíritu de la curiosidad y de la sorpresa.
- Capítulo II: Desde el punto de vista teórico, y dentro del contexto de la presente investigación, las innovaciones de Watt prepararon el terreno para que S. Carnot planteara por primera vez en la historia de la ciencia el problema de la eficiencia de la máquina térmica, entendiendo por máquina térmica todo dispositivo que realiza trabajo por intermedio del calor. Watt tiene el mérito histórico de haber mostrado la necesidad de dos focos, uno caliente, la caldera y otro frío, el condensador. Carnot supone que el trabajo se debe precisamente a la caída del calor entre estos dos focos, el caliente y el frío, de una manera semejante a como el trabajo generado por un molino de agua se debe a la caída del agua de la represa al estanque. Partiendo de esta hipótesis, demuestra que el trabajo realizado es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos focos, preparando el terreno para la posterior formulación de la segunda ley de la termodinámica.
- Capítulo III: Los resultados experimentales de B. Thomson (Conde Rumford) significaron un duro golpe a los defensores del modelo sustancial del calor y un argumento supremamente sólido para los defensores del modelo vibratorio. Sin embargo, los defensores del calórico no se dieron por vencidos y recurrieron a todo tipo de elucubraciones para interpretar los resultados de los experimentos de Thomson, como la suposición de que el calor generado no era más que la conversión del calor latente en calor sensible, de acuerdo con la hipótesis de J. Black. El argumento más poderoso a favor de la hipótesis del calor como vibración, según el mismo Thomson, era la característica de inagotable de la producción de éste, dependiente solamente del trabajo de fricción realizado por la fresa sobre el bloque de bronce. El calor total generado en el experimento, de acuerdo con la tabla 3.1, se debía a la trituración de solamente 8 onzas de bronce. La trituración de ocho onzas genera calor suficiente para poner en ebullición 26 litros de agua a partir de cero grados centígrados o 32 grados Fahrenheit. Si se tiene en cuenta que el bloque de bronce en estado bruto era de aproximadamente 113 libras, un cálculo


	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 4 de 5	

sencillo muestra que la cantidad de calor que se generaría con la reducción a virutas de una masa igual de bronce, con el mismo procedimiento, sería supremamente grande. Además, otros experimentos que no se han comentado, mostraron que la cantidad de calor generado en función del tiempo no disminuye gradualmente como se supone que sucedería si por hipótesis el calor fuera una sustancia adicional a la sustancia que constituye el cuerpo del cañón, el bronce: ésta se iría agotando gradualmente, lo que no sucede en el experimento en cuestión.

- Capítulo IV: Carnot sentó las bases teóricas para que más tarde Rudolf Clausius, 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 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 Joule 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 del capítulo 6.
- Capítulo V: El tema de este capítulo, *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. 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*. La hipótesis de Joule, confirmada por innumerables experimentos, entra en conflicto con la hipótesis de Carnot: si Joule tiene razón, el gran descubrimiento de Carnot, *el ciclo ideal*, carece de fundamento; si Carnot tiene razón, los resultados experimentales de Joule no son válidos. El Dilema es tan serio que un científico de tanta prestancia como Lord Kelvin confiesa públicamente que no ve cómo se pueda resolver el dilema: Carnot o Joule.
- Capítulo VI: La equivalencia mecánica del Calor, demostrada experimentalmente por Joule, plantea dos problemas teóricos íntimamente ligados: 1) Si el trabajo realizado por una máquina térmica supone necesariamente una pérdida de calor, ¿cómo entonces garantizar que las condiciones finales de presión volumen y temperatura del agente de trabajo sean iguales, como debería ser en un ciclo térmico que merezca el nombre de tal? 2) Si de acuerdo con Joule, la realización de trabajo supone una pérdida de calórico, ¿cómo entonces reconstruir, a partir de una hipótesis diferente a la de Carnot, una teoría sobre la máquina térmica comparable a la teoría propuesta por Carnot, que había sido confirmada por innumerables experimentos?

Clausius, en su Monografía sobre la Potencia Motriz del Calor responde a ambas cuestiones. A la primera por medio de una hipótesis subsidiaria que expondremos a continuación; a la segunda, por medio de un tratamiento analítico que no entra dentro del propósito de esta investigación, a pesar de indiscutible importancia histórica.

El propósito de esta investigación tiene que ver con la primera cuestión: la conciliación entre la hipótesis de Carnot, de que las condiciones de presión, volumen y temperatura de un gas están determinadas por la cantidad de calórico que contiene el gas, de manera que si el contenido varía, varían dichas

	FORMATO	
	RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 5 de 5	

condiciones, y la hipótesis de Joule de que la realización de cualquier trabajo mecánico supone la consunción de cierta cantidad de calórico.

La solución a la primera cuestión ha sido expuesta a lo largo de este capítulo: El calórico que entra a la máquina térmica durante la expansión isotérmica se va convirtiendo simultáneamente en trabajo; el trabajo que se realiza sobre el agente de trabajo en la compresión isotérmica, se va transfiriendo en forma de calórico al foco frío. Como el trabajo exterior que se realiza durante la expansión adiabática es igual al trabajo que se realiza sobre el gas (agente de trabajo) en la compresión adiabática, entonces el contenido del calórico del gas permanece inalterado en todo el proceso, cumplimiento de esta forma con la hipótesis o axioma de Carnot de que a condiciones iguales, en un mismo agente, igual contenido de calórico.

Solo nos queda justificar la solución propuesta haciendo referencia explícita al texto de Clausius en la monografía citada, lo que hacemos a continuación:

Hipótesis subsidiaria: *Los gases muestran varias relaciones, especialmente en la relación expresada por la ley de Mariotte y Gay Lussac entre volumen presión y temperatura, una regularidad tan grande de comportamiento, que estamos naturalmente inclinados a tomar el punto de vista de que las atracciones mutuas de las partículas que actúan dentro de los cuerpos sólidos y líquidos, no actúan más en los gases, de manera que en el caso de otros cuerpos, el calor que produce la expansión debe superar no solamente la presión externa, sino la atracción interna; en el caso de los gases, esto tiene que ver solamente con la presión externa. En este caso, pues, durante la expansión de un gas, tanto calor se vuelve latente como se emplea en realizar trabajo externo. No hay, además, ninguna razón para pensar que un gas, si se expande a temperatura constante, contenga más calor libre que antes. Si se admite esto, tenemos la ley: un gas permanente, si se expande, a constante temperatura, toma solamente tanto calor como se consume haciendo trabajo exterior durante la expansión. Esta ley es probablemente verdadera para cualquier gas con el mismo grado exactitud a la alcanzada por la aplicación a éste de la ley de M y G . (Sadi Carnot, Reflection on the Motive Power of Fire, pag 128, Dover Publications. 1988*

La ley formulada en el texto: *un gas permanente, si se expande a constante temperatura, toma solamente tanto calor como se consume haciendo trabajo exterior durante la expansión, contiene la solución de Clausius al Dilema entre Carnot y Joule, que ha sido el tema general de la presente investigación.*

Elaborado por:	Sandra Milena Forero Díaz
Revisado por:	Fabio Vélez Uribe

Fecha de elaboración del Resumen:	18	10	2014
--	----	----	------

RESUMEN

Desde el punto de vista de la física, el problema es la aparente contradicción entre la hipótesis de Carnot de que el calórico no disminuye al pasar de una temperatura mayor a una temperatura menor y la hipótesis de Joule de que sí disminuye y que esta disminución es proporcional al trabajo realizado por la máquina. Desde el punto de vista pedagógico, el problema, para el profesor, es cómo hacer que un problema aparentemente artificial, se convierta en un problema vital para la consolidación de la segunda ley. Por tanto, el problema central de la tesis tiene que ver con la conciliación entre las hipótesis de S. Carnot y la J. Joule. Como es de notar la intención de la investigación no fue descubrir nuevos datos sobre un hecho histórico, sino aprovechar los datos disponibles para reconstruir el proceso mental que llevó a científicos eminentes a plantear y resolver un problema importante de la física, con el propósito de proporcionar a estudiantes y profesores un documento que ayude en la profundización en los conceptos de la termodinámica, en particular de la segunda ley.

En este sentido la tesis doctoral parte del presupuesto planteado por la línea de investigación, La elaboración de los conceptos científicos, de que *el análisis histórico de la discusión y solución a ciertos problemas científicos contribuye de una manera importante a la profundización de los conceptos relacionados con el problema y su solución*". Los conceptos científicos, en contraposición a los conceptos matemáticos y lógicos, no son resultado de definiciones, sino de procesos lentos, de ensayo y error, de *adecuación y acomodación*, según la feliz expresión de Piaget. Son ciertamente construcciones del espíritu humano, pero no en el sentido de un trabajo dirigido, de acuerdo con un plan, y a partir de elementos dados, como en la construcción de una máquina, sino más bien, en el sentido de un trabajo de avances y retrocesos. El análisis histórico de las explicaciones y construcciones de conceptos que permiten comprender, fenómenos naturales en una época determinada, se convierte en trabajos originales, no solo por lo exhaustivo de la investigación sino por la escasez y dificultad de conseguir información primaria.

PALABRAS CLAVES: Calor, eficiencia térmica, trabajo, máquina térmica, pedagogía natural, equivalente mecánico, termodinámica.

ABSTRACT

From the point of view of physics, the problem is the apparent contradiction between the hypothesis that caloric Carnot does not decrease when going from a higher temperature to a lower temperature and Joule hypothesis that self decreases and this decrease is proportional to the work done by the machine. From the pedagogical point of view, the problem for the teacher is how to make a seemingly artificial problem, it becomes a vital for the consolidation of the second law problem. Therefore, the central problem of the thesis is concerned with reconciling the hypothesis J. S. Carnot and Joule. As you noted the intention of the research was not to discover new information about a historical event, but to use the data available to reconstruct the thought process that led to eminent scientists to formulate and solve a major problem of physics, in order to provide students and teachers a document that helps in deepening the concepts of thermodynamics, particularly the second law.

In this sense the thesis of the budget proposed by the research : "The development of scientific concepts" that historical analysis of the discussion and solution of certain scientific problems contributes in a major way to the deepening of the concepts related to the problem and its solution". Scientific concepts, as opposed to mathematical and logical concepts are not the result of definitions, but slow process of trial and error, adaptation and accommodation, according to the happy expression of Piaget. Certainly are constructions of the human spirit, but not in the sense of a job will run, according to a plan, and from given elements, as in the construction of a machine, but rather in the sense of a work of progress and setbacks. Historical analysis of the explanations of concepts and constructs that allow us to understand natural phenomena at a particular time, becomes original work, not only by the thoroughness of the investigation but by the scarcity and difficulty in obtaining primary information.

KEYWORDS: Heat, thermal efficiency, work, heat engine, natural pedagogy, mechanical equivalent thermodynamics.

CONTENIDO

RESUMEN.....	X
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABLAS.....	XV
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. LA PEDAGOGÍA NATURAL	4
1.1. La importancia de la historia	4
1.2. Dos tipos de pedagogías	4
1.3. Postulados	5
1.3.1. Primer postulado	5
1.3.2. Segundo postulado	6
1.3.3. Tercer postulado.....	7
1.3.4. Cuarto postulado	7
1.4. Tipos de historia	8
1.4.1. Historia filosófica.....	8
1.4.2. Historia pedagógica.....	9
1.5. Conclusión	10
CAPITULO 2. LA MÁQUINA DE VAPOR, J. WATT	11
2.1. El poder del vacío	11
2.2. La máquina de Papín.....	12
2.3. La máquina de Newcomen.....	13
2.4. James Watt.....	14
2.4.1. La solución de J. Watt	14
2.4.2. Otras innovaciones	16
2.5. Conclusión	16
CAPITULO 3. EL CALOR COMO SUSTANCIA Y EL CALOR COMO VIBRACIÓN.....	17
3.1. El calor como sustancia.....	17
3.1.1. El poder explicativo del modelo del calórico	19
3.1.1.1.Las sustancias tiene diferentes capacidades calóricas	19
3.1.1.2.Explica satisfactoriamente la diferencia de estados.	20

3.1.1.3. Explica la existencia de la temperatura crítica en los cambios de estado	20
3.1.1.4. Explica los cambios de temperatura en la expansión y compresión de los gases	20
3.2. El calor como vibración	20
3.2.1. El experimento de Newton	21
3.2.2. El experimento de B. Thomson	21
3.3. Conclusión	24
CAPITULO 4. EL CICLO IDEAL: CARNOT	25
4.1. La máquina térmica.....	25
4.2. El problema.....	26
4.3. El ciclo de máxima eficiencia	27
4.4. El agente más eficiente.....	29
4.5. Representación de la máquina térmica según la hipótesis de Carnot	29
4.6. Representación de la reversibilidad de la máquina térmica	30
4.7. Acoplamiento de dos máquinas térmicas: el movimiento perpetuo de segundo orden	30
4.8. Un poco de matemáticas	32
4.9. Conclusión	35
CAPÍTULO 5. LA OBJECCIÓN DE JOULE	37
5.1. Primer Experimento: La máquina electromotriz	38
5.2. El equivalente mecánico del calor	41
5.3. Segundo Experimento: el calorímetro de paletas giratorias (1845)	43
5.4. Conclusión	45
CAPITULO 6. CLAUSIUS: LA SOLUCIÓN AL DILEMA CARNOT-JOULE.....	46
6.1. William Thomson	47
6.2. El Dilema Carnot - Joule.....	47
6.3. Rudolf Julius Emmanuel Clausius.....	50
6.4. La solución de Clausius	50
6.5. Representación gráfica de la solución de Clausius	54
6.6. Recapitulación.....	55
CAPITULO 7. RECAPITULACIÓN.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Motor de Papín.....	12
Figura 2.2. La máquina atmosférica de Newcomen.....	13
Figura 2.3. La innovación de Watt a la máquina de Newcomen.....	15
Figura 3.1 Experimento de B. Thomson, 1798.....	22
Figura 4.1. Representación de dos ciclos diferentes.	26
Figura 4.2. Representación del ciclo de Carnot	28
Figura 4.3. Diagrama del ciclo de Carnot	28
Figura 4.4. Representación de una máquina térmica de acuerdo con la hipótesis de Carnot	30
Figura 4.5. Representación del ciclo inverso de Carnot.....	30
Figura 4.6. Acoplamiento de dos máquinas térmicas.	31
Figura 5.1. Reconstrucción de una figura que aparece en Acerca de los efectos calóricos de la magneto-electricidad y sobre el valor mecánico del calor.	39
Figura.5.2. 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.	44
Figura 6.1 Requisito fundamental de Carnot.	49
Figura 6.2.La hipótesis de Joule.	49
Figura 6.3. Expansión Isotérmica.	51
Figura 6.4 Procesos adiabáticos.	51
Figura 6.5 Compresión isotérmica.....	52
Figura 6.6. Trabajo exterior realizado por el gas durante todo el ciclo.	52
Figura 6.7. La cantidad del calor que se pierde se vuelve a recuperar.	55

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Resultados en el experimento de B. Thomson	23
Tabla 5.1. Serie No. 1	40
Tabla 5.2. Resultado de las 6 series de experimentos.	41
Tabla 5.3. Capacidades caloríficas	42
Tabla 5.4. La equivalencia mecánica del calor	45

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas de la enseñanza es su artificialidad, que se puede definir como la separación entre los temas de la clase y los temas de la vida. Para hacer más naturales los problemas, especialmente a nivel universitario, la historia es posiblemente el medio más adecuado para hacer la enseñanza más natural. En el caso de la presente tesis doctoral, el problema central es un problema alrededor del cual se mueven personajes reales, célebres por su contribución a la construcción de las ciencias.

Desde el punto de vista de la física, el problema es la aparente contradicción entre la hipótesis de Carnot de que el calórico no disminuye al pasar de una temperatura mayor a una temperatura menor y la hipótesis de Joule de que sí disminuye y que esta disminución es proporcional al trabajo realizado por la máquina. Desde el punto de vista pedagógico, el problema, para el profesor, es cómo hacer que un problema aparentemente artificial, se convierta en un problema vital para la consolidación de la segunda ley de la termodinámica. Nuestra hipótesis es que el enfoque histórico, en el planteamiento y solución del problema, proporciona los elementos de naturalidad, vitalidad y espontaneidad que hace de la enseñanza de la ciencia y en particular de la Física, una actividad profundamente humana y, como tal, supremamente atractiva para el estudiante.

La presente tesis doctoral parte del presupuesto, que sirve de base a la línea de investigación denominada *la elaboración de los conceptos científicos*, de que *el análisis histórico de algunos problemas científicos relevantes contribuye, de una manera significativa, a la profundización de los conceptos relacionados con tal situación.*

Un problema tiene multitud de soluciones posibles, pero la solución histórica es una, y esta solución no es el resultado de un individuo sino de una época y de los representantes más relevantes del espíritu humano. Las diferentes pedagogías se pueden agrupar en pedagogías *artificiales* y pedagogías *naturales*. Las pedagogías artificiales son fruto de la investigación y reflexión de los individuos, mientras que *la pedagogía natural* es fruto del espíritu humano en la búsqueda de respuestas a las preguntas que sugiere la naturaleza. Hay tantas pedagogías como maestros. Todas estas pedagogías son *artificiales* en la medida en que son creaciones individuales. La *mayéutica socrática*, la *experimentación aristotélica*, la *teoría del refuerzo*, etc. son pedagogías artificiales, complementarias las unas de las otras y, por esa misma razón, parcialmente válidas. Los conceptos científicos, en contraposición a los conceptos matemáticos y lógicos, no son resultado de definiciones, sino de procesos lentos, de ensayo y error, de *adecuación* y *acomodación*, según la feliz expresión de Piaget. Son ciertamente construcciones del espíritu humano, pero no en el sentido de un trabajo dirigido, de acuerdo con un plan, y a partir de elementos dados, como en la construcción de una máquina, sino más bien, en el sentido de un trabajo de *avances* y *retrocesos*. Por tanto, desde el punto de vista histórico, los conceptos no se *construyen*, sino que se *elaboran*, como se elabora un proyecto, a través de un proceso de refinamiento lento y arduo. En la investigación de la naturaleza, el espíritu ensaya y corrige, construye y destruye para volver a construir.

Es por consiguiente un error pedagógico suponer que los conceptos científicos aparecieron de un momento para otro en algunas mentes brillantes sin un largo proceso de elaboración que con frecuencia es penoso. En los libros de texto y en la enseñanza tradicional, por razones de tiempo, se omite con frecuencia el contexto histórico, dando pie a que los profesores y estudiantes crean

ingenuamente que la ciencia se reduce a la manipulación de conceptos ya hechos, y no precisamente a su comprensión y perfeccionamiento.

“La historia de la génesis de los conceptos científicos no es más que la reconstrucción de los caminos que ha seguido el espíritu en la formación de los conceptos, y en ese sentido, esta historia problemática y no simplemente anecdótica, constituye una pedagogía natural, la única que poseemos. Dentro de este contexto, la pregunta de la pedagogía no es propiamente, cómo conocemos, sino cómo hemos conocido. El cambio de perspectiva es de consecuencias decisivas. De una pedagogía filosófica o psicológica, si se prefiere, se pasa a una *pedagogía científica*, en donde lo importante no es el conocimiento como tal, sino los pasos seguidos por el espíritu en la formación del conocimiento”¹.

Como ya se mencionó, el problema central de la tesis 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.

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 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 es más que una forma de energía mecánica se pudieron unificar las dos ramas, permitiendo, por ejemplo, la pregunta de cuánto trabajo mecánico se podría realizar con el calor empleado en elevar la temperatura de cierta cantidad de agua. A partir de este momento tiene entonces sentido la pregunta acerca de la *eficacia* de un motor térmico, entendiendo por eficacia la relación entre el calor suministrado y el trabajo realizado.

¹ Reflexiones extraídas de un documento elaborado por el coordinador de la línea: *la elaboración de los conceptos científicos*. Doctor Fabio Vélez.

El segundo principio, el de la degradación de la energía, se conoce también como principio de Carnot². El Principio se puede formular de diferentes maneras, una de ellas hace expresa mención a Carnot: *Ninguna máquina térmica que funcione entre dos fuentes de temperatura puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que opera entre las mismas dos temperaturas.*

Como es de notar, la intención de la investigación no fue descubrir nuevos datos sobre un hecho histórico, sino aprovechar los datos disponibles para reconstruir el proceso mental que llevó a científicos eminentes a plantear y resolver un problema importante de la física, con el propósito de proporcionar a estudiantes y profesores un documento que ayude en la profundización en los conceptos de la termodinámica, en particular de la segunda ley.

La investigación se desarrolló en tres etapas. La primera etapa, de aproximación, se revisaron los documentos relacionados con el problema elegido: la objeción de Joule a Carnot. En la segunda etapa, de profundización, se investigaron los argumentos de cada una de las partes, teniendo el cuidado de ser lo más objetivo posible. En la tercera etapa, de consolidación, se reconstruyó la solución propuesta por Clausius, presentada en el capítulo seis. Finalmente se presenta, a manera de recapitulación, en el capítulo siete, la síntesis de las discusiones de los seis capítulos precedentes.

² Las reflexiones de Carnot se llevan a cabo dentro del modelo predominante en siglo XVIII, el modelo del calórico, donde el calor es una sustancia imponderable, indestructible, imperceptible, sutil, que pasa del cuerpo más caliente al menos caliente.

CAPITULO 1. LA PEDAGOGÍA NATURAL

Aclaración: las ideas aquí expuestas no son más que un resumen autorizado de la fundamentación teórica de la Línea de Investigación, La Elaboración de los Concepto científicos, que dirige el Dr. Fabio Vélez. Durante un semestre la Estudiante participó activamente en la discusión y apropiación de las ideas aquí expuestas, bajo la dirección del Director de Tesis.

1.1. La importancia de la historia

Es posible encontrar multitud de citas que resaltan la importancia de la historia en la enseñanza de las ciencias³, en particular, de la Física. En lo que sigue, nos atenemos a una cita del fundador de la Historia de la ciencia en el siglo XX, Pierre Duhem⁴, autor de más de 50 libros. Para Duhem⁵ el método histórico, además de legítimo, es el más seguro y provechoso:

El método legítimo, seguro y provechoso para preparar al alumno para recibir una hipótesis física es el método histórico. Remontarse a las transformaciones que sufría la materia empírica mientras la forma teórica se apuntaba por primera vez. Descubrir la larga colaboración por medio de la cual el sentido común y la lógica deductiva analizaban la materia y modelaban aquella forma hasta que una se adaptaba exactamente a la otra. Es la mejor manera, seguramente la única, de dar a quienes estudian Física una visión correcta y clara de la organización real y altamente compleja de esta ciencia. (Duhem, 1954, p. 268)

1.2. Dos tipos de pedagogías

Si entendemos por pedagogía el arte de la enseñanza, es posible distinguir entre la *pedagogía natural* y las pedagogías *artificiales*.

Las pedagogías artificiales, como su nombre lo indica, son construcciones individuales o grupales, algunas de ellas de reconocida prestancia en el mundo de la Enseñanza. El conductismo, el

³ En Europa, a final del siglo XIX, el gran físico Ernst Mach proponía un acercamiento filosófico e histórico a la enseñanza de las ciencias en la escuela. Véase "On the instructions in the Classics and the Sciences". Mach, 1985. Matthews, M (1991).

