

EL DESARROLLO  
DE LOS CONCEPTOS ENERGÉTICOS  
EN LA MECÁNICA Y LA TERMODINÁMICA  
DESDE MEDIADOS DEL SIGLO XVIII  
HASTA MEDIADOS DEL SIGLO XIX

ANGELO BARACCA  
Universitá di Firenze • Italia

RESUMEN

*En este trabajo se reconstruye la evolución de los conceptos de trabajo y de energía, y la de la Mecánica y la Termodinámica en el curso de la Primera Revolución Industrial. Se pone particular atención a las estrechas relaciones que en esta época se mantuvieron entre el progreso técnico, la realidad social y productiva y la elaboración científica.*

*En la primera parte, partiendo de los límites de la obra de Newton, quien no introdujo los conceptos energéticos, se analiza las contribuciones tanto prácticas como teóricas del ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792), quien en 1759 dio la primera definición moderna del concepto de «trabajo mecánico», y aplicó correctamente en sus fundamentales estudios de las ruedas hidráulicas consideraciones prácticas sobre la conservación de la energía, cinética y potencial. Lazare Carnot*

ABSTRACT

*In this paper the evolution of the concepts of work and energy is analysed, together with that of Mechanics and Thermodynamics during the First Industrial Revolution. A particular attention is devoted to the deep relationships that existed in this age between technical advance, the social and productive reality, and scientific elaboration.*

*In the first part of the paper, starting from the limits of Newton's work, in which no energetic concept was introduced, the practical and conceptual advances of the English engineer John Smeaton (1724-1792) are analysed. In 1759, in his fundamental study on hydraulic wheels, he in fact introduced and used the first modern concept of «mechanical work»; and in his subsequent studies he correctly applied practical considerations on the conservation of (kinetic and potential)*

(1753-1823) formalizó por primera vez estos conceptos en 1783, en una realidad como la francesa, más atrasada pero caracterizada por los fermentos racionalistas de la Ilustración.

En la segunda parte del trabajo se considera el papel de la máquina de vapor en la evolución de los conceptos energéticos. En primer lugar se analizan las contribuciones de James Watt (1736-1819), a partir de su fundamental invención del «condensador separado» en 1765, en que el introdujo el concepto de caída de temperatura, yendo más allá del horizonte mecánico de Smeaton. En sus importantes invenciones siguientes Watt llegó por primera vez en forma práctica al concepto de «trabajo termodinámico». Finalmente se estudia el trabajo de Sadi Carnot (1796-1832) de 1824, subrayando como su «analogía hidráulica» para el calor le permitió llegar a una primera formulación general de la termodinámica como ciencia independiente; aunque basada en el concepto equivocado de conservación del «fluido calórico», su enfoque guarda muchos aspectos muy actuales, e importantes desde el punto de vista de la enseñanza.

energy. Lazare Carnot (1753-1823), in 1783, in the framework of the French reality of Enlightenment, gave the first formal statements of these concepts.

In the second part of the paper, the role of the steam engine in the evolution of the energetic concepts is considered. In the first place, the contributions of James Watt (1736-1819) are analysed, starting with his fundamental 1765 invention of the «separate condenser», in which he introduced the concept of temperature fall, going beyond Smeaton's mechanical horizon: in his subsequent important inventions, Watt introduced in fact for the first time in a practical way the concept of «thermodynamic work». Finally, Sadi Carnot's (1796-1832) work of 1824 is studied, emphasising the role of his «hydraulic analogy» for heat in reaching the first general formulation of Thermodynamics as an autonomous discipline; although based on the wrong concept of heat conservation, his formulation retains aspects of great relevance to the present, and of didactical interest.

Palabras Clave: Revolución industrial, Energía, Trabajo, Termodinámica, Carnot, Máquina de vapor

### Algunas premisas: la ciencia y su desarrollo

La historia de la física no es simplemente una reconstrucción académica, la más rigurosa y objetiva, de cómo han pensado y actuado los científicos en su propio tiempo para lograr sus resultados. Para mí tiene otras perspectivas mucho más interesantes y estimulantes. Por ejemplo, la reconstrucción

histórica puede ayudar mucho a entender la naturaleza y la sustancia de los conceptos y de las leyes físicas, con implicaciones didácticas de gran valor. Permite, además, apreciar la dimensión social de la empresa científica, o sea el influjo social sobre la elección de los temas de interés, el enfoque conceptual, tal vez incluso los métodos de investigación.

La ideología oficial propone una imagen de la ciencia como neutral. Sin embargo, los conceptos y las leyes científicas no son un puro reflejo de la naturaleza: la ciencia es una actividad humana, que, por supuesto, nace de la relación que el hombre establece con la naturaleza, pero toma su forma y desarrollo en el marco de la cultura de una época, de las formas de conceptualizar y razonar, y aún más del papel que el científico desarrolla en relación con las tareas sociales, con los problemas concretos y conceptuales que se tienen que enfrentar y resolver en aquella época, en aquel contexto económico y social. El físico francés Levy-Leblond escribe:

«[...] hay que partir, pues, de la idea de que la producción científica ocupa un lugar bien determinado en la sociedad que condiciona sus objetivos, los agentes y el modelo de funcionamiento. Práctica social entre otras, irremediabilmente signada por la sociedad en que se inserta, contiene todos los rasgos y refleja todas las contradicciones, tanto en su organización interna como en sus aplicaciones. [...] Se trata pues de verdaderas relaciones de constitución entre la ciencia y la sociedad»<sup>1</sup>.

Los mismos conceptos científicos no son meramente objetivos; por supuesto deben tener una relación con los hechos que se tratan, que les permitan reproducirlos y controlarlos. Pero la forma de los conceptos tiene un marco social (este es precisamente uno de los aspectos que corre el riesgo de perderse en la exposición didáctica, que refleja la estructura formal de la física actual). Como ejemplos, no es casual que al comienzo del siglo XIX se tuviera un concepto del calor como fluido; o que Newton, como veremos, no introdujera ningún concepto energético, aunque hubiese desarrollado toda la física y la matemática que se necesitaba por ello. El científico no se relaciona sólo con la naturaleza, de forma puramente pasiva y objetiva: las conclusiones que extrae son filtradas a través de todos los aspectos de la actividad social.

La sociedad no es un conjunto sin forma, sino que tiene una estructura determinada históricamente, que determina sus manifestaciones. El desarrollo de la ciencia no es lineal, ni acumulativo<sup>2</sup>. Un primer aspecto que analizaremos en este escrito es el nacimiento de conceptos científicos nuevos en relación con

las demandas puestas por nuevas clases sociales emergentes. O sea, para entender estos cambios tendremos que

«[...] relacionar las colectividades científicas agrupadas en instituciones con otros sujetos de la vida social y cuya acción es decisiva para la ciencia: las clases sociales. Éstas, según sus intereses, en primer lugar económicos, y a la luz del proyecto político e ideológico que propugnan, definen su posición ante la ciencia, promovéndola, retardándola, planteándole fines humanitarios o deshumanizados, confiriéndole un sentido social o elitista a su acción; en fin, las clases no sólo son sujeto de la política en un sentido estrecho sino que, en la medida en que la política asuma a la ciencia como vehículo para materializar proyectos económicos, militares o de otra índole, la propia ciencia queda incorporada a ella como una de sus variables. La ciencia se presenta así como un valor social: ciencia para algo o ciencia para alguien<sup>3</sup>».

Estas consideraciones no quieren decir que la ciencia sea sólo un producto social: ella tiene su especificidad, que no se puede menospreciar tampoco en el análisis histórico.