⁴ Pierre Duhem (1861-1916). Físico francés, profesor de la Universidad de Burdeos; se preocupó especialmente de la historia y de filosofía de la ciencia. En sus trabajos sobre física, se situaba en el punto de vista del *energetismo* y del formalismo matemático. En sus escritos [129] filosóficos, apoyaba el *convencionalismo* de Poincaré, el principio machista (Mach) de la economía del pensamiento; sostenía que en la historia de la ciencia sólo se produce una exclusión recíproca de teorías diversas, no una sucesión internamente articulada. La explicación unilateral y metafísica del relativismo, de la naturaleza contingente del conocimiento condujo a Duhem al idealismo y el agnosticismo (*Idealismo físico*). Obra principal: «El sistema de mundo» (1913-17; han sido publicado cinco tomos). Diccionario soviético de filosofía (1965).

⁵ Duhem. Fue posiblemente el primer psicólogo en proponer la analogía entre el desarrollo de la ciencia y el crecimiento de la comprensión individual (una visión desarrollada más tarde por Piaget en su psicología genética). Duhem era sensible a los problemas de la enseñanza científica. Decía que la tensión entre la lógica de la materia y la psicología del alumno "hace de la enseñanza de esta ciencia algo particularmente delicado". Duhem, 1954, p. 258. Matthews, M (1991).

constructivismo, el estructuralismo y sus múltiples ramificaciones tienen algo en común, a pesar de que sus postulados sean opuestos y con frecuencia contrarios: *son creaciones de un individuo o de un grupo de individuos a partir de principios psicológicos, antropológicos y sociales.*

La pedagogía natural, en cambio, no es fruto de las especulaciones de un individuo, sino del espíritu humano. Evidentemente el Espíritu humano se manifiesta a través de individuos, pero individuos que, por circunstancias afortunadas hacen historia, como la hizo Galileo, Newton o Einstein en la física, para citar un ejemplo. ¿Habrá una manera más genuina, más *impactante* para enseñar a los estudiantes el Principio de inercia en Física que a través de las divagaciones de Galileo motivadas por el conflicto entre los dos sistemas astronómicos antagónicos de Ptolomeo y Copérnico? Nosotros, sin demeritar los enfoques tradicionales, creemos que no, y en esto estamos plenamente de acuerdo con P. Duhem⁶.

En la enseñanza de la ciencia, un problema se puede afrontar de innumerables formas, todas igualmente justificadas, pero solo hay una forma de afrontar un problema *naturalmente*, a través de la reconstrucción de la discusión y solución del problema en y a través de la Historia. Pero no de una historia *anecdótica*, sino de una historia *problemática*.

1.3. Postulados

Los postulados son proposiciones que se toman como punto de partida del razonamiento y que se suponen verdaderas. Si se tuviera que justificar estas primeras proposiciones, entonces habría que recurrir a otras proposiciones que también habría que justificar y así en infinito. La consecuencia sería catastrófica, nada se puede justificar, el discurso racional sería prácticamente imposible. Se trata de un concepto genuinamente científico. Piénsese por ejemplo en los tres postulados de la mecánica de Newton o en los dos postulados de la teoría de la Relatividad. Si se acepta el concepto de pedagogía natural, en el sentido explicado, entonces es posible construir una teoría pedagógica, si se eligen algunas proposiciones que permitan el razonamiento posterior.

1.3.1. Primer postulado

El primer postulado afirma que *la historia de la ciencia en sí misma es una pedagogía de la ciencia*, que algunos autores, como Duhem⁷ y A. Koyré⁸, denominan pedagogía *natural*⁹. No se trata de ninguna manera de negar la importancia de ciertas teorías pedagógicas, respaldadas por estudios

⁶ Lo que Duhem subraya en su pensamiento es el carácter constructivo, simbólico y aproximado de las leyes científicas, y con esto afirma que las leyes no son ni verdaderas ni falsas sino que siempre son relativas a contextos históricos concretos y en cuanto a las teorías señala que no tienen una explicación en sentido metafísico, sino que la teoría física se encamina hacia una clasificación natural. Que además las teorías científicas, por sí mismas, buscan “salvar los fenómenos”. Artigas, M. (2011).

⁷ Las investigaciones acerca de los orígenes de la física llevaron a Duhem cada vez más atrás en el tiempo. Y cuando comenzó a descubrir materiales medievales inéditos, se zambulló en aquel mundo nuevo e inexplorado. El cliché estereotipado presentaba la Edad Media como una época oscurantista que, a lo más, y tal como opinaba Mach, pudo estimular tímidamente a la ciencia a través del estudio de sutilezas lógicas, que, sin embargo, se aplicaban a problemas carentes de sentido. Duhem descubrió una realidad completamente diferente. Su trabajo personal con los manuscritos medievales le llevó al convencimiento de que la Edad Media, especialmente en la Universidad de París pero también en otros centros intelectuales, fue una época en la que paulatinamente se fueron desarrollando los conceptos que permitieron el nacimiento sistemático de la ciencia moderna en el siglo XVII. Artigas, M. (2011).

⁸ Para Koyré, los hechos de la historia de la ciencia no aparecen en forma inconexa en un lugar y tiempo determinado sino que son producto del conjunto de ideas, representaciones y procedimientos propios de los agentes que intervienen en ella; por tal razón, Koyré realizaba minuciosos y meticulosos procedimientos para la recuperación de los sistemas de pensamiento propios del periodo y lugar en estudio a la vez que utilizaba ciertos recursos que le permitían no proyectar, en el ámbito estudiado, las propias ideas, creencias e intereses evitando así resultados anacrónicos y descontextualizados. Serrano, B. (2006)

⁹ James Bryant Conant, presidente de la Universidad de Harvard, físico e historiador, escribió libros muy difundidos postulando un acercamiento histórico a la pedagogía científica. Matthews, M (1991).

empíricos serios. El condicionamiento operante de Skinner, el conductismo de J.B Watson y G. L. Hull, la teoría del campo de la Gestalt de Wertheimer y Koehler, la teoría del campo cognoscitivo de Kurt Lewin y de Tolman son ejemplos de pedagogías *artificiales* en la medida que son fruto de la especulación de uno o varios científicos sociales interesados en los mecanismos del aprendizaje. Pero además de las pedagogías artificiales, hay una pedagogía que no es fruto de un individuo sino del espíritu humano en su marcha hacia la comprensión del mundo natural y humano, marcha lenta, llena de logros y altibajos, pero finalmente *exitosa*¹⁰. La historia es la maestra de la vida decían los antiguos. El fundamento de este aforismo no es otro que la aceptación del hecho que nadie conoce mejor el camino para ir de un sitio a otro que quien lo ha recorrido.

Las ciencias naturales, como las ciencias humanas, tienen una larga historia, y esta historia no es más que la historia de los procedimientos que ha seguido el espíritu humano a través de mentes excepcionales para resolver poco a poco los problemas que surgen en su afán por comprender los fenómenos físicos. Estos procedimientos constituyen el camino más seguro, aunque no necesariamente el más rápido, para llegar a la meta. No se trata por consiguiente de una historia *anecdótica*, sino de una historia *problemática*, centrada en la solución de determinados problemas.

Por otro lado, negar la importancia de la historia como una pedagogía en sí misma, colocaría al margen de la misma ciencia a un sin número de investigadores y centros de investigación, dedicados exclusivamente al estudio de la historia de la ciencia, entre los cuales se pueden mencionar los centros de Investigación de Estocolmo, Filadelfia, Chicago y París (Centre Alexandre Koyré), entre otros, así como los departamentos de historia de las ciencias de las Universidades de Harvard, Pittsburg, Wisconsin, California e Indiana, entre otras, e incluso el mismo centro para la utilización de la ciencia en la enseñanza de la física National Science Foundation.

1.3.2. Segundo postulado

El segundo postulado, conectado directamente con el primero, afirma que hay dos tipos de problemas, los *naturales* y los *artificiales* y que desde el punto de vista de la enseñanza, son preferibles los primeros a los segundos. No es nuestra tarea demostrar que el aprendizaje que se lleva a través de la solución de problemas naturales es superior a la que se lleva a través de problemas artificiales, especialmente cuando se trata de la enseñanza de la ciencia. En este contexto es suficiente recurrir a la autoridad John Dewey¹¹ cuya crítica a la falta de conexión de la educación tradicional y la *experiencia* es bien conocida.

Un problema *natural* es aquel que se formula teniendo en cuenta el contexto histórico, en contraposición a los problemas artificiales que prescinden de dicho contexto. Cuando en la enseñanza de la termodinámica, por ejemplo se pregunta a los estudiantes por qué un gas al expandirse se enfría, sin ninguna alusión histórica al modelo que justifica la respuesta, la intención de la pregunta no es otra que evaluar la comprensión de las explicaciones dadas previamente. Cuando, en cambio, se pregunta qué solución se daba de acuerdo con el modelo del calórico en el siglo XVIII al problema del enfriamiento del gas cuando se expandía y qué solución se da hoy en día gracias al descubrimiento de Joule de la equivalencia mecánica del calor, la intención no es tanto evaluar la explicación del

¹⁰ Quien conozca solo un punto de vista o una forma de ver las cosas no cree que otro haya estado nunca en su lugar ni que otro venga después; ni duda ni hace pruebas. Mach (1911, p.17).

¹¹ John Dewey fue el filósofo norteamericano más importante de la primera mitad del siglo XX. Su carrera abarcó la vida de tres generaciones y su voz pudo oírse a medio de las controversias culturales de los Estados Unidos (y del extranjero) desde el decenio de 1890 hasta su muerte en 1952, cuando tenía casi 92 años. A lo largo de su extensa carrera, Dewey desarrolló una filosofía que abogaba por la unidad entre la teoría y la práctica, unidad que ejemplificaba en su propio quehacer de intelectual y militante político. Su pensamiento se basaba en la convicción moral de que “democracia es libertad”, por lo que dedicó toda su vida a elaborar una argumentación filosófica para fundamentar esta convicción y a militar para llevarla a la práctica (Dewey, 1892, pág. 8). El compromiso de Dewey con la democracia y con la integración de teoría y práctica fue sobre todo evidente en su carrera de reformador de la educación. El texto se publicó originalmente en *Perspectivas: revista trimestral de educación comparada* (París, UNESCO: Oficina Internacional de Educación), vol. XXIII, 1993.

profesor, como medir el grado de apropiación de una solución que no es de un individuo, o del profesor, sino del espíritu científico como tal.

1.3.3. Tercer postulado

El tercer postulado afirma que *la comprensión admite multitud de niveles* desde el más superficial al más profundo, *y que nadie sabe en qué nivel de comprensión se encuentra* hasta tanto no descienda a un nivel más profundo¹². Quienes están dedicados a la actividad intelectual en las matemáticas, en las ciencias naturales y humanas, reconocerán que uno de los grandes placeres que proporciona la actividad es la del sentimiento de progreso en claridad en los conceptos, a causa de las relaciones que se establecen con nuevos conceptos.

Esta *profundización* se lleva a cabo a través de la solución de problemas. Ahora bien, como se mostró en la explicación del segundo postulado, hay dos casos de problemas, los *artificiales*, que en rigor se deberían llamar *ejercicios* en lugar de problemas, y los *naturales*. Si, como lo suponemos, los problemas naturales son superiores a los artificiales en los procesos de enseñanza y aprendizaje, entonces se debe aceptar que la profundización de los conceptos a través de la historia problemática es superior a la profundización a través de los ejercicios propuestos por el profesor o los libros de texto.

1.3.4. Cuarto postulado

Los conceptos no se transmiten como se transmite, por ejemplo, una información. Los conceptos se *elaboran*, tanto, por parte de quien los aprende, como de quien los enseña¹³. El aprendizaje y la enseñanza son procesos de *refinamiento* de los conceptos, desde el nivel más superficial al más profundo. Entre la elaboración y la construcción hay una diferencia de matiz que es importante resaltar, la construcción hace referencia a las estructuras o esquemas generales, la elaboración, además, a la consolidación y ornato de esas estructuras.

Los conceptos son sistemas de operaciones formales que tienen una génesis perfectamente definida a partir de los esquemas más primitivos de las acciones reflejas. Estos sistemas de operaciones tienen las características de los grupos matemático y de las clases lógicas (identidad, asociatividad, transitividad, reversibilidad, etc.). Los conceptos¹⁴ se construyen según determinadas leyes, de acuerdo con las investigaciones de Piaget y de sus colaboradores dentro de la psicología de la inteligencia.

Dentro de este contexto abundan los estudios estructuralistas sobre la génesis del número, sobre la formación de los conceptos de masa, peso, velocidad, tiempo, etc. Pero el constructivismo piagetiano no va más allá de la constatación de estas leyes de construcción, que dependen en último término de las etapas de maduración psico-biológicas del individuo. La psicología genética se ocupa por lo tanto de la construcción espontánea de los conceptos, no de su elaboración intencional con vistas a una explicación. Se trata por tanto de dos aproximaciones diferentes y no excluyentes: La

¹² Una historia bien enseñada puede hacerlo, Albert Einstein señaló que fue la lectura del trabajo histórico de Ernst Mach, *The Science Of Mechanics* (la ciencia de la mecánica) la que le liberó la mente para contemplar nuevos marcos interpretativos en Mecánica. De su propia educación Einstein dijo:

“Tras aprobar el examen final y durante un año entero me producía desagrado la consideración de cualquier problema científico. Es más, es casi un milagro que los métodos modernos de instrucción no hayan estrangulado la sagrada curiosidad de hacerse preguntas”. Schillp (1951, p. 17). Matthews, M (1991).

¹³ El desarrollo histórico es un acercamiento lógico. El lento progreso de los primeros siglos se debía a la falta de conocimiento, técnica pobre y ataques sin método. Pero esas son precisamente las dificultades de quien se inicia en la química. Hay un lazo de comprensión entre el principiante y el pionero. Hogg, (1983).

¹⁴ El concepto ha de ser diferenciado en forma clara de la imagen sensible. Esta última representa los atributos físicos que son sensibles, individuales y materiales mientras que el concepto significa la realidad inteligible, universal e inmaterial de esas cosas sensibles. Barragán, A. (1995).

aproximación psicológica de los estructuralistas y la aproximación “fenomenológica” que se propone en esta Línea de Investigación y cuya justificación se hará a lo largo de esta exposición.

Para la escuela conductista o skinneriana, el concepto no es más que una conducta o comportamiento determinado. El individuo que resuelve exitosamente problemas que implican el concepto de aceleración tiene dicho concepto y este concepto se perfecciona en cada nueva solución exitosa. La elaboración interna se lleva a cabo a través de la ejecución externa de acciones apropiadas. La elaboración externa o magisterial se lleva a cabo a través de la programación de la secuencia de acciones y de su correspondiente refuerzo. Las aproximaciones de Skinner y de Piaget son en último término aproximaciones psicológicas, desde fuera de la actividad científica como tal, y no aproximaciones interiores a dicha actividad. Evidentemente no es lo mismo resolver un problema de matemáticas que reconstruir los pasos que uno mismo ha llevado a cabo en la solución, ambas son actividades matemáticas, la primera directa y la segunda refleja.

1.4. Tipos de historia

Como ya se ha planteado, el fundamento de la pedagogía natural es la historia, sin embargo, al hablar de historia es posible encontrar o determinar diferentes tipos de historia.

La historia de la ciencia es un término muy amplio que encierra diferentes intenciones que conviene aclarar. Conscientes del riesgo de simplificación propio de toda clasificación, distinguimos entre investigaciones histórico-filosóficas e investigaciones histórico-pedagógicas, dependiendo de la intención o preocupación principal del autor. Si la preocupación es el fenómeno científico, entonces la investigación histórica que sirve de base es una historia filosófica de la ciencia o si prefiere, una filosofía de la ciencia a partir de una investigación histórica. Las dos expresiones son equivalentes.

Si la preocupación del investigador no es la filosofía o sociología del fenómeno científico, sino la enseñanza a partir de la historia, no ya de la ciencia en general, sino de una actividad científica en particular, como por ejemplo, el problema físico de la colisión de dos cuerpos, en cuya solución trabajaron notables científicos del siglo XVII y XVIII, y cuya solución definitiva se debe a C. Huygens, entonces ese estudio histórico merece el calificativo de pedagógico.

Para aclarar y fundamentar la clasificación propuesta, proponemos algunos ejemplos, recurriendo a algunos de los más notables historiadores de la ciencia, sin la pretensión de ser exhaustivos. Es evidente, además, que las delimitaciones no son absolutas y que por lo tanto de una historia filosófica se pueden obtener elementos pedagógicos y viceversa, de una historia pedagógica se pueden obtener elementos filosóficos. La diferencia no está en los detalles sino en la preocupación principal del autor.

1.4.1. Historia filosófica

Dentro de este grupo, que por cierto es el más numeroso, son muchos los autores que se pueden poner como ejemplo de lo que consideramos como historia filosófica. Elegimos a dos autores: Pierre Duhem (1861-1916) y Thomas Kuhn (1922-1966).

P. Duhem, físico y buen matemático, escribió más de 50 libros y varios cientos de artículos. En su producción académica hay que distinguir dos períodos, el primer que va hasta 1904 se puede catalogar como su período filosófico y el segundo, a partir de 1904 hasta su muerte, se puede catalogar como su período histórico. Sin embargo, consideramos que su preocupación fundamental fue eminentemente filosófica y por eso lo incluimos dentro de este grupo. A la primera etapa de su producción científica pertenecen varios volúmenes con el título de *The Aim and Structure of Physical Theory* y *To save the Phenomena*. A la segunda etapa, dos obras magistrales *Etudes sur Leonard de Vinci* y *Le systeme du monde*.

El interés filosófico de P. Duhem se manifiesta si se tiene en cuenta los temas tratados continuamente en sus libros, especialmente en los artículos. Estos temas tenían que ver con la relación

de la ciencia con la metafísica, de las teorías físicas con el experimento, de la *falsabilidad* o no de las hipótesis científicas, de la posibilidad o no de los llamados experimentos cruciales, de la utilización de modelos mecánicos en la explicación, etc. Aunque no es el momento de entrar en detalles, conviene exponer con un poco más de detenimiento la tesis de la *no-falsabilidad* de las hipótesis científicas.

P. Duhem sostiene que las hipótesis científicas están tan íntimamente conectadas con otras hipótesis, dentro de una teoría, que es imposible o al menos quimérico pretender someter al juicio de la experimentación una hipótesis *aislada*, pues siempre existe el recurso de modificar las hipótesis secundarias para explicar el resultado adverso de la experimentación. Esta tesis es consecuencia de una tesis lógicamente anterior, la *no-separabilidad* de las hipótesis científicas: las hipótesis, dentro de una teoría, no están aisladas, sino íntimamente conexas o intrincadas.

El segundo autor, representante de este grupo es Thomas Kuhn, autor de la *estructura de las revoluciones científicas*, publicado en 1962, que causó un gran revuelo no solo entre los expertos sino entre aficionados a la filosofía de la ciencia. La tesis de T. Kuhn es notablemente simple: la historia de la ciencia es una historia de *rupturas*. La teoría vigente es reemplazada por una nueva teoría que, en sentido estricto, nada tiene que ver con la anterior. La historia de la ciencia, por lo tanto, no es continua, sino discreta.

Un ejemplo clásico es el reemplazo de la física newtoniana por la física relativista de Einstein, donde los conceptos de espacio y tiempo absolutos son reemplazados por tiempos y espacios relativos. Dentro de esta filosofía de la ciencia toman especial relevancia ciertos términos que anteriormente no tenían ninguna importancia. Tales términos son *crisis*, *paradigma*, *física normal*, etc. Como nuestro propósito no es una discusión extensa sobre las ideas de T. Kuhn, lo anterior es suficiente para justificar la inclusión de su obra dentro del grupo de historias filosóficas en oposición a las historias pedagógicas que tratamos a continuación.

1.4.2. Historia pedagógica

A este grupo, más reducido que el anterior, pertenece, a nuestra manera de ver Alexander Koyré (1892-1964). Junto con P. Duhem y George Sarton¹⁵ en Norte América, se le considera uno de los fundadores de la Historia de la Ciencia como disciplina. Su obra más representativa es *Estudios Galileanos*, publicados en 1940. En el año 1952 es nombrado miembro de La Academia Internacional de Historia de la Ciencia de Francia.

La preocupación de A. Koyré no es propiamente el fenómeno de la ciencia, sino la *reconstrucción histórica* del razonamiento que llevó, por ejemplo, a Galileo a sus grandes descubrimientos científicos: la caída libre, el principio de inercia, el movimiento de proyectiles, etc. A. Koyré no está preocupado por temas como la falseabilidad o no falseabilidad de las hipótesis científicas, que tanto tiempo y esfuerzo le costaron a P. Duhem.

Otros de sus libros, de los cuales se pueden extraer importantes elementos para una reconstrucción del razonamiento científico son *Del mundo cerrado al mundo infinito y la revolución astronómica*, publicados algunos años antes de su muerte en París. En definitiva, si se quiere entender lo que significamos con historia pedagógica, es suficiente considerar como ejemplo destacado los *Estudios Galileanos* de A. Koyré.

Para terminar, dentro de esta línea de pensamiento, mencionamos, sin entrar en más detalles algunos otros autores que aportan elementos importantes a una *pedagogía natural*, como la hemos definido anteriormente. Tales son, por ejemplo, D'abro en *The Rise of the New Physics*; H. A. Klein

¹⁵ *George Alfred Leon Sarton* (Gante 31-8-1884 — Cambridge, Massachusetts, 1956), químico y matemático belga, emigrado a los Estados Unidos, es considerado el fundador de la historia de la ciencia como disciplina académica. Garfield, E (2006).

en *The Science of Measurement*; R. Dugas, *A History of Mechanics*; Bernard Cohenen *Franklin and Newton, etc.*

1.5. Conclusión

La historia problemática de la ciencia y de la Física en particular es, desde el punto de vista de la Línea de Investigación *La Elaboración de los conceptos Científicos*, un método pedagógico supremamente valioso, no solamente para transmitir la *materia* de conocimiento, sino su *espíritu*, que es el espíritu de la curiosidad y de la sorpresa.

CAPITULO 2. LA MÁQUINA DE VAPOR, J. WATT

Tan pronto se realizó el sorprendente experimento de los hemisferios de Magdeburgo por Otto de Guericke, algunas mentes curiosas se preguntaron si se podría aprovechar la inmensa fuerza del vacío para construir una máquina que hiciera el trabajo, no de uno, sino de cientos de obreros. Una de esas mentes curiosas fue un ingeniero inglés en el siglo XVII, poco conocido, pero de gran ingenio y resolución. *La máquina atmosférica* de Newcomen utiliza dos misteriosas fuerzas de la naturaleza, sin ninguna semejanza aparente, el vacío y el calor. Desde el punto de vista de la ingeniería, la máquina no carece de elegancia, pero adolece de algunos defectos, simples en apariencia, pero de gran complejidad. Sin embargo, otro ingeniero genial, James Watt, fue el gran transformador de la incipiente máquina de Newcomen en la máquina de vapor moderna que da lugar a la gran revolución industrial del siglo XVIII en Inglaterra y en el resto del mundo.

2.1. El poder del vacío

En el año de 1654, en la ciudad de Magdeburgo, Otto Von Guericke¹⁶, científico alemán, realizó un experimento al aire libre que llenó de asombro a los presentes, entre los cuales se encontraban profesores de la universidad y algunos científicos venidos de otras ciudades. Mostró al público dos hemisferios de bronce de unos cincuenta centímetros de diámetro, separados. Los ajustó superficialmente de tal manera que podían ser separados a voluntad sin ningún esfuerzo. A continuación extrajo el aire de la esfera por medio de una bomba neumática de su invención¹⁷, con la ayuda de sus colaboradores. Después de explicar que había hecho el vacío dentro de la esfera, invitó a los presentes a separar los hemisferios. Cuenta la historia que 8 caballos, de lado y lado, no pudieron separarlos. ¿A qué se debía esta poderosa fuerza del vacío? En realidad, explicó Von Guericke, la fuerza no se debía al vacío sino a la presión atmosférica, como habían descubierto Torricelli¹⁸ y Pascal¹⁹.

En otro experimento utilizó un cilindro de grandes dimensiones. Al hacer el vacío, el émbolo descendía con fuerza a causa de la presión atmosférica. Para impedir que el émbolo descendiera se necesitaba la fuerza conjunta de más de 50 hombres; así demostró lo poderosa que es la fuerza de la presión atmosférica. A partir de este experimento y de otros semejantes surgió más tarde la idea de

¹⁶ Von Guericke estudió leyes, matemáticas y realizó también estudios de carácter técnico.

¹⁷ Invención que realizó en el año 1654.

¹⁸ Quizás, el experimento más significativo, fue el llevado a cabo por el italiano E. Torricelli (1644). Quién repitió el ensayo de Gasparo Berti (1640) en un tubo más corto y con mercurio en vez de agua, comprobando que el nivel de mercurio en el tubo descendía y siempre llegaba a la misma altura 760 mm., dejando un espacio vacío arriba sin mercurio. Torricelli declaró que su experimento probaba dos conceptos fundamentales: que la naturaleza no aborrece el vacío, y que el aire pesa.

¹⁹La aceptación del concepto de vacío se dio cuando en 1648, Blas Pascal, cuñado de Torricelli, subió un barómetro con 4 kg de mercurio a una montaña a 1000 m sobre el nivel del mar. Sorprendentemente, cuando el barómetro estaba en la cima, el nivel de la columna de Hg en el tubo era mucho menor que al pie de la montaña. Torricelli aseguraba la existencia de la presión de aire y decía que debido a ella el nivel de Hg en el recipiente no descendía, lo cual hacía que la altura de la columna de mercurio permaneciera constante dentro del tubo. Así pues, al disminuir la presión atmosférica del aire en la cima de la montaña, el nivel de Hg en el recipiente desciende.

utilizar la fuerza del vacío para realizar trabajo mecánico, como de hecho sucedió con las primeras máquinas de vapor construidas por Papín, Savery, Newcomen y Watt.

2.2. La máquina de Papín

Treinta años después de los sorprendentes experimentos del profesor de la universidad de Magdeburgo, Otto Von Guericke, un ingeniero francés, Denis Papín, logró construir el primer motor de la historia, aprovechando la fuerza del vacío, como se decía en ese entonces. 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 (considere la figura 2.1), todos los 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 construidos 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 primero²⁰.

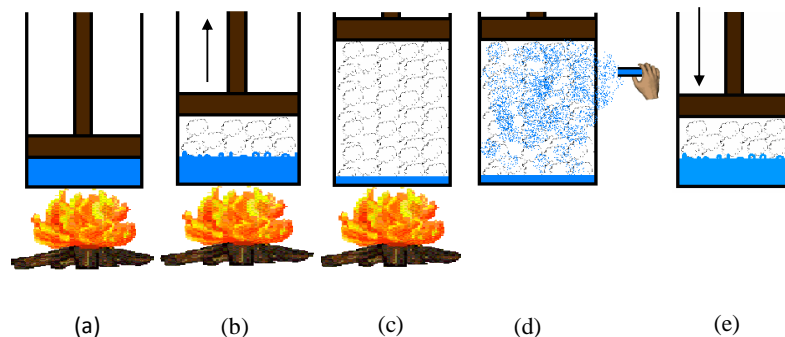


Figura 2.1. Motor de Papín.

Donde caldera, motor y condensador forman una sola unidad. El fuego calienta el agua y el vapor mueve el émbolo. En figura 2.1(a), la caldera entra en contacto con el fuego. En la figura 2.1(b), se produce vapor de agua, el cual empuja el émbolo hacia arriba. En la figura 2.1(c), el émbolo se encuentra al final de su recorrido. La figura 2.1(d), muestra el proceso de condensación, el cual se da al rociar agua sobre el cilindro, produciéndose un vacío parcial en el interior del cilindro, provocando la caída del émbolo. Y por último en la figura 2.1 (e), muestra el movimiento descendente del émbolo, una vez este llega nuevamente sobre el agua, se repite el proceso en un nuevo ciclo.

Después de esta gran sugerencia de Papín, y su aplicación en el primer motor conocido en la historia. Thomas Savery, ingeniero militar, patentó en 1698, la primera máquina para realizar trabajo en las minas de carbón de Inglaterra, empleando la sugerencia de Papín acerca del enfriamiento del vapor, e incorporando su motor en la primera máquina de vapor que se conoce en la historia. En esta época, las máquinas de vapor cumplían una función primordial en las minas de carbón, ya que los mineros encontraban dificultades para extraer el agua que se depositaba en el fondo de las minas. Pero esta máquina rápidamente presentó problemas, ya que solo extraía agua de pozos de poca profundidad. Savery intentó hacer varios ajustes a su máquina, como aumentar la presión en el interior de la caldera, pero estas explotaban a causa de la presión excesiva. Lamentablemente por los recursos tecnológicos de su época le fue imposible²¹. Debido a esta dificultad, la máquina de Savery no fue

²⁰ Herón contaba con una gran genialidad, en su libro describe unos 80 experimentos distintos realizados utilizando el vapor de agua.

²¹ El lector puede profundizar sobre esta máquina y otras en: A Descriptive History of the Steam Engine. Stanford University, o en A History of the Growth of the Steam –Engine. Trurston Robert.

empleada por mucho tiempo, a pesar que realizaba del trabajo de muchos obreros. Como no daba solución adecuada inconveniente de las aguas subterráneas en las minas, fue rápidamente desechada.

2.3. La máquina de Newcomen

Thomas Newcomen, herrero e inventor, nació en Darthmouth, Devon, Inglaterra. Su profesión de herrero, y su ingenio por construir mecanismos lo llevaron a estudiar la máquina de Savery. Comprendió desde un principio que el problema de seguridad ocasionado por el aumento de la presión en la caldera, se solucionada en parte mejorando los materiales que se empleaban en su construcción, sin embargo no tardó en determinar que el aumento de presión no solucionaba el problema de la extracción del agua a partir de cierta profundidad: era necesario modificar la máquina de Savery.

Entonces Newcomen comprendió que lo mejor para extraer agua de las minas, era ubicar una bomba de agua mecánica, en el interior del pozo, transmitiendo el movimiento por medio de un balancín y un contrapeso, que se conectaba con el émbolo del cilindro de expansión y condensación, y el émbolo de la bomba de succión con varillas rígidas. Agregó además diferentes válvulas para controlar la salida y entrada de vapor. La caldera, el cilindro de admisión y condensación y el depósito de agua, se conectan de manera que se garantice el aislamiento y funcionamiento de la máquina a presión atmosférica. A partir de estas modificaciones, se solucionó el problema de la extracción de aguas subterráneas en las minas de Cornwall, y por eso a esta máquina se la llamó “El amigo del Minero”, la cual fue utilizada aproximadamente durante un siglo.

Considere la figura 2.2.

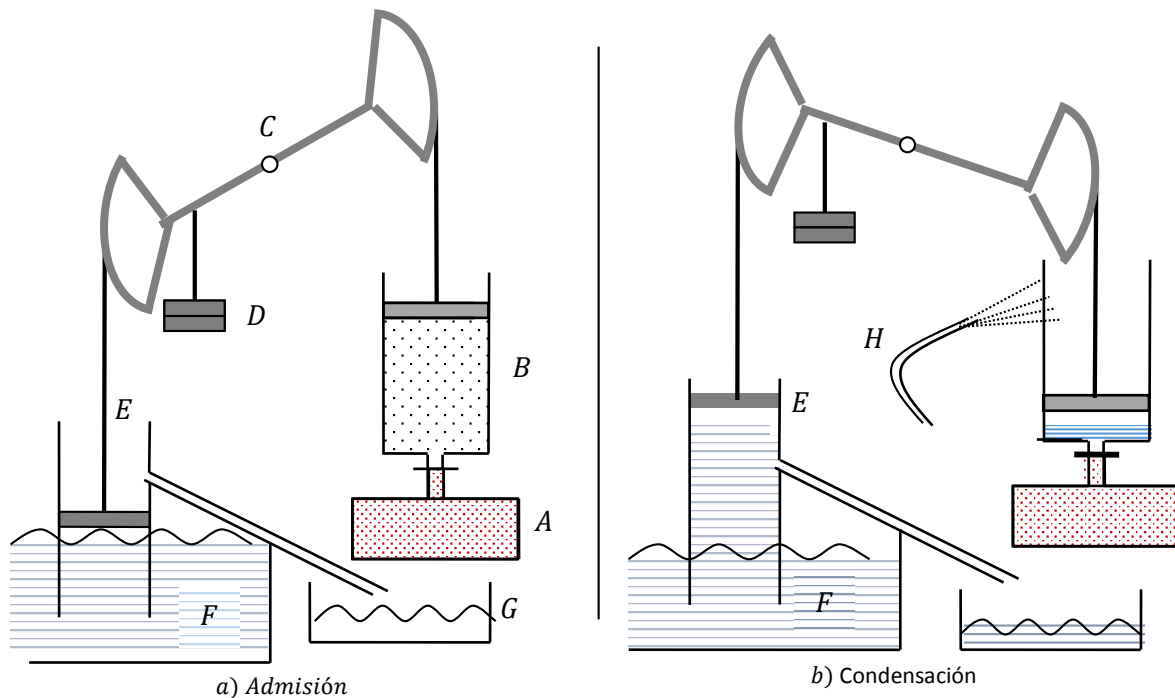


Figura 2.2. La máquina atmosférica de Newcomen.

A: caldera; B: cilindro de admisión y condensación; C: balancín; D: contrapeso; E: cilindro de succión; F: pozo de agua; G: depósito de agua

La figura 2.2 muestra las dos fases de funcionamiento de la máquina de Newcomen, en la primera de éstas, la fase de admisión, el vapor de agua que se produce en la caldera (A) entra en el cilindro de expansión y condensación (B), haciendo que el balancín (C) se incline hacia la izquierda a causa del contrapeso (D). En la segunda fase, la de condensación, el cilindro se enfría por medio de un chorro de agua (H), entonces el vapor de agua se condensa, y se hace un vacío parcial en el cilindro, por tanto, el émbolo desciende con fuerza a causa de la presión atmosférica exterior, el balancín se mueve hacia la derecha, el émbolo de cilindro de succión (E) asciende creando un vacío parcial en el cilindro, y el agua que se encuentra en la mina (F) sube en el cilindro a causa de la presión atmosférica exterior, finalmente el agua asciende al depósito G. El ciclo que se ha descrito se repite una y otra vez.

A pesar de que a mediados del siglo XVIII la máquina de Newcomen era utilizada en gran número por lo mineros de Inglaterra y hasta fuera exportada a varios países europeos, su alto costo, en términos de rendimiento, dificultó su aplicación en otras actividades industriales. El desarrollo mecánico de Newcomen es considerado fundamentalmente empírico, ya que fue fruto de su habilidad, experiencia y conocimiento adquirido mientras fabricaba componentes de la máquina de Savery. Dentro de los innumerables intentos por mejorar la productividad de la máquina, se ensayó aumentar la presión para aumentar la cantidad de agua extraída, sin embargo, la diferencia con las otras máquinas, de menor presión, no justificaba la enorme cantidad de carbón consumido.

2.4. James Watt

James Watt ingeniero escocés, nació en Guenock en 1736. Siendo tan solo un niño trabajó con su padre en su taller de construcción, luego de varios años de instrucción en Londres bajo el acompañamiento de John Morgan, regresa a Glasgow siendo un instrumentador ágil y entrenado. A la edad de 20 años fue contratado por la Universidad de Glasgow.

En el año de 1763, el Departamento de Tecnología le solicitó a Watt reparar un modelo de la máquina de Newcomen, empleada para las explicaciones sobre el empleo del calor en la realización de trabajo mecánico en la universidad de Glasgow. Watt no requirió mucho tiempo para detectar las fallas en el funcionamiento de la máquina. Una vez, puesta en funcionamiento, se sorprendió de la gran cantidad de vapor que la pequeña máquina consumía, en relación con la cantidad de vapor producida en la caldera. Watt supone que la poca eficiencia de la máquina se debe al hecho de que la admisión y la condensación del vapor de agua se llevan a cabo en el mismo cilindro. Cuando el vapor entra por segunda vez al cilindro, éste se encuentra a una temperatura inferior a la del vapor de la caldera a causa del enfriamiento producido en el proceso de condensación, rociando agua sobre el cilindro, como se representa en la parte b) de la figura 2.2. Sin embargo, esta hipótesis no fue fácil de probar, para hacerlo requirió de la colaboración de Joseph Black, posiblemente la máxima autoridad en Europa sobre los fenómenos relacionados con el calor. Watt logró determinar que se necesitaba la producción de 165 litros de vapor a una atmósfera de presión para hacer que el émbolo hiciera una carrera simple en un cilindro de 21 litros de capacidad. De aquí se seguía, por un razonamiento sencillo, que el resto del vapor, es decir, 144 litros se condensaban al entrar en contacto con el interior del cilindro a causa de la menor temperatura de éste, menor temperatura debida al enfriamiento del cilindro con un chorro de agua inmediatamente antes del proceso de admisión, como se muestra en la parte b) de la figura 2.2. De aquí se sigue que el rendimiento de la máquina de Newcomen era supremamente bajo, de aproximadamente el 13%, el resto, el 87% se desperdiciaba en forma de energía calórica.

2.4.1. La solución de J. Watt

La solución que Watt encontró para disminuir el desperdicio de vapor consistió en buscar mecanismo que garantizaran que el cilindro siempre estuviese tan caliente como el vapor, es decir, que la temperatura permaneciera constante, y así, cada vez que ingresara el vapor, no se condensara

inmediatamente. Inicialmente pensó en la posibilidad de construir cilindros con materiales no conductores, como por ejemplo, la madera; pero fue prácticamente imposible. Entonces retorno al cilindro metálico, cubriéndolo con una chaqueta de vapor, alimentada con vapor directamente desde la caldera, y envuelta en su totalidad con un material aislante al calor.

El beneficio de la chaqueta de vapor era muy discutible. La solución definitiva consistió en condensar el vapor en una cámara separada (el condensador), como se muestra en la figura 2.3.

Cuando el émbolo llega al extremo de su recorrido, se abre la válvula C, el vapor pasa al condensador D, el condensador se enfría por medio de un chorro de agua, al condensarse el vapor se genera un vacío que succiona el vapor del cilindro haciendo que descienda con fuerza el émbolo a causa de la presión atmosférica exterior. En el siguiente ciclo, después de cerrar la válvula C y abrir la válvula E, de admisión, el cilindro se encuentra a la misma temperatura del vapor. De esta manera se evita que el 87% del vapor admitido se licúe, con el consiguiente desperdicio de energía térmica.

La separación del proceso de admisión y de condensación se muestra en la figura 2.3.

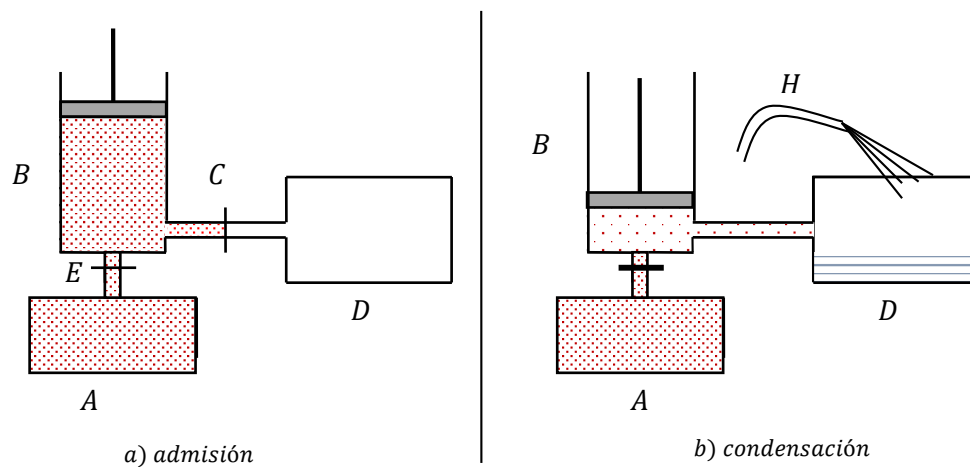


Figura 2.3. La innovación de Watt a la máquina de Newcomen.

A: caldera; E: válvula de admisión; B: cilindro de expansión y compresión; C: válvula de expulsión; D: condensador; H: manguera

La figura 2.3 muestra el funcionamiento de la máquina de Newcomen con la innovación de Watt, en la fase de admisión (a) el vapor de agua que se produce en la caldera (A) entra al cilindro de expansión (B), haciendo que el émbolo ascienda, una vez termina el recorrido del pistón, la válvula (C) se abre permitiéndose el paso del vapor al cilindro de condensación (D). En la segunda fase la de condensación, el cilindro de condensación se enfría por medio del chorro de agua (H), entonces el vapor de agua se condensa. El ciclo descrito se repite una y otra vez.

En el modelo de Newcomen, la expansión y la condensación se llevan a cabo en el mismo cilindro; en el modelo de Watt, la condensación se lleva a cabo en otro cilindro, de manera que el cilindro de expansión y compresión conserva la temperatura del vapor en cada ciclo, lo que no sucedía en el modelo de Newcomen. Con esta innovación se evita la pérdida de calor que supone el calentamiento del cilindro, enfriado por medio de agua, a la temperatura del vapor. La economía de calor es notable. Esta sencilla pero genial idea hizo más eficaz y efectiva la máquina de vapor que cuando la admisión y la condensación se llevaban a cabo en el mismo cilindro. El recurso de condensar el vapor en una cámara aparte hizo posible la moderna y eficiente máquina de vapor. A partir de Watt se consideran la caldera y el condensador como dos elementos esenciales, no solamente en la máquina de vapor sino en cualquier máquina térmica.

2.4.2. Otras innovaciones

La siguiente innovación fue el incremento de la presión por encima de la presión atmosférica, de tal manera que así como el vacío empuja el émbolo en un sentido, el vapor lo empuje en el sentido contrario. De esta manera, el émbolo realiza trabajo tanto en la admisión como en la expulsión aumentando la potencia de la máquina.

Watt también mostró que la presión del vapor se podía aumentar de tal manera que se podía prescindir del condensador, descargando el vapor directamente a la atmósfera; sin embargo nunca hizo uso de esta idea, y continuó fiel a su innovación de llevar a cabo los procesos en cámaras separadas. Todos estos mejoramientos y algunos otros fueron relacionados en su primera patente obtenida en 1769. En 1782 recibió su segunda patente, en la cual aparecen dos nuevas innovaciones. La primera de ellas, el cilindro de doble acción, en el cual el vapor es admitido alternadamente a ambos lados del émbolo, así cuando ingresa vapor por un lado del émbolo, por el otro lado está siendo expulsado, duplicándose la capacidad de la máquina, puesto que se realiza trabajo en ambas direcciones. Para esta época, el vapor se admitía en el cilindro de expansión a lo largo de todo el recorrido de admisión del émbolo, cuando la válvula de escape se abre al final del recorrido, el cilindro de expansión aún admite vapor a la presión de la caldera, por tanto, el vapor es llevado con gran fuerza y violencia al condensador, cayendo bruscamente la presión del vapor, puesto que la presión en la caldera es mucho mayor que la del condensador. Esta violenta expulsión del vapor desde el cilindro de expansión al condensador le indicó a Watt que el vapor aún contiene una considerable cantidad de potencia motriz que se podría utilizar si la admisión no se hace durante todo el trayecto de desplazamiento de émbolo. Watt encontró que esta cantidad de potencia motriz se podría aprovechar, admitiendo en el cilindro de expansión solo una porción de vapor producido en la caldera, de manera que el vapor se expanda con una disminución gradual de la presión. Cuando la válvula de escape se abre, la presión al interior del cilindro es muy cercana a la del condensador, y toda la potencia del vapor ha sido bien utilizada, excepto por una pequeña cantidad que es necesario liberar para que el vapor salga rápidamente. Esta innovación reduce la capacidad de la máquina, debido a que la presión media del vapor en el cilindro de expansión es menor que la presión de la caldera. Entonces, si solo se admite $\frac{1}{4}$ del vapor que ingresaba al cilindro de expansión, el trabajo obtenido se reduce a la mitad; sin embargo, solo ha sido empleado $\frac{1}{4}$ del vapor que podría haber entrado al cilindro, por lo tanto la economía se duplica.

Con estas innovaciones, la máquina de Watt es 9 veces más económica que la máquina de Newcomen.

2.5. Conclusión

Desde el punto de vista teórico, y dentro del contexto de la presente investigación, las innovaciones de Watt prepararon el terreno para que S. Carnot planteara por primera vez en la historia de la ciencia el problema de la eficiencia de la máquina térmica, entendiendo por máquina térmica todo dispositivo que realiza trabajo por intermedio del calor. Watt tiene el mérito histórico de haber mostrado la necesidad de dos focos, uno caliente, la caldera y otro frío, el condensador. Carnot supone que el trabajo se debe precisamente a la caída del calor entre estos dos focos, el caliente y el frío, de una manera semejante a como el trabajo generado por un molino de agua se debe a la caída del agua de la represa al estanque. Partiendo de esta hipótesis demuestra que el trabajo realizado es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos focos, preparando el terreno para la posterior formulación de la segunda ley de la termodinámica.

CAPITULO 3. EL CALOR COMO SUSTANCIA Y EL CALOR COMO VIBRACIÓN

Aunque Carnot no se declara explícitamente partidario de la hipótesis del calor como sustancia, es evidente que esta teoría influyó de una manera decisiva en el empleo del molino como modelo mental de la máquina térmica. Así como el agua al caer mueve la rueda haciendo que ésta realice cierto trabajo, así el calórico, al caer de la caldera al condensador, mueve la máquina térmica haciendo que ésta realice trabajo. Por lo tanto, en la mente de Carnot²², el calor es un fluido como el agua: una sustancia material, invisible, imponderable, indestructible, pero al fin y al cabo una sustancia que, como tal, recibe el nombre de calórico. Por su parte, Joule simpatiza más con la teoría del calor como energía cinética, una especie de vibración, como sostienen los grandes científicos ingleses, entre los que se cuentan Newton, R. Boyle²³, J. Locke²⁴, etc., en oposición a la mayor parte de los científicos del continente europeo, entre los que descuella el gran químico Lavoisier²⁵.

Como el problema sobre el que versa la presente investigación es la solución al conflicto entre dos de los más notables ingenieros del siglo XVIII, Sadi Carnot y J. Joule, acerca de la máquina térmica, hemos considerado de especial importancia dedicar un breve capítulo al marco teórico donde se mueven los dos pensadores: Para Carnot, el calor es una sustancia, para Joule, el Calor es vibración, energía.

3.1. El calor como sustancia

La teoría del calórico fundamenta su estructura conceptual en una serie de características muy particulares que son asociadas a las propiedades del calor como fluido, y permiten explicar los fenómenos relacionados con el calor que inquietaban y sorprendían a los filósofos de la naturaleza de los siglos XVII y XVIII. Hoy en día, estas explicaciones se podrían considerar y apreciar por su sencillez y su fácil comprensión si tenemos en cuenta que buena parte de ellas son producto del uso de analogías. Por ejemplo, el flujo de calor del cuerpo más caliente al más frío es más fácil de entender por analogía con el flujo de agua de una fuente a mayor altura a otra a menor altura; la temperatura, con el nivel del agua en un recipiente; la potencia motriz del calor con la caída de ciertas cantidad de

²² El paradigma del calórico estaba bien establecido cuando Carnot publicó su monumental libro *Reflexions on the Motive Power of Fire*, debido al trabajo de científicos brillantes como Lavoisier y Laplace. Sin embargo, Carnot no continuó desarrollando su trabajo después de esta publicación, y más tarde rechazó la teoría del calórico por completo, como lo deja claro en sus notas publicadas a título póstumo: "cuando una hipótesis ya no es suficiente para explicar los fenómenos, es preciso abandonarla, este es el caso con la hipótesis según la cual el calórico se considera como materia, como un fluido sutil". Carnot (1824, p.185)

²³ Para Boyle el calor es un movimiento molecular, y cuando este es generado por medios mecánicos este es un "nuevo" calor. Smith, M (1964, p. 72).

²⁴ Para Locke el calor es una agitación brusca de las partes insensibles de los objetos". Smith, M (1964, p. 72).

²⁵ Antoine Laurent Lavoisier. (Paris, 1773-París, 1794) Químico francés. Se le considera el padre de la Química moderna, pues introdujo en esta ciencia el método cuantitativo. Insistía en pesarlos y medirlos todo, como hacían los físicos desde hacía tiempo. El 8 de Mayo de 1794 fue condenado a muerte y murió en la guillotina ese mismo día. Al día siguiente de saberse la noticia, Lagrange exclamó: Ha bastado un momento para cortarle la cabeza, y tal vez no bastará un siglo para producir otra igual. Diccionario Espasa 1000 Grandes Científicos. Ed. Espasa Calpe. Madrid (1996).

agua de la represa al estanque, como de hecho lo supone Carnot en su tratado sobre la potencia motriz del fuego.

En 1780 Lavoisier en su Memoria sobre el Calor, describe de manera muy completa las características del calórico: un fluido, ígneo, discreto, indestructible, imponderable, incoercible, capaz de penetrar todo el espacio, y, además, sus partículas actúan como agentes que producen fuerzas repulsivas, así que entre ellas se auto-rechazan²⁶. Sus ideas acerca del calor aparecen en diferentes escritos que van de 1766 a 1778. Por su lado, Joseph Black²⁷ le atribuyó al calórico otra característica a partir del estudio de los fenómenos de la percusión, la fricción y la repentina compresión de un gas, situaciones en las cuales aparentemente se produce calor. Black postula que el calor en los cuerpos se encuentra en dos formas: sensible y latente, las cuáles se distribuyen de formas diferentes, de acuerdo a las circunstancias del fenómeno que se esté analizando.

Una de las ventajas del modelo del calórico sobre el modelo cinético de la vibración fue la posibilidad de poder definir una unidad de calórico, a saber, la cantidad de calor necesario para elevar una cantidad determinada de agua en un grado de temperatura, lo que no pudo hacer el modelo cinético. La introducción de una unidad hizo posible la realización de innumerables experimentos acerca del comportamiento de las diferentes sustancias respecto a su capacidad calórica.

En 1592 Galileo construyó el primer termómetro²⁸, el cual estaba compuesto por un bulbo de vidrio del tamaño de un puño y abierto a la atmosfera por medio de un tubo delgado. En 1641 el Duque de Toscana construye el termómetro de bulbo de alcohol con el capilar sellado. Desde la segunda mitad del siglo XVII estaban disponibles termómetros con los que era posible apreciar hasta una décima de grado, algunos de estos fueron utilizados por Lavoisier en sus experimentos, lográndose observar hasta una centésima de grado (Heilbron, 1979).

Entonces, midiendo el incremento en la temperatura o el volumen de un cuerpo era posible determinar de manera indirecta la cantidad de calórico absorbida por el cuerpo. Sin embargo, el modelo requería de una unidad que lo definiera directamente. Los *caloristas*, encontraron pronto que el calórico se transfiere de manera espontánea de los cuerpos que contienen mayor calórico a aquellos que contienen menor cantidad de calórico, lo cual se manifiesta en la disminución de la temperatura

²⁶ En su paper "De las combinaciones del calórico y de la formación de los fluidos elásticos aeriformes", Lavoisier establece que el calórico: *"Es un fenómeno constante en la naturaleza, cuya generalidad fue bien establecida por Boerhaave, que cuando se calienta cualquier cuerpo, solido o fluido, aumenta el tamaño en todas las direcciones. Los hechos sobre los que se han fundado quienes pretenden restringir la generalidad de este principio no son más que resultados ilusorios o, al menos, se hallan envueltos en circunstancias extrañas que hacen que lo parezcan [...]. Se concibe así que las moléculas de los cuerpos estén continuamente forzadas por el calor a separarse unas de otras, que no tengan ligazón entre sí, y no existiría cuerpo sólido alguno si ellas no estuviesen retenidas por otra fuerza que tiende a unir las o, mejor dicho, a encadenarlas; a esta fuerza, sea su causa la que fuese, se la conoce con el nombre de atracción. De esta forma, podemos considerar que las moléculas están sometidas a la acción de dos fuerzas, una repulsiva y otra atractiva, cuya acción recíproca las mantiene en equilibrio. Si domina la atracción, el cuerpo permanece en estado sólido, pero si dicha fuerza es la más débil y el calor separa las moléculas alejándolas de su esfera de acción, entonces pierden la adherencia que tenían entre sí y el cuerpo deja de ser un sólido [...]. Siendo esta sustancia, cualquiera que ella fuese, la causa del calor, o, en otros términos, siendo la sensación que llamamos calor el efecto de su acumulación, no se puede en un lenguaje riguroso designarla con el nombre de calor, porque una misma denominación no puede expresar a la vez la causa y el efecto. Esta fue la razón que me determinó, en la memoria que publiqué en 1777, a designarla bajo el nombre de fluido ígneo y de materia del calor. Más tarde, en el trabajo que hicimos en común Morveau, Berthollet, Fourcroy y yo sobre la reforma del lenguaje químico, creímos se debían desterrar estas perfrasis que alargan el discurso, le hacen muy cansón, menos preciso, menos claro y que incluso con frecuencia no implican ideas suficientemente justas. En consecuencia, hemos designado a la causa del calor, al fluido eminentemente elástico que lo produce, con el nombre de calórico [...]."* Güémez, J (2003).

²⁷ Joseph Black. (Burdeos 1728-Edimburgo, 1799) Físico y químico británico. Descubrió la existencia de un gas distinto del aire, que llamo aire fijo y que resultó ser dióxido de carbono, que se produce en la fermentación, en la respiración y en la combustión del calor. En Física descubrió la diferencia entre el calor y temperatura, demostrando que masas iguales de diferentes sustancias, al recibir calor, no aumentan la misma temperatura, e introdujo así el concepto de calor específico. También comprobó que otras sustancias, como el hielo fundente, al recibir calos no modifica su temperatura, descubriendo así el calor latente de fusión. Diccionario Espasa 1000 Grandes Científicos. Ed. Espasa Calpe. Madrid (1996).

²⁸ Los termómetros tuvieron sus primeras aplicaciones prácticas en la Meteorología y en la Agricultura, sin embargo las escalas dadas a estos, eran absolutamente arbitrarias, y los resultados obtenidos, no daban razón realmente de un valor cuantitativo.

de los primeros, y el aumento en la temperatura de los segundos. Esta cantidad de calórico transferido fue llamada caloría²⁹, definida poco después como la cantidad de calórico necesaria para elevar la temperatura de una grado de agua de 14,5°C a 15,5 °C.

En el último cuarto del siglo XVIII se produjo una de las colaboraciones científicas más famosas de la historia de las Ciencias, la que tuvo lugar entre Laplace y Lavoisier en torno a la cuantificación del calor, en tres fases. En la fase I, en 1777, se determinó las condiciones bajo las cuales se pueden vaporizar algunos fluidos; en la fase II se determinó la dilatibilidad de algunas sustancias. Estos resultados fueron publicados en la Memoria sobre la Acción del Calórico. Finalmente en la fase III, entre Julio de 1782 y los primeros meses de 1783, se ideó un instrumento: “el calorímetro”, para medir la transferencias de calor en multitud de circunstancias, tanto físicas como químicas. Los resultados de estas importantes investigaciones fueron leídos en la Academia de Ciencias de París en junio de 1783 y publicados poco tiempo después en la famosa Memoire sur le Chaleur de Lavoisier.

3.1.1. El poder explicativo del modelo del calórico

3.1.1.1. Las sustancias tiene diferentes capacidades calóricas

La existencia de una unidad para el calor, que permite comparar la cantidad de calórico que gana o cede un cuerpo, manifestado en el aumento o disminución de la temperatura, así como los experimentos realizados por Joseph Black en el siglo XVIII, permitieron establecer que cantidades iguales de sustancias diferentes, al ganar o ceder la misma cantidad de calórico experimentan variaciones diferentes de temperatura. A partir de esto, Black supuso en 1760 que el calórico absorbido o cedido está relacionado por un lado con su masa y por otro con la variación de la temperatura. Así que si tenemos cantidades iguales de sustancias diferentes, cada una de ellas requerirá una cantidad diferente de calórico para aumentar su temperatura en una cantidad determinada. A esta cantidad la llamó: calor específico, y la definió como la cantidad de calor ganado o cedido por gramo para variar su temperatura en un grado centígrado.

En 1761 Black, determinó por medio de una serie de experimentos supremamente ingeniosos que al proporcionar calor a cierta cantidad de hielo, éste no se convertía en líquido inmediatamente sino que el hielo inicialmente absorbe cierta cantidad de calor sin aumentar su temperatura; de igual forma observó que la aplicación continua de calor a agua en ebullición, no produce una variación en la temperatura. De estos trabajos dedujo que el calor suministrado tanto al hielo como al agua hirviendo, es empleado únicamente en el cambio de estado, a este calor lo denominó calor latente.

Esta situación depende por un lado de la capacidad del calórico de fluir desde y hacia las sustancias, penetrando todo el espacio, y por otro lado, del hecho de que cuando un cuerpo gana o cede calórico se manifiesta precisamente en variaciones de temperatura, variaciones que dependen del calor específico de la sustancia.

Analicemos la siguiente situación: si se tienen tres esferas de igual masa pero de diferentes materiales (hierro, zinc y madera) a temperatura ambiente, y se introducen en un recipiente con agua hirviendo hasta que las tres adquieran la misma temperatura del agua, y posteriormente se sacan y se colocan sobre un bloque de parafina, se observa que después de cierto tiempo las tres se encuentran a una profundidad diferente al interior del bloque, lo cual indica indudablemente que los tres cuerpos a pesar de tener la misma temperatura poseen una cantidad de calórico diferente, y por tanto, transfieren cantidades diferentes de calórico a la parafina derritiendo así cantidades diferentes de ésta. Evidentemente, el modelo del calórico proporciona los elementos fundamentales para comparar el

²⁹ A pesar de que existe controversia sobre quien fue el primer científico que definió la caloría, las diferentes historias coinciden en que el término surge en Francia a comienzos del siglo XIX, y a quién en mayor medida se le atribuye el honor de su definición es al químico francés Nicolas Clément en 1819. Y aunque el modelo del calórico, finalmente es derrocado, esta unidad de calor sigue vigente aun en nuestros días.

comportamiento de las diferentes sustancias respecto al calor, en términos de su calor específico y su relación con la masa y la variación de temperatura.

3.1.1.2. Explica satisfactoriamente la diferencia de estados.

Si tal como lo planteó Black, todos los cuerpos contienen cierta cantidad de calor, de la cual desconocemos tanto su magnitud como su distribución, y de acuerdo con Lavoisier, *las moléculas están sometidas a la acción de dos fuerzas, una repulsiva y otra atractiva, cuya acción recíproca las mantiene en equilibrio*, entonces se puede explicar la existencia de los diferentes estados de la materia: si domina la atracción, el cuerpo permanece en estado sólido, pero si dicha fuerza es la más débil y el calor separa las moléculas alejándolas de su esfera de acción, entonces pierden la adherencia que tenían entre sí y el cuerpo deja de ser un sólido y pasa a ser un fluido o un gas.

El cambio en el volumen, o simplemente la dilatación de los cuerpos, es explicado por el modelo del calórico así: cuando un cuerpo gana calórico las partículas del calórico llenan los espacios existentes entre las partículas del cuerpo y las partículas de calórico ya presentes, aumentando tanto la fuerza repulsiva como la distancia existente entre las partículas, produciéndose así un incremento en el volumen. Por tanto, a partir de la característica que Black le asignó al calórico, se sigue que el calórico se manifiesta en dos formas, sensible y latente. Podríamos afirmar que todos los cuerpos a temperatura ambiente poseen una cierta cantidad de calórico sensible y calórico latente que simplemente no conocemos, pero que en el momento en que ganan o pierden calórico su distribución se ve necesariamente afectada. Es decir, cuando un cuerpo se expande, parte del calórico absorbido produce un aumento en la temperatura y la otra parte se convierte en latente, lo cual genera un aumento en el volumen. Así la expansión no es más que una clase de cambio de estado.

3.1.1.3. Explica la existencia de la temperatura crítica en los cambios de estado

El modelo del calórico explica de manera satisfactoria por qué la temperatura no aumenta cuando ocurre un cambio de estado, a pesar de que la sustancia continúa absorbiendo calórico. De acuerdo con J. Black, el calor absorbido, cuando se llega a la temperatura de cambio de estado, se emplea precisamente en el cambio de estado y no en la elevación de la temperatura de la sustancia. Este calor, que no se manifiesta en la elevación de temperatura, recibe el nombre de calor latente, mientras que el otro recibe el nombre de calor sensible.

3.1.1.4. Explica los cambios de temperatura en la expansión y compresión de los gases

Cuando un gas se expande, parte del calor sensible se convierte en calor latente y el gas se enfría. Cuando el gas se comprime, sucede lo contrario, parte del calor latente se convierte en calor sensible y consiguientemente el gas experimenta un aumento de temperatura. De esta forma, el modelo del calórico explica el fenómeno de variación de la temperatura en la compresión y expansión de los gases, fenómenos que desde el punto de vista del modelo cinético son difíciles de explicar.

3.2. El calor como vibración

En el continente europeo, el modelo del calórico predominó sobre el modelo vibratorio, gracias a la autoridad intelectual de Lavoisier, pero en la Isla, Inglaterra, el modelo cinético o vibratorio predominó sobre el modelo del calórico, gracias a la autoridad de científicos tan eminentes como Boyle, Newton y B. Thomson, conocido como el conde de Rumford. Desde el punto de vista de la presente investigación, la hipótesis de Carnot supone de alguna manera el modelo del calórico,

mientras que la hipótesis de Joule supone el modelo vibratorio. Esta circunstancia exige que, así sea brevemente, expongamos el modelo vibratorio. Para este efecto no servimos de dos experimentos, el de Newton y el de B. Thomson.

3.2.1. El experimento de Newton

De acuerdo con los defensores del calórico, el aumento de temperatura se debe a la admisión de una sustancia, fluida e invisible como el aire, pero de todas maneras una sustancia como lo son por ejemplo el oxígeno, el hidrógeno y los demás gases conocidos. El oxígeno es invisible, sin embargo, el oxígeno se puede extraer de una campana, haciendo el vacío en esta. Algo semejante debe suceder con el calórico: si se supone que en una campana neumática hay calórico, por más sutil e invisible que sea, es posible extraerlo, negarlo sería ir, no solamente contra el sentido común, sino contra el valor experimental de las ciencias. Estos son los supuestos del experimento realizado por Newton en 1770.

En dos campanas de vidrio se suspende dos termómetros idénticos, teniendo en cuenta que no entren en contacto con el vidrio. Inicialmente las campanas, los termómetros y la habitación se encuentran a temperatura ambiente. Se hace el vacío en una de las campanas y mientras se mantiene funcionando la máquina neumática, se aumenta la temperatura de la habitación. Después de cierto tiempo, las campanas adquieren la temperatura ambiente. De acuerdo con el modelo del calórico, el termómetro de la campana sobre la que no se ha hecho el vacío debe manifestar un aumento de temperatura, mientras que la otra, no. La razón es sencilla: la campana calienta el aire que se encuentra adentro, el aire calienta el termómetro. El termómetro de la segunda, aquella en la que se ha hecho el vacío, no debe manifestar ningún aumento de temperatura, de acuerdo con la hipótesis de que el calórico es una sustancia, pues en ésta no solamente no hay aire, sino ninguna sustancia que esté fluyendo de la campana al termómetro, pues por suposición se ha hecho el vacío.

El resultado del experimento no deja de ser sorprendente para los defensores de la hipótesis del calórico: Los dos termómetros indican un aumento de temperatura: el aumento de temperatura no se debe a la admisión de una sustancia. Pero si los defensores del modelo calórico no pueden explicar el resultado del experimento, los defensores del modelo vibratorio, tampoco: ¿cómo se puede comunicar una vibración a través del vacío? La conclusión parece evidente, el calor es algo más misterioso de lo que se supone.

3.2.2. El experimento de B. Thomson

El argumento fundamental de los defensores del modelo vibratorio fue la generación de calor por fricción. Para éstos era simplemente imposible explicar el aumento de temperatura de una varilla al ser golpeada repetidamente con un martillo, como hacían los herreros. La pregunta crucial la hizo R. Boyle: *¿por qué se calienta un clavo al introducirlo en la madera?* Porque los golpes sucesivos del martillo hacen vibrar fuertemente las partes más pequeñas del clavo, vibración que es aumentada por la fricción con la madera. El calor no es más que vibración, energía cinética, diríamos hoy en día. Sin embargo, el experimento decisivo se debe a un ingeniero militar, Benjamín Thomson o Conde Rumford hacia 1798, en diferentes comunicados a la Sociedad Real de Londres. Investigaciones que conoció Joule y que lo convencieron de que el calor nada tenía que ver con la misteriosa sustancia denominada calórico. El calor era, como lo suponían los filósofos ingleses, una agitación o vibración de partes minúsculas de los cuerpos sometidos a golpes o fricción.

Benjamín Thompson o Conde de Rumford fue un talentoso ingeniero inglés, con una gran habilidad para la experimentación. Un día, de manera casual, fue sorprendido por un hecho sin precedentes: La enorme cantidad de calor generado en la elaboración de cañones, labor que le correspondía como superintendente en el taller militar del arsenal de Munich. *Fue por accidente que*

he llegado a hacer los experimentos, de los cuales estoy a punto de dar cuenta...³⁰. (Thompson, Enero 1798).

En la elaboración de los cañones se horadaba por medio de una fresa la boca del cañón en un cilindro de bronce. En lugar de hacer girar la fresa, ésta se mantenía quieta mientras se hacía girar el cuerpo del cañón empleando la fuerza de tracción de varios caballos. Un esquema del procedimiento se representa en la figura 3.1, tomado de la descripción que hace el mismo Thomson en una de sus comunicaciones a la Sociedad real de Londres en el año de 1798.

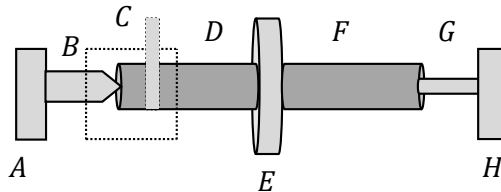


Figura 3.1 Experimento de B. Thomson, 1798

- A: Soporte
- B: Fresa
- C: Recipiente con agua + termómetro
- D: Cuerpo del cañón
- E: Rueda giratoria
- F: cuerpo del cañón
- G: cilindro de soporte, giratorio
- H: Soporte

Procedimiento: El cuerpo del cañón se hace girar por medio de la rueda aprovechando la fuerza proporcionada por caballos de tiro. La fresa, que se mantiene fija, perfora el bloque para formar la boca

Explicación de la figura

El bloque del cañón en estado bruto se coloca horizontalmente entre dos soportes A y H por medio de dos varillas de hierro B y G. La varilla B, tiene en su extremo una fresa de acero que se presiona sobre uno de los extremos del cilindro de bronce. El extremo izquierdo del cilindro se denomina D y el extremo derecho F, mirando la figura. En el centro del cilindro hay una rueda, fija al cilindro. Alrededor de la rueda E se enrolla una cuerda. Al halar la cuerda, el cilindro gira, haciendo que la fresa aplicada en el extremo izquierdo del cilindro, labre lentamente la boca del cañón. La tracción de la cuerda se hace por medio de una bestia de tiro. La fresa y el extremo correspondiente del cilindro de bronce se encuentran dentro de una caja de madera con agua, C. Durante el proceso de labrado de la boca del cañón, el agua se calienta, su temperatura se mide con un termómetro como aparece en el extremo derecho de la caja.

Nota: El esquema de la figura 3.1 es una representación muy simplificada del montaje del experimento, pero en lo fundamental proporciona las líneas generales del experimento.

³⁰ “Siendo yo recientemente encargado de la dirección del horadado de la cañones en la fábrica de arsenal de Múnich, quede sorprendido por el grado considerable de calor que adquiere en un tiempo muy pequeño, una pieza de latón cuando es perforada; y por la temperatura todavía muy elevada (mucho mayor que la del agua hirviendo, como comprobé por la experiencia) de las virutas metálicas provenientes de la perforación”

Descripción del experimento (Ensayo leído ante la Sociedad de Londres en enero de 1798)

A lo largo de sus investigaciones, Thomson realizó 4 series de experimentos que le permitieron establecer que el calor generado por fricción era prácticamente inagotable³¹, resultado de la acción mecánica sobre el metal, y no una sustancia como suponían los defensores de la teoría del calórico, pues ésta terminaría, como es evidente, por agotarse en el contexto de los experimentos realizados. En la primera serie busca establecer cuánto calor es generado realmente por medio de la fricción, cuando una fresa de acero se aplica la base del cilindro de bronce como se muestra en la figura 3.1. Para evitar, la pérdida de calor por radiación se cubre el cilindro con una capa ajustable de franela, la cual fue cuidadosamente colocada alrededor, evitando el contacto del cilindro con la atmósfera fría. Al inicio del experimento, la temperatura del medio ambiente y del cilindro era aproximadamente 60 °F. Al final, 2 horas y media después, cuando el cilindro había dado 960 vueltas sobre su eje y los caballos se detienen, el pequeño termómetro de mercurio, cuyo bulbo es de 32/100 de pulgadas de diámetro, y 3¼ pulgadas de longitud, introducido por el hueco hecho para recibirlo a uno de los lados del cilindro, registró una temperatura de aproximadamente 130°F.

La segunda serie de experimentos estuvieron orientados a determinar si el aire o el agua que servía de refrigerante había contribuido a la generación de una cantidad tan notable de calor, llegando a la conclusión de que si hubo alguna participación, ésta era despreciable.

En la tercera serie de experimentos determina con bastante precisión, según sus propias palabras, la cantidad total de calor generado por la fricción en dos horas y medio de trabajo. El calor generado es equivalente al calor necesario para calentar casi 27 libras de agua helada, a 32 grados Fahrenheit, la temperatura de fusión, a 200 grados Fahrenheit, la temperatura de ebullición en Múnich. La sorpresa de Thomson, como la de sus colaboradores, fue notable, si se tiene en cuenta que el proceso de horadar la boca del cañón podría haber continuado durante días.

Tabla 3.1. Resultados en el experimento de B. Thomson

La tabla adjunta muestra la equivalencia en libras del agua calentada, de cero grados a 100 grados centígrados, del calor generado por la fricción en el proceso de elaboración de un cañón a partir de un cilindro de 113 libras de bronce, cuando solamente la fresa ha avanzado unas pocas pulgadas dentro del cilindro; 2 horas y media de trabajo. En la columna izquierda se registran los implementos tenidos en cuenta en la generación de calor: la caja con agua, el cuerpo del cañón y la fresa. En la columna de la izquierda aparece la cantidad de agua, en libras, que se podría calentar de 0 grados a 100 grados centígrados si se empleara el calor generado por el implemento indicado en la columna de la izquierda. Al final aparece la equivalencia total del calor generado: el calor suficiente para calentar 27 libras de agua de cero a 100 grados centígrados.

<i>Implementos tenidos en cuenta en la generación de calor por el proceso de elaboración de la boca del cañón a partir del cilindro de bronce</i>	<i>Cantidad de agua a la temperatura de 32 grados Fahrenheit que se podría haber calentado hasta la temperatura de ebullición, 200 grados Fahrenheit, con el calor generado por la fricción de cada una de las implementos utilizados en el proceso de elaboración de la boca del cañón.</i>
El agua en la caja de madera representada en la figura 3.1 con la letra C. La cantidad de agua almacenada era de 18,7 libras, el aumento de temperatura fue de 150 grados Fahrenheit	15,2 Lb

³¹ “Una investigación concienzuda de ellos, los cual parece invitar hermosamente a dar más perspicacias en la naturaleza oculta del calor; y nos habilita a formar algunas razonables conjeturas respecto a su existencia, o no existencia, como fluido ígneo: tópico sobre el cual los filósofos tienen opiniones, en todas las épocas, siendo estas muy divididos”. (Thompson, Enero 1798).

El cuerpo del cañón, formado por 113,13 libras de bronce cuyo calor específico con respecto al calor específico del agua es de 0,1100. El aumento de temperatura fue de 150 grados Fahrenheit.	10,37 Lb
La barra de hierro a la que estaba adherida la fresa, representada en la figura 3.1 por la letra B.	1,01 Lb
Cantidad de agua que se puede calentar de la temperatura de fusión (agua con hielo) a la temperatura de ebullición (200 grados Fahrenheit) con el calor total generado por los diversos implementos utilizados en la elaboración de la boca.	26,58 Lb

3.3. Conclusión

Los resultados experimentales de B. Thomson (Conde Rumford) significaron un duro golpe a los defensores del modelo sustancial del calor y un argumento supremamente sólido para los defensores del modelo vibratorio. Sin embargo, los defensores del calórico no se dieron por vencidos y recurrieron a todo tipo de elucubraciones para interpretar los resultados de los experimentos de Thomson, como la suposición de que el calor generado no era más que la conversión del calor latente en calor sensible, de acuerdo con la hipótesis de J. Black. El argumento más poderoso a favor de la hipótesis del calor como vibración, según el mismo Thomson, era la característica inagotable de la producción de éste, dependiente solamente del trabajo de fricción realizado por la fresa sobre el bloque de Bronce. El calor total generado en el experimento, de acuerdo con la tabla 3.1, se debía a la trituración de solamente 8 onzas de bronce. La trituración de ocho onzas genera calor suficiente para poner en ebullición 26 litros de agua a partir de cero grados centígrados o 32 grados Fahrenheit. Si se tiene en cuenta que el bloque de bronce en estado bruto era de aproximadamente 113 libras, un cálculo sencillo muestra que la cantidad de calor que se generaría con la reducción a virutas de una masa igual de bronce, con el mismo procedimiento, sería supremamente grande. Además, otros experimentos que no se han comentado, mostraron que la cantidad de calor generado en función del tiempo no disminuye gradualmente como se supone que sucedería si por hipótesis el calor fuera una sustancia adicional a la sustancia que constituye el cuerpo del cañón, el bronce: ésta se iría agotando gradualmente, lo que no sucede en el experimento en cuestión.

Para concluir, nada mejor que citar las palabras de Thomson en su comunicación a la Sociedad Real de Londres:

Hemos visto que en la fricción de dos superficies metálicas puede excitarse una cantidad muy considerable de calor, que este calor es emitido en una corriente o flujo constante en todas las direcciones sin interrupción ni intervalo, y sin signo alguno de disminución o agotamiento. Y al razonar sobre este tópico, no debemos dejar de considerar la más notable circunstancia de que la fuente del calor generado por fricción en estos experimentos parecía inagotable. No es necesario agregar que algo que puede suministrarse sin limitaciones a un cuerpo aislado o sistema de cuerpos aislados, no puede en manera alguna ser una sustancia material, y me parece difícil, si no imposible, formarse ideas claras de algo capaz de ser excitado y comunicado tal como el Calor fue excitado y comunicado en estos experimentos, salvo el MOVIMIENTO³².

³² Tomado de "El conde Rumford". Brown, Sanborn. p.100.

CAPITULO 4. EL CICLO IDEAL: CARNOT

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 Watt³³. 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 eficiencia³⁴.

Cinco años después de la muerte de J. Watt aparece la publicación de un pequeño tratado *Sobre la Potencia Motriz del Fuego*³⁵ escrito por un ingeniero francés, Sadi Carnot³⁶, a la edad de 24 años, en el que se establecen algunos de los Principios fundamentales de la Termodinámica. La hipótesis fundamental de Carnot a la cual dedicaremos este capítulo, es que el trabajo se debe exclusivamente a la caída del calor de la caldera al condensador, independientemente de la naturaleza de medio de transmisión.

4.1. La máquina térmica

Una máquina³⁷ térmica es un dispositivo que emplea calor para realizar trabajo mecánico. De acuerdo con Watt, se pueden distinguir tres componentes en toda máquina³⁸: 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.

³³ 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.

³⁴ 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.

³⁵ 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.

³⁶ 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.

³⁷ 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 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 contruidos 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.

³⁸ 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.

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 frío. 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 frío. A lo cual Carnot dice: “*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*”.

Así, 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 otro. Por tanto, 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 (Morton, 1964).

4.2. 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 cilindro³⁹. 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 infinito⁴⁰. Las posibilidades de diferentes ciclos térmicos son infinitas. Véase por ejemplo dos máquinas térmicas con ciclos diferentes:

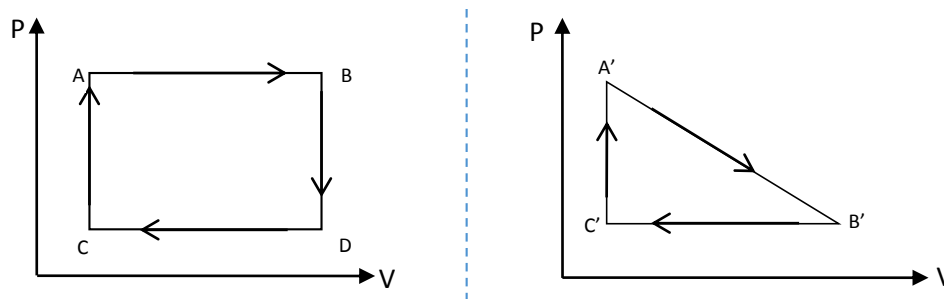


Figura 4.1. Representación de dos ciclos diferentes.

Las flechas indican el orden de los procesos, pero el orden inverso es igualmente posible. De aquí se sigue que todo ciclo es reversible.

³⁹ Carnot: “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”.

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 temperatura. A lo cual Carnot dice: “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”. Dentro de este contexto, surge la pregunta acerca del ciclo de máxima eficiencia.

4.3. 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*⁴¹.

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, el trabajo en la expansión isotérmica es máximo y en la compresión isotérmica es mínimo. 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. En este caso los trabajos son iguales pero con signos contrarios.

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.

⁴¹ Carnot: “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”.

Representación del ciclo ideal

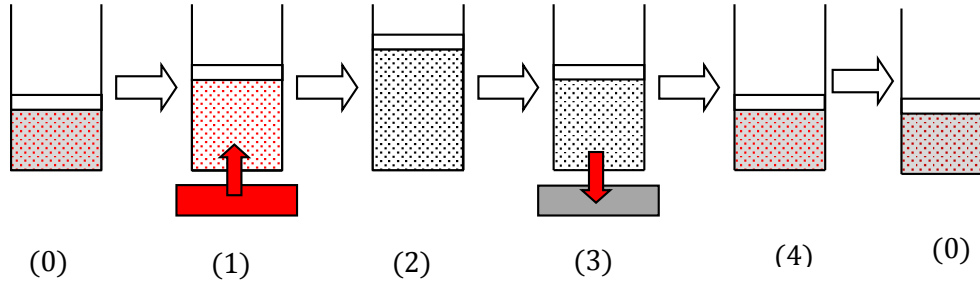


Figura. 4.2. Representación del ciclo de Carnot

- (0) Estado inicial
- (1) Expansión isotérmica. El cilindro se pone en contacto con el foco caliente (caldera). Se trasfiere calor de la caldera al gas, aumenta la temperatura del gas
- (2) Expansión adiabática, el gas se enfría, no entra ni sale calor del gas.
- (3) Compresión isotérmica. El gas se pone en contacto con el foco frío, el condensador. El gas se calienta por la compresión, el calor generado pasa al condensador.
- (4) Compresión adiabática. El gas aumenta su temperatura a la temperatura inicial. No entra ni sale calor.
- (0) Las condiciones son iguales a las condiciones iniciales. Termina el ciclo.

Diagrama de Clapeyron

El ciclo de Carnot también se puede representar por medio de un diagrama presión-volumen, como lo hizo por primera vez el físico y matemático del siglo XIX, E. Clapeyron en una célebre monografía que llevaba el mismo título de la monografía de Carnot, *La Potencia Motriz del Fuego*. Desde entonces, este diagrama se utiliza comúnmente en el análisis de problemas termodinámicos.

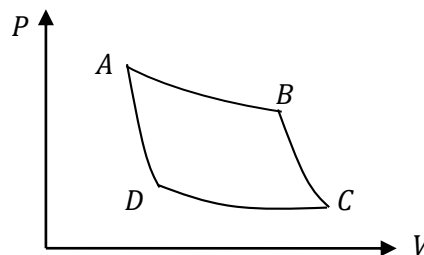


Figura 4.3. Diagrama del ciclo de Carnot

- $A \rightarrow B$: expansión isotérmica
- $B \rightarrow C$: expansión adiabática
- $C \rightarrow D$: Compresión isotérmica
- $D \rightarrow A$: Compresión adiabática

Revertibilidad del ciclo de Carnot

Los diagramas de Clapeyron tiene la ventaja de mostrar cómo se pueden revertir fácilmente los procesos de un ciclo cualesquiera. En el caso del ciclo de Carnot, los procesos se pueden revertir de la siguiente manera:

- $A \rightarrow D$: expansión adiabática
- $D \rightarrow C$: expansión isotérmica
- $C \rightarrow B$: compresión adiabática
- $B \rightarrow A$: compresión isotérmica

4.4. 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 con el agente 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 altura en cada ciclo *sin que haya nuevo suministro de calor*⁴² 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 física⁴³. Por consiguiente, no hay ningún agente, en las máquinas térmicas, superior a otro, en cuanto a la eficiencia⁴⁴.

4.5. Representación de la máquina térmica según la hipótesis de Carnot

La figura 4.4 representa una máquina térmica de acuerdo con la hipótesis de Carnot de que el trabajo realizado se debe a la caída de cierta cantidad de calor (Q) del foco caliente o caldera (C_a) al foco frío o condensador (C_o), de una manera semejante a la rueda de un molino, donde el trabajo realizado se debe a la caída del agua de la represa a al desagüe. El trabajo se representa por el levantamiento de

⁴² 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”.

⁴³ 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 inadmisibile”.

⁴⁴ Carnot: “el máximo de potencia motriz obtenido desde el uso de vapor es también el máximo de potencia motriz obtenible por cualquier otro medio”.

un peso W , como muestra la figura. El mecanismo de transformación se representa por una rueda de engranaje y una cuerda que pasa por una polea.

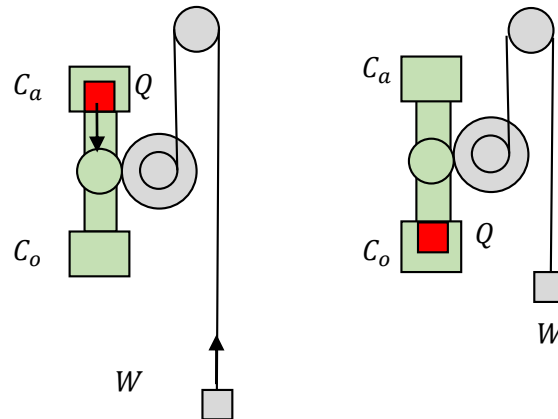


Figura 4.4. Representación de una máquina térmica de acuerdo con la hipótesis de Carnot

Representación de una máquina térmica de acuerdo con la hipótesis de Carnot de que el trabajo realizado por la máquina se debe a la caída de una cantidad determinada de calor de la caldera al condensador.

4.6. Representación de la reversibilidad de la máquina térmica

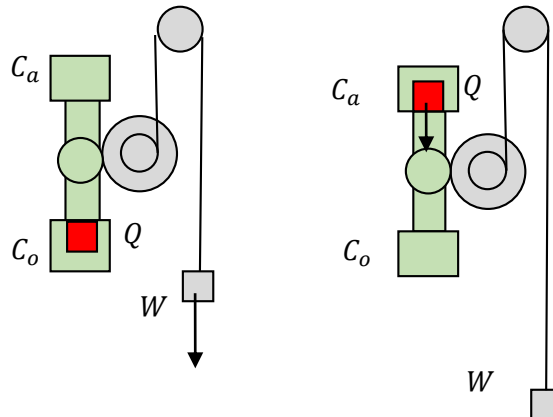


Figura 4.5. Representación del ciclo inverso de Carnot.

En lugar de utilizar la caída de calórico para subir un peso, se utiliza la caída del peso para subir una cantidad determinada de calórico del condensador a la caldera.

4.7. Acoplamiento de dos máquinas térmicas: el movimiento perpetuo de segundo orden

La demostración de que la eficiencia de la máquina ideal no depende del agente de trabajo, vapor de agua, aire, alcohol, etc, la lleva a cabo Carnot recurriendo a la imposibilidad del movimiento perpetuo de segundo orden, es decir, de una máquina que se autoalimentara perpetuamente realizando al mismo tiempo trabajo exterior. El argumento de Carnot, válido hoy en día, constituye el fundamento teórico de la segunda ley de la termodinámica según la cual es imposible construir una máquina térmica cuya eficiencia sea mayor que la eficiencia de la máquina de Carnot, es decir de la

máquina cuyo ciclo sea el ciclo propuesto por Carnot. La representación gráfica la hacemos acoplando las figuras 4.4 y 4.5, como se muestra en la figura 4.6.

La figura 4.6 representa dos máquinas térmicas acopladas. Los agentes de trabajo son diferentes, por ejemplo, alcohol vaporizado y vapor de agua. Supóngase que el vapor de alcohol es más eficiente que el vapor de agua, es decir, la máquina térmica de vapor de alcohol realiza un trabajo mayor que la máquina de vapor de agua en las mismas condiciones de presión, volumen y temperatura. Supóngase además que la máquina de la izquierda en cada uno de los pasos representados en la figura es la máquina de vapor de alcohol y la que la de la derecha es la máquina de vapor de agua. Evidentemente, se supone además que ambas máquinas trabajan con el ciclo de Carnot. Si la máquina de alcohol eleva un cuerpo a tres metros de altura y la máquina de vapor a dos metros, entonces, teniendo en cuenta que los procesos son reversibles, la máquina térmica se puede emplear para subir el calórico del condensador a la caldera cuando el cuerpo sujeto a la cuerda desciende dos metros. El resultado final es la elevación del cuerpo a un metro de altura. El proceso se puede repetir indefinidamente sin el suministro de nueva cantidad de calórico. El resultado es un movimiento perpetuo con realización de trabajo exterior, resultado que la experiencia durante siglos ha demostrado que es imposible. Por lo tanto, no es posible encontrar un agente de trabajo más eficiente que otro que, trabajando con el ciclo de Carnot, que es el más eficiente posible, realice un trabajo exterior mayor que el trabajo realizado, por ejemplo, con el vapor de agua: la eficiencia de la máquina ideal, que es la máquina de Carnot, no depende de la naturaleza del agente. Esta eficiencia depende solamente de altura entre la temperatura de la caldera y del condensador, para una determinada cantidad de calórico.

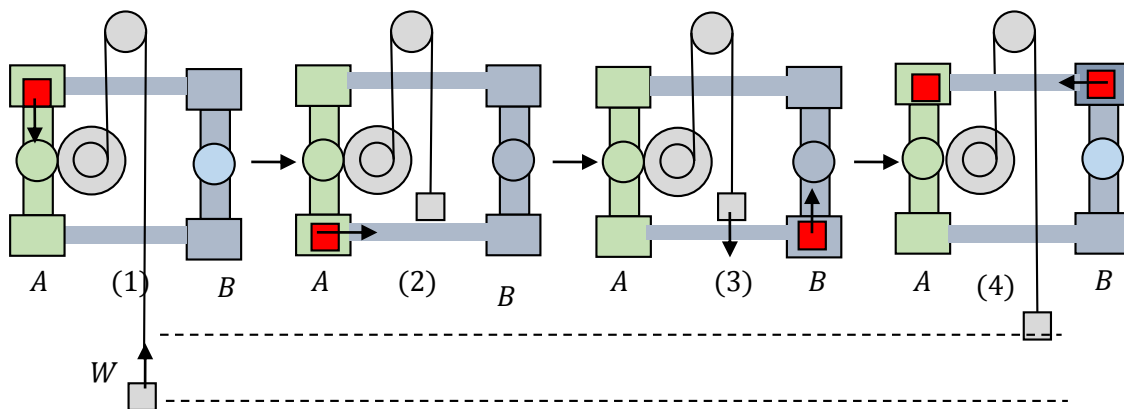


Figura 4.6. Acoplamiento de dos máquinas térmicas.

Si un agente es más eficiente que otro se podrían 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) Posición inicial. La máquina A posee un agente de trabajo más eficiente que la máquina B
- (2) Al caer cierta cantidad de calor de la caldera al condensador, como muestra la figura, el mecanismo adjunto eleva cierto peso, por ejemplo, a tres metros sobre el nivel del suelo.
- (3) La cantidad de calor que está en el condensador de la máquina A pasa, sin realizar trabajo, al condensador de la máquina B.
- (4) El peso que estaba a tres metros sobre el suelo, al descender dos metro, hace que el calor que estaba en el condensador de la máquina B ascienda a la caldera de ésta y de aquí, sin realización de trabajo, a la caldera de A. El resultado es evidente: Las condiciones finales del sistema son las mismas del estado inicial, pero el cuerpo ya no se encuentra sobre el suelo sino a un metro de altura. El ciclo se repite indefinidamente, teniendo como resultado la elevación a una altura cada vez mayor del

cuerpo W , al mismo tiempo que el calórico regresa a su posición inicial. Se trataría entonces de un movimiento perpetuo de segundo orden, cuya posibilidad es rechazada por todos los físicos teóricos.

4.8. Un poco de matemáticas

Dos son los aportes principales de Carnot a la teoría térmica, el descubrimiento del ciclo ideal, el de máximo trabajo posible, y la dependencia exclusiva del trabajo efectuado por la máquina de la diferencia de temperatura entre la caldera y el condensador. Ambos aportes se encuentran en su Monografía sobre la Potencia Motriz del Fuego. El lector desprevenido espera encontrarse con un tratamiento puramente matemático, pero no es así. Carnot prefirió un tratamiento descriptivo, en forma de proposiciones. Sin embargo, en una de sus notas (Pág. 37 de *Reflections on the Motive Power of Fire*) reconstruyó en forma algebraica el razonamiento anterior, lo que tiene la ventaja de ser mucho más breve y comprensivo para quien puede seguir el razonamiento analítico. A continuación, expondremos el razonamiento analítico, haciendo comentarios donde creamos conveniente para ayudar a la reconstrucción del pensamiento de Carnot.

El elemento de trabajo realizado por un gas al expandirse a presión constante está dado por la ecuación diferencial

$$dw = PdV \quad (1)$$

Carnot se refiere a este trabajo como a la potencia motriz del gas al expandirse. En lugar dw , escribe dr y en lugar de mayúsculas utiliza minúsculas, de manera que la ecuación aparece como $dr = p \cdot dv$

Como se trata de averiguar la potencia motriz del gas cuando se expande a temperatura constante, expansión isotérmica, la presión que aparece en la ecuación (1) se reemplaza por una expresión en función de la temperatura absoluta, aprovechando la ecuación de Marriotte y de Gay Lussac. Carnot en lugar de designar la temperatura con una sola letra, la T , como lo hacemos en el razonamiento que sigue, escribe como $(267 + t)$, de acuerdo con las mediciones de la época que colocaban el cero absoluto en -267 grados centígrados.

$$\begin{aligned} \frac{VP}{T} &= \frac{V_0P_0}{T_0} \\ \Rightarrow P &= \frac{V_0P_0T}{T_0V} \end{aligned} \quad (2)$$

Si se reemplaza (2) en (1), se obtiene la ecuación de la potencia motriz del gas cuando pasa de V_0 a V a la temperatura constante T

$$\begin{aligned} dw &= \frac{V_0P_0}{T_0V} T dV \\ \Rightarrow dw &= \left(\frac{P_0}{T_0}\right) \frac{V_0}{V} T \\ \Rightarrow dw &= N \frac{V_0}{V} T dV \\ \Rightarrow dw &= N \frac{V_0}{V} T dV \\ w &= NV_0T \ln V + C \end{aligned}$$

Si se tiene en cuenta que la potencia motriz del gas es cero cuando $V = V_0$, entonces $C = 0$ y la ecuación final se convierte en

$$w = NV_0T \ln V \quad (3)$$

La ecuación (3) proporciona el trabajo realizado por el gas al expandirse del volumen inicial V_0 .

Al volumen final V , a temperatura constante, absoluta T . Si se tiene en cuenta que Carnot supone que el volumen inicial es de 1 litro y que la temperatura absoluta en función de la temperatura t en grados centígrados es ($T = 273 + t$), entonces la ecuación (3) se puede escribir de una forma equivalente, como lo hace Carnot

$$\begin{aligned} w &= N(1L)(273 + t) \ln V \\ \Rightarrow w &= N(273 + t) \ln V \end{aligned} \quad (4)$$

Desde el punto de vista histórico vale la pena mencionar que para el tiempo de Carnot, el cero absoluto de la escala Kelvin no estaba en -273 grados centígrados sino en -267 . Esto explica por qué en la ecuación de Carnot aparece 267 en lugar de 273.

La ecuación (4) expresa la potencia motriz del gas al expandirse a temperatura constante t del volumen de 1 litro al volumen V . Si la expansión se lleva a cabo, no ya a la temperatura t sino a la temperatura $(t + dt)$, entonces el diferencial de la potencia motriz (del trabajo realizado por el gas en esa nueva circunstancia) está dado por

$$\begin{aligned} \delta w &= W_2 - W_1 \\ \delta w &= N(273 + (t + dt)) \ln V - N(273 + t) \ln V \\ \delta w &= N \ln V dt \end{aligned} \quad (5)$$

La ecuación (5) proporciona el incremento de la potencia motriz de 1 litro del gas en cuestión cuando la temperatura pasa de t a $(t + dt)$ *grados centígrados*. Si se supone ahora que para mantener la temperatura constante en la dilatación del gas se requiere de una cantidad e de calórico y se admite la hipótesis fundamental de que en la realización de trabajo no se consume ninguna porción del calor empleado, entonces δw sería la potencia motriz desarrollada por la caída de una cantidad de calórico e de la temperatura $t + dt$ a la temperatura t .

Es precisamente en este momento del razonamiento cuando se aplica la proposición fundamental de que el trabajo realizado por un gas al expandirse se debe solo a la caída del gas entre dos niveles de temperatura y no a la consunción de una parte del calórico.

Si se denomina u el trabajo realizado por la caída de la *unidad* de calórico de la temperatura t a la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$, entonces u es una función solamente de la temperatura, entonces, de acuerdo con la ecuación (4)

$$u = F(t) \quad (6)$$

Si en lugar de la caída de la unidad de calórico de la temperatura t a la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$, se considera la caída de la unidad de calórico de la temperatura $t + dt$ a la temperatura $t_0 = 0^\circ\text{C}$, entonces el incremento de la potencia motriz desarrollada por el gas es

$$\begin{aligned} u + du &= F(t + dt) \\ \Rightarrow du &= F(t + dt) - F(t) \\ \Rightarrow \frac{du}{dt} &= \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt} \\ &\Rightarrow \frac{du}{dt} = F'(t) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow du = F'(t)dt \quad (7)$$

De acuerdo con la ecuación (7), el incremento de la potencia motriz a causa de la caída de la unidad de calórico de $(t + dt)$ a $t_0 = 0^\circ\text{C}$ es igual al producto de la *derivada* de la función $F(t)$ y el diferencial dt .

Si en lugar de la caída de la unidad de calórico se considera la caída de e veces la unidad de calórico, entonces el trabajo realizado por el gas (es decir, la potencia motriz del gas) es

$$edu = eF'(t)dt \quad (8)$$

Pero edu es lo mismo que δw , el trabajo realizado al caer una cantidad de calórico igual a e desde $(t + dt)$ a t . Por consiguiente, al reemplazar (5) en (7), se obtiene

$$\begin{aligned} eF'(t) &= N \ln V dt \\ \Rightarrow e &= \left(\frac{N}{F'(t)} \right) \ln V dt \end{aligned}$$

Si se emplea la equivalencia

$$\frac{N}{F'(t)} = T \quad (9)$$

Donde T no designa la temperatura absoluta, como es el caso en la ecuación (3) por ejemplo, sino una variable diferente, que no cambiamos para que el resto de las ecuaciones coincidan con las expresiones usadas por Carnot, entonces

$$e = T \ln V dt \quad (10)$$

Para averiguar la cantidad de calor (U) requerido para cambiar el gas de *1 litro a cero grados centígrados* a *un litro a t grados centígrados* se averigua la cantidad de calor (s) para cambiar el gas de *1 litro a cero grados centígrados* a *V litro a t centígrados* y se le resta la cantidad de calor (e) para cambiar el gas de *V litro a t centígrados* a *un litro a t grados centígrados*: Recuérdese que e es la cantidad de calor para expandir o comprimir un gas a temperatura constante.

En consecuencia:

$$\begin{aligned} U &= s - e \\ \Rightarrow s &= U + e \end{aligned} \quad (11)$$

Si se reemplaza (10) en (11), se obtiene

$$s = U + T(\ln V)dt \quad (12)$$

Si se tiene en cuenta que U y e son funciones únicamente de la temperatura t , al derivar con respecto a t , se obtiene

$$\frac{ds}{dt} = U' + T'(\ln V) \quad (13)$$

La expresión ds/dt representa el calor específico del gas cuando ocupa el volumen V . Si se tiene en cuenta que el calor específico varía muy poco con el cambio de volumen, de acuerdo con los experimentos de Regnault, entonces el coeficiente T' debe ser muy pequeño, pudiéndose considerar igual a cero. Bajo esta hipótesis:

$$T' = 0$$

$$\Rightarrow T = C, (una\ constante)$$

Si se tiene en cuenta que

$$T = \frac{N}{F'(t)}$$

Entonces

$$\frac{N}{F'(t)} = C$$

$$F'(t) = \frac{N}{C} = A$$

$$F(t) = At + B \tag{14}$$

Si se reemplaza (6) en (14), se obtiene

$$u = F(t) = At + B \tag{15}$$

Si se tiene en cuenta que $u = 0$ cuando $t = 0$ *grados centígrados*, entonces $B = 0$ y la ecuación (14) se convierte en

$$u = F(t) = At \tag{16}$$

La ecuación (16) dice que la potencia motriz de un litro de gas cuando cae la unidad de calórico de la temperatura t a la temperatura de cero grados centígrados es proporcional únicamente a la diferencia de temperatura entre t y cero grados centígrados.

4.9. Conclusión

Carnot sentó las bases teóricas para que más tarde Rudolf Clausius⁴⁵, 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 cuestionó el razonamiento que sirvió de base a la monografía de Carnot, publicada en 1824, hasta las Comunicaciones a la

⁴⁵ 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.

Asociación Británica de James Prescott Joule⁴⁶ 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 del capítulo 6.

⁴⁶ 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.

CAPÍTULO 5. LA OBJECCIÓN DE JOULE

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 XIX⁴⁷. La solución definitiva se debe al científico inglés James Joule (1818-1889)⁴⁸ con dos célebres experimentos: el de la máquina electromotriz y el de la agitación mecánica del agua.

Durante la vida de Joule, los científicos se dividían en dos grandes grupos: los que sostenían que el calor no era 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 Locke⁴⁹, Boyle⁵⁰, Leibniz⁵¹ 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. Lavoisier⁵², 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 calor⁵³, 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).

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

⁴⁷ La evolución histórica del concepto de energía está 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 calienten 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. Benckmank papers on Energy. Lindsay Bruce.

⁴⁸ 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 llegó a estar interesado en la relativa nueva ciencia del electromagnetismo, y dedicó mucho tiempo al desarrollo de lo que era llamado una máquina 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.

⁴⁹ Locke consideraba el calor como una agitación fuerte de las partes insensibles de los objetos.

⁵⁰ Boyle fue uno de los grandes filósofos naturales del siglo XVII, se interesó en todos los aspectos de los fenómenos naturales. Para Boyle el calor es un movimiento molecular y cuando este es generado por medios mecánicos este es un “nuevo calor”, es decir, se produce calor.

⁵¹ 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.

⁵² 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.

⁵³ 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.

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.

5.1. Primer Experimento: La máquina electromotriz

En la época de estudiante, Joule se interesó de manera especial por los fenómenos eléctricos⁵⁴. Construyó con elementos muy rudimentarios un motor eléctrico⁵⁵. 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 experimentos⁵⁶, 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 resistor⁵⁷. En este contexto surge una pregunta inquietante: ¿de dónde proviene el calor generado por la corriente? La respuesta más plausible, piensa Joule, es que el calor proviene de la batería, pues en ésta se da una reacción química que libera calor. Desde el punto de vista químico, en la batería tiene lugar una combustión lenta entre los electrodos y la sustancia que hace de electrolito⁵⁸. 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 en nuestros días, y que, sin embargo, consideramos muy significativo desde el punto de vista histórico. (Véase *Benchmark Paper, Vol 1; on Energy*)

Considérese la figura 5.1, una reproducción de la figura hecha por Joule que aparece en la *Philosophical Magazine* de 1843 y que aparece publicada en *Los Benchmark Papers*, vol 1, citados en la Bibliografía consultada por el Autor de la presente investigación. Inmediatamente después de la figura se explica el montaje del experimento realizado innumerables veces por Joule.

⁵⁴ 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 llegó a ser el sueño del joven Joule, quien quería transformar la planta cervecera de su padre.

⁵⁵ Este motor que funcionaba con ayuda de una batería, lo construyó en 1837 cuando contaba con 19 años. Este motor rudimentario lo llevó 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.

⁵⁶ En total realizó 6 series de experimentos tomando en promedio 40 mediciones para cada una de las series.

⁵⁷ 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.

⁵⁸ 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.

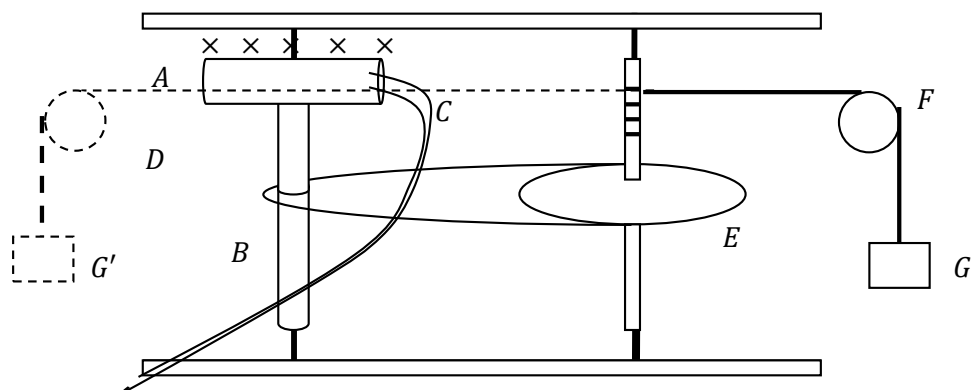


Figura 5.1. Reconstrucción de una figura que aparece en Acerca de los efectos calóricos de la magneto-electricidad y sobre el valor mecánico del calor.

[Phil. Mag. Ser. 3. Vol XXIII. Read before the Chemical Section of Mathematical and Physical Science of the British-Association. 21 August, 1843]

Montaje

A: Cilindro horizontal, de vidrio. Dentro del cilindro, lleno de agua, se encuentra una pequeña bobina, conectada por medio de dos cables con un galvanómetro, que no aparece en el dibujo. El cilindro tiene en la cara superior un pequeño orificio a través del cual se puede introducir un termómetro delgado para medir la temperatura del agua (que no aparece en la figura).

B: Cilindro vertical, macizo. El dispositivo formado por los dos cilindros puede girar sobre los goznes fijos a las dos bases, una inferior y la otra superior.

C: Cables que conectan los extremos del alambre de la bobina con un galvanómetro que no se encuentra en la figura.

D: Campo magnético generado por un electroimán doblado en forma de U, de manera que el cilindro horizontal quepa entre los dos brazos de la U. El campo magnético es producido por la corriente generada por una serie de baterías que no aparecen en la figura. (El electroimán que genera el campo magnético no aparece en la figura).

E: Rueda giratoria conectada por medio de una cuerda al dispositivo AB.

F: El sistema consta de dos poleas a ambos lados de la rueda giratoria.

G: El movimiento de rotación del dispositivo AB se logra por medio de los dos pesos iguales, G y G'.

Funcionamiento

Al girar el dispositivo AB, gira la bobina que se encuentra en el tubo horizontal A. Como la bobina se encuentra en el campo magnético B, se induce una corriente en la bobina. Si el circuito que forma el alambre de la bobina, pasando por el galvanómetro, se encuentra cerrado, el alambre se calienta (corto circuito), la magnitud del calentamiento se mide por la temperatura del agua en la cual se encuentra inmersa la bobina.

Hipótesis

Hay que tener en cuenta que para la época en que se realizan los experimentos de Joule, se desconocía la naturaleza de la corriente eléctrica y su relación con el calor en los alambres de conducción o en lo que hoy en día conocemos como resistores. En un principio se pensó que el calor generado por la corriente provenía de la combustión química en las baterías, pero esta explicación no

se aplica a las corrientes generadas por mecanismos diferentes a los mecanismos químicos, como es el caso de la corriente inducida, donde la causa de ésta es únicamente el movimiento del conductor dentro de un campo magnético, movimiento que requiere de un esfuerzo mecánico. Dentro de este contexto, se comprende fácilmente la hipótesis planteada por Joule:

La causa del calor generado por la corriente inducida no puede ser otra que el descenso de los pesos que hacen girar el dispositivo que contiene la bobina. El calor no es pues una sustancia que se transfiere de un lugar a otro, sin el resultado de una acción mecánica. Si es así, debe haber una equivalencia entre una cantidad de calor y el trabajo realizado para generarlo.

Realización

La comunicación de Joule a la Asociación Británica en agosto de 1843 *sobre los efectos calóricos de la magneto-electricidad* contiene seis series de experimentos, cada serie de seis experimentos individuales. Para dar una idea del razonamiento y del procedimiento de Joule, reconstruimos una de las series, la No. 1, recordando que se trata de una sola de las seis series, todas realizadas en circunstancias análogas.

Tabla 5.1. Serie No. 1

Batería	Rev/min	Desv.		Temp. amb.	Temp. del agua		Diferencia
		grad	min		Ant.	Desp.	
<i>desc.</i>	600	0	0	54,00	54,90	54,85	-0,05
<i>conect.</i>	600	21	0	54,67	54,85	54,88	+0,03
<i>desc.</i>	600	0	0	54,61	54,88	54,83	-0,05
<i>conect.</i>	600	24	0	54,65	54,85	54,92	+0,07
<i>correg..</i>	600	22	30	= 0,177 unidades de corriente		+ 0,10	

Primera columna: Aparecen dos estados de la batería que alimenta el electroimán que genera el campo magnético: *conectada* y *desconectada*. Cuando la batería está conectada se genera un campo magnético y consiguientemente una corriente inducida en la bobina. Cuando la batería se desconecta, no hay campo magnético y en consecuencia no hay corriente inducida.

Segunda columna: Aparecen las revoluciones por minuto del dispositivo *AB*. En los 36 experimentos con la máquina electromotriz se estabiliza el número de revoluciones en 600 revoluciones por minuto por medio de los pesos que hacen girar el dispositivo y se varía solamente el número de baterías que alimentan el electroimán, es decir, se varía solamente la intensidad del campo magnético.

Tercera columna: Se registra la desviación de la aguja del galvanómetro. La desviación sirve para calcular la corriente inducida, de acuerdo con una tabla elaborada por el mismo Joule, a partir de una definición personal de la unidad de corriente por medios químicos. Para este tiempo no había una definición oficial de la unidad de corriente.

Cuarta columna: Se registra la temperatura ambiente del cuarto donde se realiza el experimento.

Quinta columna: Se registra la temperatura del agua, antes y después del experimento, en grados Fahrenheit. El agua en la cantidad de nueve onzas y tres cuartos de onza se encuentre, como se mencionó antes, en el cilindro horizontal *A*.

Sexta columna: Se anota el aumento o disminución de temperatura en cada uno de los estados de la batería que alimenta el electroimán: la temperatura del agua cuando las baterías están conectadas y cuando no lo están. Es decir, cuando la bobina gira en un campo magnético y cuando no.

Última fila: se registran los valores corregidos (promedios). La desviación promedio del galvanómetro es de 22 grados 30 minutos, esa desviación corresponde a 0,177 unidades de corriente; el aumento de temperatura es de 0,10 grados Fahrenheit, en promedio.

Joule resume el resultado final de las diferentes series de experimentos en una tabla que reproducimos a continuación. Obsérvese que la fila correspondiente a la serie 1 de la Tabla 5.2. corresponde a los resultados finales, corregidos de la tabla anterior con el nombre de Serie No.1.

Tabla 5.2. Resultado de las 6 series de experimentos.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Serie	Corriente I	Calor gen Q	Corrección	Calor correg. Q	Ley de Joule
1	0,177	0,10	0,02	0,08	0,062
2	0,902	1,84	0,28	1,56	1,614
3	0,418	0,45	0,09	0,36	0,346
4	1,019	2,30	0,28	2,11	2,060
5	0,236	0,10	0,00	0,10	0,109
6	0,340	0,21	0,00	0,21	0,229

Columna 1: Aparecen las series numeradas.

Columna 2: aparece la magnitud de la corriente correspondiente a cada una de las desviaciones del galvanómetro. Como se Comentó anteriormente, para la época no había una definición oficial de la unidad de corriente. Se trata pues de una *unidad* definida por el mismo Joule.

Columna 3: Se registran los valores del calor generado por la corriente correspondiente.

No se especifica la unidad de calor empleado. Joule habla de grados de calor. De hecho, los valores registrados corresponden a los valores de la temperatura del agua, corregida. Se supone, con todo derecho, que el calor generado es proporcional a la temperatura registrada.

Columna 4: Por razones que omitimos, Joule hace una pequeña corrección al calor generado por la corriente inducida.

Columna 5: Se registra el calor generado, después de tomar en cuenta la corrección de la columna anterior.

Columna 6: Joule sospecha que el calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente inducida. La columna contiene los valores que confirman dentro cierto rango de aproximación dicha sospecha. Se trata de un descubrimiento importante que se conoce como ley de Joule: *La potencia eléctrica disipada por un resistor es proporcional al cuadrado de la corriente*. En ningún momento se explica cómo se generaron los valores de la columna. Los valores de la columna (6) confirman la hipótesis de Joule de que *el calor generado por la bobina de la máquina electromagnética, en condiciones parecidas, es proporcional al cuadrado de la corriente*.

5.2. El equivalente mecánico del calor

Después de haber comprobado con innumerables experimentos que la corriente inducida es la causa del calentamiento del agua y de que el calor generado es proporcional a al cuadrado de la corriente inducida, Joule pasa a medir la relación entre el calor generado, por medios puramente mecánicos, y el trabajo realizado por los pesos al descender como se muestra en la figura 5.1.

En lo que sigue, reproducimos el razonamiento de Joule, respetando en la medida lo posible, la terminología bastante primitiva, pero muy meritoria en su tiempo, si se comparan con nuestros conocimientos actuales. Al fin y al cabo, el contexto en el que se lleva a cabo la presente investigación es el histórico. Par mediados del siglo XIX, los conocimientos sobre la naturaleza del calor, de la corriente eléctrica, de la energía mecánica, etc. son muy incipientes.

(1) Sobre los platillos se colocan sendos pesos de cinco libras, 3 onzas. El dispositivo AB gira a 600 revoluciones por minuto. Los extremos del alambre de la bobina están conectados, se induce corriente en la bobina. La corriente en la bobina genera un campo magnético que se opone al campo magnético generado por el electroimán en forma de U, que en la figura se designa con la letra D

(2) Se abre el circuito de la bobina, no se induce corriente. Para conservar la velocidad de 600 revoluciones por minuto se requiere solamente un peso de 2 libras, 13 onzas, en cada platillo. Como no hay corriente inducida, no hay interacción entre los dos campos magnéticos, el del electroimán y el de la bobina. El peso de 2 libras y 13 onzas, en cada platillo, se emplea, no para inducir corriente, sino para vencer la inercia del dispositivo, el rozamiento entre sus partes, etc.

(3) De acuerdo con lo anterior, la causa de la corriente inducida y del calor generado no es el descenso de los dos pesos de 5 libras y 3 onzas cada uno sino la diferencia entre los pesos cuando el circuito de la bobina está cerrado y cuando está abierto. Por consiguiente el peso eficaz es de $2(5 \text{ lb } 3 \text{ oz}) - 2(2 \text{ lb } 13 \text{ oz}) = 10 \text{ lb } 6 \text{ oz} - 5 \text{ lb } 10 \text{ oz} = 4 \text{ lb } 12 \text{ oz}$ (Téngase en cuenta que $1 \text{ lb} = 16 \text{ oz}$)

(4) Durante el descenso de los pesos a rapidez constante, la corriente inducida, de acuerdo con la desviación del galvanómetro es de 0,983 unidades de corriente.

(5) Si se tiene en cuenta que el calor generado por la corriente inducida es proporcional al cuadrado de la corriente y se emplea la información proporcionada por la tabla 1, serie 2, columna 5, se puede calcular el calor generado por una corriente de 0,983 unidades de corriente

$$\frac{Q}{1,56} = \left(\frac{0,983}{0,902}\right)^2$$

$$\Rightarrow Q = 1,85 \text{ grados}$$

(6) Después de hacer las correcciones del caso, que omitimos, el calor generado es de 2,46 *grados*

(7) El calor generado por la corriente inducida se emplea en el calentamiento del cilindro de vidrio donde está la bobina, de la bobina y del agua en donde está inmersa la bobina. Como las capacidades calóricas del vidrio, del agua y del cobre son diferentes, se reducen a la capacidad calórica, por medios comunes a la calorimetría, conocidos desde el tiempo de Lavoisier. Por ejemplo, se puede mostrar fácilmente que la cantidad de calor para elevar la temperatura de 1,65 lb de cobre en un grado *Fahrenheit* es igual a la cantidad de calor para elevar la temperatura de 0,300 lb de agua en un grado *Fahrenheit*.

La siguiente tabla proporciona las capacidades calóricas de los elementos que intervienen en el experimento.

Tabla 5.3. Capacidades caloríficas

Elemento	Cantidad en libras	Capacidad calórica, en libras de agua
Tubo de vidrio	1,65 <i>lb</i>	0,300 <i>lb</i>
Agua	0,61 <i>lb</i>	0,610 <i>lb</i>
Bobina	1,67 <i>lb</i>	0,204 <i>lb</i>
Total	3,93 <i>lb</i>	1,114 <i>lb</i>

(8) Si se tiene en cuenta que, en la terminología de Joule, un grado de calor es el calor que corresponde a un grado de temperatura, entonces a 2,46 grados de calor corresponde 2,46 grados de temperatura. Ahora bien, el tubo de vidrio, el agua en el tubo de vidrio y la bobina, que están a la misma temperatura de 2,46 grados *Fahrenheit*, equivalen al calor de 1,114 libras de agua a 2,46 grados de temperatura, es decir, a

$$1,114 \times 2,46 = 2,74 \text{ grados de calor}$$

(9) Este calor, de 2,74 *grados*, fue generado por el descenso de un peso de 4 *Lb* 12 *oz* a lo largo de 517 *pies*.

Un grado de calor, en consecuencia, habría sido generado por el descenso de un peso de

$$\frac{4 \text{ lb } 12 \text{ oz}}{2,74} = 1,734 \text{ lb}$$

A lo largo de 517 *pies*

O lo que es equivalente, al descenso de 1,0 *lb* a lo largo de 896 *pies*

(9) Pero un cuerpo de 1,0 *lb* que desciende verticalmente 896 *pies* puede levantar verticalmente 1 *libra* a 896 *pies*. Por consiguiente, el calor que adquiere 1 *lb* de agua cuando su temperatura aumenta en 1 grado *Fahrenheit* equivale a la fuerza mecánica capaz de elevar un cuerpo de 1 *lb* de masa a la altura de 896 *pies*. Si se hace la conversión al sistema *M. K. S.*, el equivalente mecánico del calor, de acuerdo con este experimento, que es solo uno de muchos otros experimentos realizados por *Joule*, es de 4,8 J por gramo por grado centígrados, bastante alejado del valor actual de 4,19 *Julios por gramo por grado centígrado*, lo que no le resta en lo más mínimo el mérito histórico de haber el primer en intentar establecer la equivalencia entre calor y energía mecánica con experimentos supremamente ingeniosos.

5.3. Segundo Experimento: el calorímetro de paletas giratorias (1845)

Después de los experimentos con la máquina electromotriz, *Joule* continuó sus investigaciones con 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 orificios⁵⁹, de compresión y expansión de gases⁶⁰, 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 5.2.

⁵⁹ *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).

⁶⁰ 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.

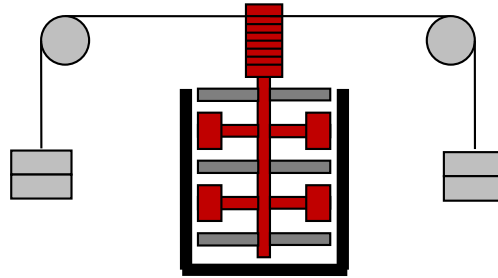


Figura.5.2. Sobre la existencia de una relación equivalente entre el calor y las formas ordinarios de potencia mecánica. Carta a los editores de la *Philosophical Magazine*, Manchester, agosto 6 de 1845.

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 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 1845⁶¹, 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 llevados a cabo a lo largo de más de 40 años ininterrumpidos, por diferentes procedimientos: con corrientes inducidas, con chorros de agua a través de orificios, con gases, etc.

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.

La equivalencia mecánica del calor. Resumen

(1) En la primera columna aparece el tipo de experimento

⁶¹ 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.

- (2) En la segunda columna se registra la equivalencia del calor necesario para calentar una libra de agua en un grado *Fahrenheit* en libras por pies
- (3) En la tercera columna aparece la equivalencia del calor necesario para calentar un gramo de agua en un grado centígrado en Julios
- (4) En la cuarta columna aparece la equivalencia mecánica del calor, según cálculos modernos.
- (5) En la última fila aparece el promedio de los diferentes valores obtenidos en cientos de experimentos. El resultado es de 4,3 julios por caloría pequeña, bastante cerca del valor de 4,1 julios por caloría pequeña

Tabla 5.4. La equivalencia mecánica del calor

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

5.4. Conclusión

El tema de este capítulo, *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 proceso⁶². 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*. La hipótesis de Joule, confirmada por innumerables experimentos entra en conflicto con la hipótesis de Carnot: si Joule tiene razón, el gran descubrimiento de Carnot, *el ciclo ideal*, carece de fundamento; si Carnot tiene razón, los resultados experimentales de Joule no son válidos. El Dilema es tan serio que un científico de tanta prestancia como Lord Kelvin⁶³ confiesa públicamente que no ve cómo se pueda resolver el dilema⁶⁴: Carnot o Joule.

⁶² Carnot muestra convincentemente que la potencia motriz es generada solamente por la “caída” del calor sin ninguna alteración en su cantidad.

⁶³ 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.

⁶⁴ Le correspondió a Clausius con su gran perspicacia teórica, quien en 1850 mostro como modificar la teoría de Carnot conforme a los resultados de Joule.

CAPITULO 6. CLAUSIUS: LA SOLUCIÓN AL DILEMA CARNOT-JOULE

Aunque el reconocimiento histórico a la reconciliación entre los experimentos de Joule y los razonamientos de Carnot, le correspondió a Clausius a través de su trabajo: “Sobre la Fuerza Motriz del Calor y sobre las leyes deducibles de ésta, concernientes a la naturaleza del mismo”, en el cual plantea que parece natural plantearse la existencia de una relación entre el calor consumido y el trabajo realizado. El mismo Clausius reconoce la importancia del trabajo de Thomson, recalcando la importancia de que este haya presentado y desarrollado con bastante claridad las ideas de Carnot, así como los obstáculos que insistentemente mostró como las fronteras que no permitían hacer compatible las dos teorías, abriendo el camino para que su sucesor extendiera sus reflexiones para la reconciliación final de las dos teorías.

Hacia el final del paper, Thomson hace notar que la afirmación que está a la base en la teoría de Carnot, acerca de que en una máquina una cierta cantidad de calor es transferido íntegramente de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, entra en contradicción con las observaciones realizadas por Joule, siendo este el límite de sus dificultades. Procede entonces a afirmar que bajo este panorama se podría llegar a requerir que la teoría del calor tenga que ser reconstruida sobre otros fundamentos. Para dar trámite y fluidez a sus inquietudes decide continuar trabajando con el axioma de Carnot como si este estuviera universalmente establecido.

Thomson advierte que la idea de Carnot de que el calor es transferido íntegramente del cuerpo caliente al frío es errónea, pero esto no invalida para nada su razonamiento, en particular el hecho de que la máquina que debe proporcionar el máximo rendimiento es aquella que se puede hacer operar en sentido contrario, siendo esta la condición para que tanto la máquina como sus alrededores vuelvan a su estado inicial. Por otro lado, Thomson le otorga a los trabajos de Humphrey Davy, relacionados con la producción de calor por fricción, el carácter de origen de la teoría dinámica. Haciendo énfasis en que el calor se propaga en el vacío, y que éste, denominado calor radiante y descubierto por Herschel en 1800, está dotado de las mismas propiedades de los fenómenos ondulatorios, en particular, la polarización.

También hace que los experimentos de Joule y Mayer sean considerados prioritarios y la base de la demostración de la inmaterialidad del calor. En particular, hace que Joule sea reconocido como el gran científico que, desde niño mostró grandes habilidades para la mecánica.

En 1851 Thomson se convirtió a la nueva teoría y escribió un ensayo sobre el mismo tema; en este nuevo paper, Lord Kelvin probó de manera diferente todos los resultados que Clausius había obtenido por los procedimientos y análisis descritos a lo largo de este capítulo y, además mostró que Clausius había proporcionado solamente pruebas para un ciclo infinitesimal y procedió a ampliar sus resultados a un ciclo infinito.

Entonces, por su parte, Thomson realizó análisis directos y concisos, y tuvo la capacidad de comprensión y fluidez para expresar sus resultados en palabras y frases que eran fáciles de comprender, tanto que la historia ha mostrado que él fue el intérprete y defensor de esta teoría, trabajo que realizó con mucha entrega y dedicación, a pesar de las dificultades de la época. Hoy en día se tiene la duda si los matemáticos hubiesen podido a llegar a entender la Teoría sin la ayuda de los trabajos de Thomson.

6.1. William Thomson

William Thomson (1824 – 1907) o Lord Kelvin, como es más conocido, fue uno de los más brillantes científicos del siglo XIX. William ingreso a la Universidad a muy temprana edad, cuando tan solo tenía diez años, su ingreso realmente lo hace a manera de preparación o entrenamiento, ya que solo en 1838, cuando ya cuenta con la edad de catorce años, logra dar comienzo a su carrera. Durante 2 años, entre 1838 y 1839, Lord Kelvin estudió Astronomía y Química, y al año siguiente tomo cursos de Física, conocidos en esa época como cursos de filosofía natural, estos cursos incluyeron estudios sobre el calor, electricidad y magnetismo.

Uno de sus primeras investigaciones fue sobre la forma de la Tierra, ensayo que lo hizo merecedor de la medalla de oro de la Universidad de Glasgow cuando solo tenía 15 años. Hacia 1840 Thomson tuvo la fortuna de leer por primera vez la Teoría Analítica del Calor de Fourier, siendo este uno de los libros de la gran colección de libros franceses sobre matemática y física que había adquirido la Universidad de Glasgow.

En este año, Thompson llega a familiarizarse tan a fondo con los fenómenos del calor que busca su ingreso a la Universidad de Cambridge, en donde en 1842 publica un artículo: “Sobre el movimiento uniforme del calor y su conexión con la teoría matemática de la electricidad”. Finalmente después de su graduación, y debido a su gran interés por los trabajos desarrollados en Francia, Thomson se traslada a Paris⁶⁵, donde trabaja en el laboratorio de Henri-Víctor Regnault, hecho que marca su contexto de análisis matemático a la Teoría de Carnot.

Los trabajos que desarrolló entre 1848 y 1852 lo han hecho merecedor de ostentar el título de ser uno de los grandes fundadores de la Termodinámica. Sus investigaciones se basaron en los trabajos desarrollados por Sadi Carnot, trabajos que tuvieron reconocimiento en manos de Clapeyron⁶⁶.

Para esa época Thomson se sentía absolutamente convencido de la exactitud de la teoría de Carnot y se encontraba complacido con su nivel de desarrollo explicativo, a tal punto que se convirtió en su defensor. La presentación de Joule ante la Real Sociedad llama mucho su atención y, a pesar de la aparente distancia que existía entre los planteamiento de Joule y Carnot, dedicó varios años a investigar qué tan cierta era la diferencia en términos de los planteamientos y argumentos. Este estudio se ve reflejado en uno de los más grandes aportes que hace al desarrollo de la Termodinámica, el libro que publica en 1872, titulado: “la Teoría Dinámica del Calor”, libro en el cual muestra la primera reconciliación que se conoce de las Teorías de Carnot y Joule, llevándolas a una sola teoría de gran trascendencia hasta nuestros días.

Su segundo gran aporte fue el establecimiento de la escala de temperatura absoluta que lleva su nombre. Esta escala absoluta es de vital importancia en el desarrollo de las ciencias, ya que por primera vez en el avance de las investigaciones, se contó con una escala independiente de las propiedades de la sustancia empleada y del instrumento utilizado para medir la temperatura. Durante su carrera como científico, Lord Kelvin publicó un poco más de 600 artículos, y fue nombrado miembro de la Royal Society de Londres en 1851, al igual que fue miembro de la Royal Society de Edinburgh y de la Sociedad Británica para el Avance de la ciencia. Fallece en 1907 en Escocia.

6.2. El Dilema Carnot - Joule

En toda máquina térmica se debe cumplir un requisito fundamental: que las condiciones de presión, volumen, temperatura, etc., del agente de trabajo (gas, vapor de agua, etc.) sean, al final de proceso, idénticas a las condiciones iniciales. Si no es así, no se puede hablar con propiedad de máquina térmica y menos aún construir una teoría general, como lo hace, por ejemplo, Carnot cuando

⁶⁵ Su estancia en Francia le permitió tener discusiones profundas con Biot, Cauchy, Liouville, Dumas y Stum.

⁶⁶ Quien en su estudio juicioso y detallado del paper de 1824 logra interpretar en la gráfica de una tarjeta del indicador de una máquina de vapor, la esencia de la teoría presentada por Carnot extendiéndola a una primera aproximación analítica de los planteamientos hechos.

describe los procesos de una máquina térmica, donde la eficiencia es la máxima eficiencia posible. Ahora bien, parece evidente que las condiciones de presión, volumen y temperatura de un gas dependen de la cantidad de calor que contiene el agente de trabajo, de tal manera que si aumenta ésta, varía al menos una de las condiciones, por ejemplo, la temperatura o viceversa, cuando varía una cualquiera de sus condiciones, varía también el contenido inicial de calor. Este axioma es formulado por Carnot en una nota al pie de página, en la página 19 de la edición que sirve de base a esta investigación:

Suponemos tácitamente en nuestra demostración que cuando un cuerpo ha experimentado cualquier cambio, y que cuando después de cierto número de transformaciones retorna precisamente a su estado original, es decir, al estado considerado con respecto a la densidad, a la temperatura, al modo de agregación, etc., digo que se encuentra que este cuerpo contiene la misma cantidad de calor que contenía al comienzo o también que las cantidades de calor absorbidas o liberadas en estos diferentes transformaciones están compensadas exactamente. Este hecho nunca se ha puesto en duda.

En la figura 6.1 se representa la serie de transformaciones que experimenta un gas a partir del estado designado con la letra A. De hecho, las transformaciones son las de un ciclo ideal, lo que no afecta para nada el razonamiento. En el estado A, el agente de trabajo tiene un volumen, presión y temperatura determinada. Entre A y B experimenta una expansión isotérmica con la admisión de cierta cantidad de calor desde la caldera. El agente conserva su temperatura, pero varía su presión y volumen. De B a C, experimenta una expansión adiabática, varía su temperatura, presión y volumen, sin la admisión o eliminación de calor. De C a D experimenta una compresión isotérmica, con desalojo de cierta cantidad de calor al condensador. De D a A, el agente experimenta una compresión adiabática, sin admisión o desalojo de calor. El agente retorna a las condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura iniciales. De acuerdo con el axioma de Carnot, la cantidad de calor que contenía el gas inicialmente permanece constante. De aquí se concluye que el calor que ingresa al agente desde la caldera es exactamente igual al calor que sale del agente al condensador.

En otras palabras, el trabajo realizado por la máquina térmica se debe a la simple caída de una cantidad de calor entre dos temperaturas, de una manera semejante a como en la rueda de molino, el trabajo mecánico se debe a la caída de agua entre dos niveles. Y así como en el molino la máxima eficiencia entre dos niveles dados se da cuando no hay pérdida de agua en el proceso, así en la máquina térmica, la máxima eficiencia se da cuando no hay pérdida de calor en el proceso. Es decir: cuando la transferencia de calor se lleva a cabo entre temperaturas iguales; si las temperaturas fueran diferentes, parte del calor se emplearía en igualar la temperatura del agente con la fuente de calor, sin realización de trabajo.

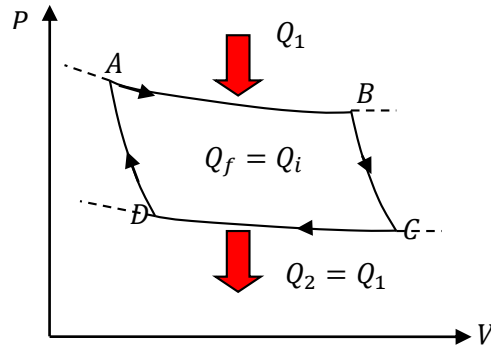


Figura 6.1 Requisito fundamental de Carnot.

Si un gas regresa a las condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura, la cantidad de calor que ingresa al gas es igual a la cantidad de calor que sale, por lo tanto la cantidad de calor final es igual a la cantidad de calor inicial: $Q_2 = Q_1$

Sin embargo, la hipótesis de Carnot de que el trabajo realizado por la máquina térmica se debe exclusivamente a la caída de calor entre dos temperaturas, sin pérdida de calor, entra en conflicto con la hipótesis de Joule, confirmada por innumerables experimentos, como se expone en el capítulo IV, dedicado a Joule, de que siempre que hay trabajo mecánico por medios térmicos hay una pérdida de cierta cantidad de calor, en una proporción perfectamente definida. La hipótesis de Joule entra en contradicción aparente con el axioma de Carnot de que la cantidad de calor que posee inicialmente el agente de trabajo permanece constante al final del ciclo, ya que las condiciones iguales de presión volumen y temperatura son iguales. Si Joule tiene razón, entonces la existencia del ciclo ideal propuesto por Carnot carece completamente de fundamento.

La figura 6.2 representa la consecuencia de la hipótesis de Joule en el razonamiento de Carnot. La cantidad de calor transferido al foco frío o condensador es menor que la cantidad transferida de la caldera al agente de trabajo, en consecuencia, el contenido final de calor del agente de trabajo es mayor que el contenido inicial: las condiciones finales del agente no pueden ser iguales a las condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura: el ciclo termodinámico, como la serie de transformaciones en las que un agente retorna a las condiciones térmicas iniciales, no es teóricamente posible: El tratado de Carnot sobre la potencia motriz del fuego es una especulación sin fundamento científico.

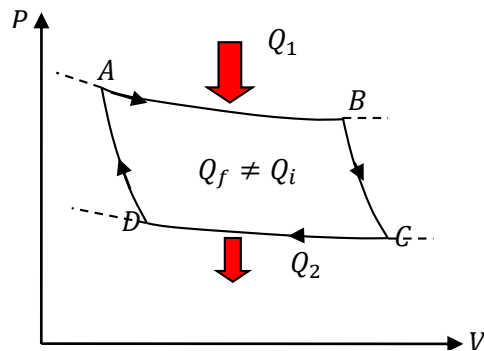


Figura 6.2. La hipótesis de Joule.

En una máquina térmica, el contenido de calor final es menor que el contenido de calor inicial a causa del trabajo mecánico realizado; las condiciones finales no son las mismas que las condiciones iniciales: El ciclo ideal no es posible.

6.3. Rudolf Julius Emmanuel Clausius

Rudolf Clausius (1822-1888) fue un físico alemán. Clausius se licenció en la Universidad de Berlín en 1844, y se doctoró en la Universidad de Halle (Sajonia), en 1848. Fue profesor de física Escuela Real de Artillería e Ingeniería de Berlín (1850 - 1855), y en las Universidades de Zúrich (1855 - 1867), Würzburg (1867) y Bonn (1869).

Tras descubrir un poco por azar la olvidada obra de Nicolas Léonard Sadi Carnot, *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*, comprendió rápidamente el alcance y la difundió entre los físicos de su época. También participó después en la elaboración de la segunda ley de la termodinámica (1850) año en el cual acuñó el concepto de entalpía, inventó el concepto de entropía en 1865.

El trabajo de Clausius se centró en el desarrollo de la teoría de los gases y en la formulación adecuada del segundo principio de la termodinámica. Además se destacó por su notable desarrollo de teorías antes que a la experimentación. Su concentración en temas relacionados con el calor le permitió establecer los fundamentos de la termodinámica. En 1850 publicó una contribución incipiente en su trabajo en termodinámica *Über die bewegende Kraft de Wärme*, aunque en trabajos anteriores ya se encuentran las bases de sus ideas que le llevarían a rechazar la teoría del calórico en favor del nuevo principio de equivalencia calor/trabajo de Joule. Pero la diferencia entre Clausius y los demás científicos era que su tratamiento pretendía ser teóricamente más sofisticado (Ordoñez, 2006).

El principal problema con el que se enfrentó Clausius, era la compatibilidad entre la equivalencia calor/trabajo y la función Carnot/Clausius, que en principio se basaba en la teoría del calórico. En un segundo artículo, publicado en 1854, *Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie* relacionó la nueva función que después denominó entropía. Entonces determinó al nuevo teorema simplemente “principio de equivalencia entre transformaciones”. Para establecer el teorema simplemente concibió un ciclo que involucra sólo dos tipos de operaciones: una conversión de calor en trabajo a una temperatura y una transferencia de calor de una temperatura más alta a otra más baja (Ordoñez, 2006).

6.4. La solución de Clausius

Cuando un gas se expande adiabáticamente, la temperatura disminuye porque parte del calor en el gas es convertido en trabajo; para prevenir la caída de la temperatura en la expansión isotérmica, es necesario que una cantidad de calor igual sea restaurada al gas durante el proceso desde el foco caliente al gas o agente de trabajo. En consecuencia, todo el calor absorbido durante la expansión isotérmica es convertido en trabajo, permaneciendo el contenido del gas inalterado durante este proceso.

Lo previamente mencionado, es la primera operación en el ciclo de Carnot para un gas, es decir, la expansión isotérmica $A \rightarrow B$ que se muestra en la figura 6.1, en donde todo el calor que es extraído de la fuente, el cual llamaremos Q_1 , es inmediatamente convertido en trabajo; trabajo que es representado por el área sombreada en la figura 6.3.

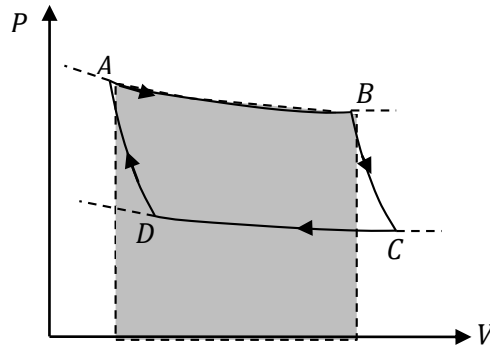


Figura 6.3. Expansión Isotérmica.

El área sombreada representa el trabajo realizado por el gas durante la expansión isotérmica entre el estado A y el estado B. Clausius muestra que ese trabajo es equivalente al calor transferido al gas desde la fuente o foco caliente.

El trabajo realizado por el gas en este proceso se puede calcular midiendo el área debajo de curva isotérmica o calculando ésta por medio de una integral a partir de la ecuación de la curva isotérmica, ecuación que Clausius logró determinar. El calor transferido del foco caliente al gas se puede calcular a partir del trabajo realizado por el gas durante este proceso mediante el equivalente mecánico de calor, medido experimentalmente por Joule.

Las cantidades de trabajo realizado a lo largo de las dos curvas adiabáticas $B \rightarrow C$ y $D \rightarrow A$ son representadas por las áreas sombreadas mostradas en la figura 6.4. El trabajo bajo bc es hecho por el gas a expensas de su mismo calor, con una consecuente caída en la temperatura. El trabajo hecho bajo $D \rightarrow A$ es hecho sobre el gas, lo que supone una adición equivalente de calor, produciéndose un incremento en la temperatura. Sin embargo, las dos adiabáticas descansan sobre el mismo par de isoterma, y en consecuencia, tanto el trabajo como el calor en ambos procesos son equivalentes. Clausius demuestra que el trabajo realizado en un proceso adiabático, ya sea de expansión ya de compresión es proporcional a la diferencia de la temperatura en las que tienen lugar los procesos adiabáticos.

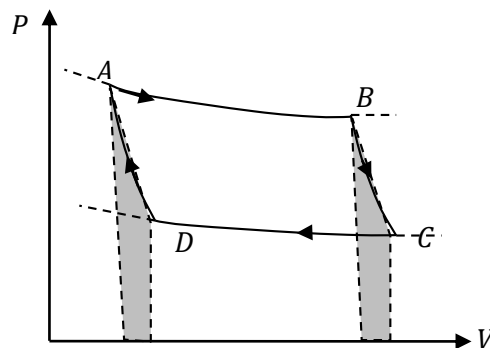


Figura 6.4 Procesos adiabáticos.

El área sombreada representa el trabajo realizado por el gas durante la expansión adiabática entre los estados B y C y trabajo realizado sobre el gas durante la compresión adiabática entre los estados D y A. Clausius muestra que el trabajo realizado en ambos procesos es numéricamente igual.

La temperatura es incrementada a lo largo de $D \rightarrow A$, por la misma cantidad que decrece a lo largo de $B \rightarrow C$ y como el calor específico de un gas no cambia con el volumen (como es demostrado por el experimento de la libre expansión) ni con la temperatura (como lo muestran las mediciones

realizadas por Regnault), el calor desarrollado o producido en cada caso es el mismo, al igual que el trabajo realizado. Las dos áreas sombreadas de las adiabáticas son iguales, de tal forma que entre si se cancelan, ya que estas son simplemente cambios en la temperatura.

Finalmente, el trabajo hecho sobre el gas durante la compresión isotérmica $C \rightarrow D$, es mostrado por el área sombreada en la figura 6.5.

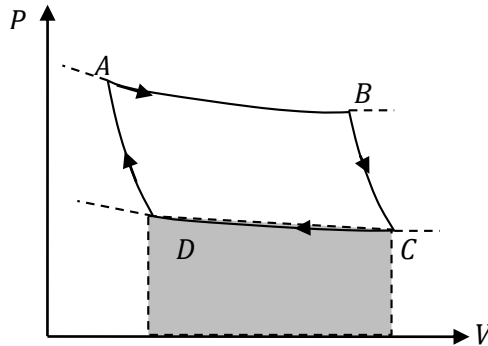


Figura 6.5 Compresión isotérmica.

El área sombreada representa el trabajo realizado sobre el gas durante la compresión isotérmica entre los estados C y D. Clausius muestra que el trabajo realizado sobre el gas es equivalente al calor cedido por el gas al foco frío.

Este trabajo es convertido inmediatamente en calor, el cual llamaremos Q_2 y es entregado al refrigerador. Es evidente, de acuerdo con los diagramas 6.3 y 6.5, que Q_2 es menor que Q_1 , es decir, el calor transferido al refrigerador es menor que el que fue extraído de la fuente. La diferencia ha sido convertida en trabajo, y este trabajo se representa como es habitual a partir de Clapeyron por el área encerrada por el ciclo, como se muestra en la figura 6.6.

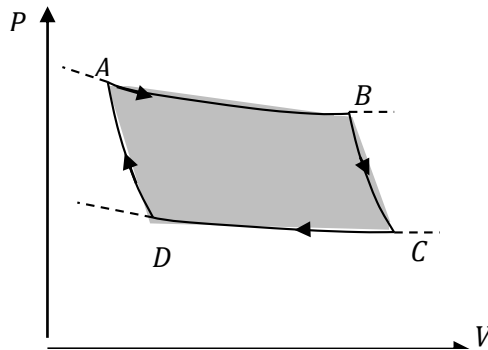


Figura 6.6. Trabajo exterior realizado por el gas durante todo el ciclo.

El área sombreada representa el trabajo realizado por el gas durante el ciclo: expansión isotérmica, expansión adiabática, compresión isotérmica y compresión adiabática. Clausius muestra que a pesar de que la realización de trabajo supone una pérdida de energía calórica, de acuerdo con Joule, el contenido de calor inicial permanece constante, de acuerdo con el postulado de Carnot.

Una característica de este ciclo, es que no se produce ningún cambio en el contenido de calor a lo largo de las isotermas, y el cambio ocurrido a lo largo de la adiabática $B \rightarrow C$ es cancelado por la adiabática $D \rightarrow A$ que actúa en sentido opuesto.

Por lo tanto, cuando el gas regresa nuevamente a A , tiene el mismo contenido de calor que cuando comenzó el ciclo, cumpliéndose así el requerimiento establecido por Carnot, referente a que la sustancia que se encuentra trabajando no sufra ningún cambio permanente. Estos son los resultados de la aplicación de la primera ley.

Por otro lado, para la aplicación de la segunda ley de la Termodinámica, Clausius hizo uso inteligente de un ciclo infinitesimal, recurriendo al mismo análisis ya presentado para el ciclo de un gas o ciclo finito.

Para aplicar la primera ley, Clausius hizo uso de un ciclo infinitesimal. Mostraremos su demostración aplicándolo a un ciclo finito. Las dos isotermas $A \rightarrow B$ y $C \rightarrow D$ descansan entre el mismo par de adiabáticas. Habiendo determinado la ecuación de la curva adiabática, Clausius fue capaz de probar que el calor absorbido o entregado a lo largo de cualquier par de isotermas es proporcional a la temperatura absoluta a la cual este es absorbido o entregado.

Este resultado es representado por la siguiente proposición:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Donde T_2 y T_1 son las temperaturas absolutas de las isotérmicas baja y alta respectivamente. Si restamos a ambos lados la unidad y se reduce a común denominador, entonces se obtiene

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} - 1 = \frac{T_2}{T_1} - 1$$

$$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_1}$$

$$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_1}$$

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Donde $Q_1 - Q_2$ es la cantidad calor convertido en trabajo y si observamos con detenimiento la ecuación, podemos ver que Q_1 es proporcional a la cantidad de calor extraído desde la fuente, al igual, que a la diferencia en la temperatura entre la fuente y el refrigerador o foco frío o la “caída del calor”, como dijo Carnot.

Pero esto también es inversamente proporcional a la temperatura absoluta de la fuente, donde T_1 se encuentra en el denominador. Este análisis es realmente novedoso y creativo, es una manera totalmente nueva de analizar la función de Carnot, forma de análisis y reflexión buscado desde mucho tiempo atrás.

Recordemos que la función de Carnot establece que: “La cantidad de trabajo obtenido desde una cantidad dada de calor y una caída de temperatura también conocida, disminuye a medida que la temperatura de la fuente aumenta”, por tanto, resulta muy sencillo determinar que el trabajo obtenido es inversamente proporcional a la temperatura absoluta de la fuente.

Ya que Q_1 es el calor extraído de la fuente (es decir el combustible), $Q_1 - Q_2$ es la porción de este calor que es convertido en trabajo. Por tanto, $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ es la razón de lo que llega, es decir, la *eficiencia* de un ciclo. Lo cual es igual a $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, esta razón representa la caída de la temperatura y la temperatura absoluta de la fuente.

Si observamos con detenimiento las dos expresiones anteriores, podemos concluir que estas fracciones siempre serán menor que 1, es decir, la eficiencia siempre será menor que el 100 %, a menos que T_2 sea igual a cero.

No podemos obtener que todo el calor extraído de la fuente se convierta en trabajo, a menos que el refrigerador o fuente fría se encuentre a una temperatura de cero absoluto, y como esto es imposible, así sea en una máquina perfecta, siempre obtendremos una eficiencia menor al 100 %, de hecho lo usual es que sea mucho menor. Y aunque en principio se podría pensar que la conversión de calor a trabajo está cargada de desventaja teórica, es necesario más análisis que permitan analizar mejor la situación.

6.5. Representación gráfica de la solución de Clausius

La solución de Clausius contiene las siguientes proposiciones:

- 1) En la expansión isotérmica $A \rightarrow B$, el calor absorbido es simultáneamente transformado en trabajo mecánico. El contenido de calor del agente no varía.
- 2) En la expansión adiabática $B \rightarrow C$, parte del calor contenido por el gas se convierte en trabajo exterior, la cantidad de calor inicial del agente de trabajo, disminuye cierta cantidad, que luego es recuperada en la compresión adiabática $D \rightarrow A$, donde se realiza trabajo sobre el gas.
- 3) En la compresión isotérmica $C \rightarrow D$, se realiza trabajo sobre el agente, aumenta la cantidad de calor pero éste es simultáneamente transferido al condensador, de manera que la cantidad de calor inmediatamente anterior no varía. Esta cantidad es algo menor por el calor absorbido por el gas a causa de la expansión adiabática, como se mencionó en el rubro 2)
- 4) En la compresión adiabática, el trabajo realizado sobre el agente, se transforma en calor en una cantidad exactamente igual a la cantidad perdida por el agente en la expansión adiabática. Clausius demuestra que el trabajo que interviene en esos dos procesos es exactamente igual, no solamente de una forma cualitativa, sino analíticamente, demostración que omitimos en este momento.
- 5) En conclusión: La cantidad inicial de calor del agente permanece constante, a pesar de la hipótesis de que siempre que un agente térmico realiza trabajo mecánico se pierde una cantidad determinada de calor, de acuerdo con la proposición de Joule de que el calor y el trabajo son equivalentes.

La secuencia propuesta de proposiciones se representa por medio de la figura 6.7.

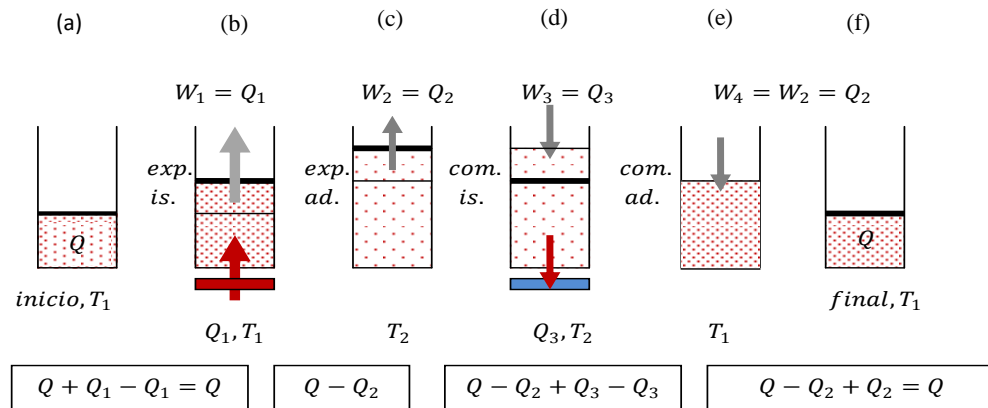


Figura 6.7. La cantidad del calor que se pierde se vuelve a recuperar.

El dibujo representa las transformaciones que experimenta un gas encerrado en un cilindro. La cantidad de calor que entra o sale del gas se representa por una flecha roja en la parte inferior del cilindro. La cantidad de trabajo realizado se representa así mismo por medio de una flecha gris en la parte superior del cilindro. Si el gas realiza trabajo exterior, la flecha está dirigida hacia arriba, si se realiza trabajo sobre el gas, la flecha se dirige hacia abajo.

- (a) Estado inicial: el agente (gas, vapor de agua) contiene una cantidad determinada de calor Q .
- (b) El agente se pone en contacto con el foco caliente y mientras absorbe calor, a temperatura constante, realiza trabajo de tal manera que la cantidad de calor Q permanece constante.
- (c) El agente se expande adiabáticamente, realizando una cantidad determinada de trabajo exterior a expensas de la cantidad inicial de calor, de manera que el calor inicial al final del proceso no es Q , sino $Q - Q_2$, como se muestra en la figura.
- (d) Compresión isotérmica. Se realiza trabajo sobre el agente, éste tiende a aumentar su temperatura, pero simultáneamente a la compresión, libera una cantidad equivalente de calor al foco frío o condensador, de manera que la cantidad $Q - Q_2$ permanece inalterada.
- (e) Compresión adiabática. Se realiza trabajo sobre el agente, de acuerdo con el principio de la equivalencia del trabajo y del calor, el agente aumenta su calor interno. Clausius demuestra que el trabajo realizado en este proceso es exactamente igual a la expansión adiabática analizada en (c), por consiguiente, al finalizar el proceso, la cantidad calor interno, al final, es igual a la cantidad inicial, cumpliéndose con el axioma de Carnot, mencionado en su momento.

6.6. Recapitulación

La equivalencia mecánica del Calor, demostrada experimentalmente por Joule, plantea dos problemas teóricos íntimamente ligados: 1) Si el trabajo realizado por una máquina térmica supone necesariamente una pérdida de calor, ¿cómo entonces garantizar que las condiciones finales de presión volumen y temperatura del agente de trabajo sean iguales, como debería ser en un ciclo térmico que merezca el nombre de tal? 2) Si de acuerdo con Joule, la realización de trabajo supone una pérdida de calórico, ¿cómo entonces reconstruir, a partir de una hipótesis diferente a la de Carnot, una teoría sobre la máquina térmica comparable a la teoría propuesta por Carnot, que había sido confirmada por innumerables experimentos?

Clausius, en su Monografía sobre la Potencia Motriz del Calor responde a ambas cuestiones. A la primera por medio de una hipótesis subsidiaria que expondremos a continuación, a la segunda, por medio de un tratamiento analítico que no entra dentro del propósito de esta investigación, a pesar de indiscutible importancia histórica.

El propósito de esta investigación tiene que ver con la primera cuestión: la conciliación entre la hipótesis de Carnot, de que las condiciones de presión, volumen y temperatura de un gas están determinadas por la cantidad de calórico que contiene el gas, de manera que si el contenido varía, varían dichas condiciones, y la hipótesis de Joule de que la realización de cualquier trabajo mecánico supone la consunción de cierta cantidad de calórico.

La solución a la primera cuestión ha sido expuesta a lo largo de este capítulo: El calórico que entra a la máquina térmica durante la expansión isotérmica se va convirtiendo simultáneamente en trabajo; el trabajo que se realiza sobre el agente de trabajo en la compresión isotérmica, se va transfiriendo en forma de calórico al foco frío. Como el trabajo exterior que se realiza durante la expansión adiabática es igual al trabajo que se realiza sobre el gas (agente de trabajo) en la compresión adiabática, entonces el contenido del calórico del gas permanece inalterado en todo el proceso, cumpliendo de esta forma con la hipótesis o axioma de Carnot de que a condiciones iguales, en un mismo agente, igual contenido de calórico.

Solo nos queda justificar la solución propuesta haciendo referencia explícita al texto de Clausius en la monografía citada, lo que hacemos a continuación:

Hipótesis subsidiaria: *Los gases muestran varias relaciones, especialmente en la relación expresada por la ley de Mariotte y Gay Lussac, entre volumen presión y temperatura, una regularidad tan grande de comportamiento que estamos naturalmente inclinados a tomar el punto de vista de que las atracciones mutuas de las partículas que actúan dentro de los cuerpos sólidos y líquidos, no actúan más en los gases, de manera que en el caso de otros cuerpos, el calor que produce la expansión debe superar no solamente la presión externa, sino la tracción interna; en el caso de los gases, esto tiene que ver solamente con la presión externa. En este caso, pues, durante la expansión de un gas, tanto calor se vuelve latente como se emplea en realizar trabajo externo. No hay, además, ninguna razón para pensar que un gas, si se expande a temperatura constante, contenga más calor libre que antes. Si se admite esto, tenemos la ley: un gas permanente, si se expande, a constante temperatura, toma solamente tanto calor como se consume haciendo trabajo exterior durante la expansión. Esta ley es probablemente verdadera para cualquier gas con el mismo grado exactitud a la alcanzada por la aplicación a éste de la ley de M y G . (Sadi Carnot, Reflection on the Motive Power of Fire, pag 128, Dover Publications. 1988*

La ley formulada en el texto: *un gas permanente, si se expande a constante temperatura, toma solamente tanto calor como se consume haciendo trabajo exterior durante la expansión, contiene la solución de Clausius al Dilema entre Carnot y Joule, que ha sido el tema general de la presente investigación.*

CAPITULO 7. RECAPITULACIÓN

A continuación se presentan, a manera de reflexión final, las conclusiones obtenidas a lo largo de los seis capítulos que hacen parte del cuerpo de la presente tesis doctoral, cuyo propósito se encaminó en dos direcciones: a) presentar, a manera de aporte al campo de la enseñanza de las ciencias, algunos elementos de la pedagogía natural, discusión que se ha desarrollado al interior de la línea de investigación de la *elaboración de los conceptos científicos*; b) proponer un caso de reconstrucción conceptual a partir de un problema histórico, la aparente contradicción entre la hipótesis de Carnot y los experimentos de Joule sobre la equivalencia mecánica del calor.

Parece adecuado comenzar haciendo explícita las dos ideas que han guiado la investigación. La primera, es la innegable *importancia de la historia* en la enseñanza de las ciencias, entendiéndose esta como la reconstrucción del camino que ha seguido el espíritu humano en la soluciones de ciertos problemas científicos. Esta historia problemática la hemos designado con el nombre de *pedagogía natural*, y se ha justificado su existencia a partir de cuatro postulados. *Primer postulado*: la historia de la ciencia es sí misma es una pedagogía de la ciencia; *segundo postulado*: hay dos tipos de problemas, los naturales y los artificiales; *tercer postulado*: la comprensión admite multitud de niveles desde el más superficial al más profundo, y que nadie sabe en qué nivel de comprensión se encuentra hasta tanto no descienda a un nivel más profundo; *cuarto postulado*: los conceptos se elaboran, tanto, por parte de quien los aprende, como de quien los enseña.

La segunda idea, se fundamenta en el hecho de que uno de los grandes problemas de la enseñanza es su *artificialidad*, que se puede definir como la separación entre los temas de la clase y los temas de la vida. Para hacer más naturales los problemas, especialmente a nivel universitario, la historia es posiblemente el medio más adecuado para hacer la enseñanza más natural. En el caso de la presente investigación, el problema central es un problema alrededor del cual se mueven personajes reales, célebres por su contribución a la construcción de las ciencias.

Desde el punto de vista de la Física, el problema, objeto de la presente investigación, es la aparente contradicción entre la hipótesis de Carnot de que el calórico no disminuye al pasar de una temperatura mayor a una temperatura menor en la máquina térmica, y la hipótesis de Joule de que sí disminuye, y que esta disminución es proporcional al trabajo realizado por la máquina. Desde el punto de vista pedagógico, el desafío para el profesor es cómo hacer que un problema, aparentemente artificial, se convierta en un problema fundamental para la comprensión de la segunda ley de la termodinámica. Nuestra hipótesis es que el enfoque histórico proporciona elementos de naturalidad, vitalidad y espontaneidad que no proporciona el enfoque artificial.

El primer capítulo presenta la distinción entre la Pedagogía natural y las Pedagogías artificiales, fundamentado sobre la idea de que un problema se puede afrontar de innumerables formas, todas igualmente justificadas, pero solo hay una forma de afrontar un problema *naturalmente*, a través de la *reconstrucción* de la discusión y de su solución en y a través de la Historia. La historia de la ciencia es en sí misma una pedagogía de la ciencia, por tanto, no se trata de una historia anecdótica, sino de una *historia problemática*, centrada en la solución de determinado problema. Se entiende entonces que desde el punto de vista de la *elaboración de los conceptos*, hay dos tipos de problemas, los *naturales* y los *artificiales*, y que desde el punto de vista de la enseñanza, son preferibles los primeros a los segundos.

Un problema natural es aquel que se formula teniendo en cuenta el contexto histórico en el cual aparece, en contraposición a los problemas artificiales que prescinden de dicho contexto. Su comprensión admite multitud de niveles desde el más superficial al más profundo, esta profundización se lleva a cabo a través de la solución de problemas de orden natural. A partir de la solución de estos problemas, la enseñanza y el aprendizaje se entienden como procesos de *refinamiento* de los conceptos, desde el nivel más *superficial* al más *profundo*.

La historia problemática de la Ciencia y de la Física en particular es, desde el punto de vista de la Línea de Investigación, *La Elaboración de los conceptos Científicos*, un método pedagógico supremamente valioso, no solamente para transmitir la *materia* de conocimiento, sino su *espíritu*, que es el espíritu de la curiosidad y de la sorpresa.

A partir del segundo capítulo y hasta el sexto, se presenta el problema central de la investigación que tiene que ver con la conciliación entre las hipótesis de Carnot y 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. 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 o Lord Kelvin, un notable físico del siglo XIX, reconoce públicamente que no sabe cómo se pueda 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.

Desde el punto de vista teórico, y dentro del contexto de la presente investigación, las innovaciones de Watt prepararon el terreno para que S. Carnot se planteara por primera vez en la historia de las ciencias el problema de la eficiencia de la máquina térmica, entendiéndolo por máquina térmica todo dispositivo que realiza trabajo por intermedio del calor.

Watt tiene el mérito histórico de haber mostrado la necesidad de dos focos, uno caliente, la caldera y otro frío, el condensador. Carnot supone que el trabajo se debe precisamente a la caída del calor entre estos dos focos, el caliente y el frío, de una manera semejante a como el trabajo generado por un molino de agua se debe a la caída del agua de la represa al estanque. Partiendo de esta hipótesis, demuestra que el trabajo realizado es proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos focos, preparando el terreno para la posterior formulación de la segunda ley de la termodinámica.

Aunque Carnot no se declara explícitamente partidario de la hipótesis del calor como sustancia, es evidente que esta teoría influyó de una manera decisiva en el empleo del molino como modelo mental de la máquina térmica. Así como el agua al descender mueve la rueda del molino haciendo que ésta realice cierto trabajo, así el calórico, al descender de la caldera al condensador, mueve la máquina térmica haciendo que ésta realice trabajo. Conviene llamar la atención sobre el hecho de que Joule simpatiza más con la teoría del calor como energía cinética, una especie de vibración, como sostienen los grandes científicos ingleses, que con la teoría del calor como sustancia, como sostienen los científicos del continente, especialmente franceses.

Los resultados experimentales de B. Thomson o Conde de Rumford, que no se debe confundir con W. Thomson o Lord Kelvin, significaron un duro golpe a los defensores del modelo sustancial del calor y un argumento supremamente sólido para los defensores del modelo vibratorio. Sin embargo, los defensores del calórico no se dieron por vencidos y recurrieron a todo tipo de elucubraciones para interpretar los resultados de los experimentos de Thomson, como la suposición de que el calor generado no era más que la conversión del calor latente en calor sensible, de acuerdo con la hipótesis de J. Black. El argumento más poderoso a favor de la hipótesis del calor como vibración, según el mismo Thomson, era la característica inagotable de la producción de éste, dependiente solamente del trabajo de fricción realizado por la fresa sobre el bloque de bronce. Además, otros experimentos, que

no se han comentado, mostraron que la cantidad de calor generado, en función del tiempo, no disminuye gradualmente como se supone que sucedería si por hipótesis el calor fuera una sustancia adicional a la sustancia que constituye el cuerpo del cañón, el bronce: ésta se iría agotando gradualmente, lo que no sucede en el experimento en cuestión.

Carnot sentó las bases teóricas para que más tarde Rudolf Clausius, 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 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 Joule 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 esta investigación.

La equivalencia mecánica del calor, está íntimamente relacionado con el tema central de esta investigación: *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. 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*. La hipótesis de Joule, confirmada por innumerables experimentos, entra en conflicto con la hipótesis de Carnot: si Joule tiene razón, el gran descubrimiento de Carnot, *el ciclo ideal*, carece de fundamento; si Carnot tiene razón, los resultados experimentales de Joule no son válidos. El dilema es tan serio que, un científico de tanta prestancia como Lord Kelvin, confiesa públicamente que no ve cómo se pueda resolver el dilema: Carnot o Joule.

La respuesta al dilema, Carnot o Joule, le correspondió a R. Clausius, físico y matemático alemán, a través de su célebre monografía *Sobre la Fuerza Motriz del Calor y sobre las leyes deducibles de ésta, concernientes a la naturaleza del mismo*, publicada en los *Annalen der Physik*, Pogendorf, en 1850. Las líneas generales del razonamiento de Clausius es el tema central del capítulo VI.

BIBLIOGRAFÍA

MONOGRAFÍAS

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

Joule, J (1850). *On the Mechanical Equivalent of Heat*. Philosophical Transactions of the royal Society of London. Vol. 140, pp. 61-82

Joule, J (1878). *New Determination of the Mechanical Equivalent of Heat*. Philosophical Transactions of the royal Society of London. Vol 169. Pp. 365 -383.

Mayer, J. Joule, J. Carnot, S. (1929). *The Discovery of the Law of Conservation of Energy*. Isis, Vol. 13, No. 1, pp. 18-44. The University of Chicago Press on behalf of The History of Science Society..

Rumford, B. (1798). *An Inquiry concerning the Source of the Heat which is Exited by Friction*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Vol. 88. P. 80 – 102.

Thompson, B. (1786). *New Experiments upon Heat*. By Colonel Sir Benjamin Thompson. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 76 (1786), pp. 273-304. The Royal Society.

Thomson W (Lord Kelvin) (1897). *Reflecions On The Motive Power of Heat*. John Wiley and Sons, London. Reprint by Kessinger Publishing's Rare Reprints.

LIBROS CONSULTADOS

Bachelard, G (1973). *Etude sur L'evolution d'un probleme de Physique*. Vrin. Paris.

Brown, S (1949). *Count Rumford and the Caloric Theory of Heat*. Proceedings of the American Philosophical Society, Vol. 93, No. 4, pp. 316-325.

Duhem, P (1969). *To save the Phenomena*. The University of Chicago Press.

Elkana, Y (1967). *The Emergence of the Energy Concept* (Disertación Doctoral). Department of History of Ideas. The Faculty of the Graduate School Arts and Sciences. Brandeis University.

Fox, Robert (1969). *Reviewed work(s), Benjamin Thompson, etc.* The British Journal for the History of Science, Vol. 4, No. 3 pp. 290-291. Cambridge University Press on behalf of The British Society for the History of Science Stable.

Fox, Robert (1971). *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault.* Oxford University Press. London.

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

Koyré, A (1965). *La revolution astronomique, Histoire de la Pensée III.* Hermann.

Koyré, A (1965). *Newtonian Studies.* The University of Chicago Press.

Koyré, A (1978). *Estudios de Historia del Pensamiento Científico.* Siglo XXI editores.

Lindsay, B (1975). *Benchmark Papers on Energy/1. Energy: Historical Development of the Concept.* Dowden Hutchinson. Pennsylvania.

Matthews, M (1991). *Un lugar para la historia y la filosofía en la enseñanza de las ciencias.* Comunicación, Lenguaje y Educación. Dialnet.

Muirhead, James Patrick (1859). *The Life of James Watt with selections from his correspondence.* John Murray, London.

Morris, R (1972). *Lavoisier and the Caloric Theory.* The British Journal for the History of Science, Vol. 6, No. 1, pp. 1-38. Cambridge University Press on behalf of The British Society for the History of Science.

Mott, N (1964). *The concept of energy simply explained,* (Segunda Edición). Dover Publications, Inc. New York.

Vélez, F. Documento de presentación del énfasis educación en ciencias. Doctorado interinstitucional en Educación, Universidad Pedagógica Nacional. P. 39 – 42.