Por otra parte, debe admitirse que la ciencia es un fenómeno socio-cultural complejo que posee sus fuerzas motrices inmanentes, lo que impide hablar de un condicionamiento casual lineal y mecánico entre la sociedad y la ciencia. De tal forma, ella posee su especificidad, autonomía relativa, eficacia propia, capacidad de influencia sobre las restantes actividades e instituciones sociales. En su maduración y progreso la ciencia puede crear potencialidades que trascienden las expectativas que de ella tienen los agentes y estructuras sociales que la fomentan o, al menos, toleran. En su capacidad de penetración de la vida material y espiritual de la sociedad la ciencia puede devenir un factor decisivo de ésta<sup>4</sup>.

Por último, me parece importante subrayar que los análisis que presentaré no tienen sólo un valor histórico, sino que muestran potencialidades actuales: en Marx la historia es un instrumento para entender el presente.

## Ciencia y técnica

Es importante comentar una premisa más acerca de los conceptos de *ciencia* y de *técnica*. Comúnmente se suele trazar una distinción muy neta entre las dos, asociando la técnica (y en cierta medida despreciándola) con las aplicaciones que ya están contenidas en la ciencia. Yo pienso que esta distinción no corresponde a la realidad: hubo momentos (y lo veremos concretamente) en

que la técnica ha jugado el papel más innovador, mientras que la ciencia todavía no tenía ni la capacidad de plantearse ciertos problemas y se ha desarrollado en el marco trazado por la primera. El nombre de James Watt no suele encontrarse en los diccionarios de los científicos, pero espero convencer de que algunos de los pasos más importantes del nacimiento de la termodinámica son debidos a él. En toda la época de la *Primera Revolución Industrial* (más o menos desde mediados del siglo XVIII hasta a mediados del siglo XIX) la ciencia mantuvo un papel substancialmente dependiente de la técnica<sup>5</sup>: los fenómenos y los campos nuevos fueron descubiertos y realizados por técnicos (en muchos casos eran los mismos empresarios en los nuevos sectores de la producción), que tal vez no tenían ninguna preparación científica (Newcomen, el inventor de la máquina de vapor, era un simple herrero); mientras que la ciencia en aquel tiempo se planteaba principalmente la tarea de entender los fenómenos de base y mejorar y generalizar las técnicas. En la segunda mitad del siglo XIX la relación entre ciencia y técnica se puso al revés, cuando la ciencia adquirió la capacidad de enfrentarse o de descubrir aspectos nuevos: pero, para adquirir esa capacidad de previsión la ciencia tuvo que modificar profundamente sus métodos y sus instrumentos (en los que se confirma la interpretación de la ciencia como un proceso social). Por ejemplo, la máquina de vapor fue una invención técnica que la ciencia tuvo que explicar, mientras que el motor Diesel<sup>6</sup> o el motor eléctrico fueron proyectados antes de realizarlos.

## Primera Parte: La «Mecánica Práctica» y los conceptos de Trabajo y Energía

### *Una paradoja en la obra de Newton*

La forma mejor para introducir y enfocar el problema que quiero tratar es subrayar un aspecto de las concepciones de Newton que nos puede dejar maravillados. Por supuesto, Newton (1642-1727) introdujo la ley fundamental de la dinámica, y por otro lado introdujo también el cálculo diferencial. Si se examina cualquier texto moderno de mecánica, todas las propiedades de la energía mecánica son consecuencias inmediatas de estas dos premisas; por ejemplo, en una dimensión

$$\int_a^b F \cdot dx = m \int_a^b \frac{dv}{dt} \cdot dx = m \int_a^b dv \cdot \frac{dx}{dt} = m \int_a^b v \cdot dv = \frac{1}{2}mv_b^2 - \frac{1}{2}mv_a^2 \quad (1)$$

Entonces, nos surge la pregunta ¿Por qué Newton no desarrolló una consecuencia tan sencilla y directa de los conocimientos que tenía?

Y no sólo esto, sino que, además, negaba explícitamente que una ley de conservación cualquiera pudiera valer en el movimiento de un cuerpo o de un sistema: Newton sabía que en todos los casos que se conocen, el movimiento se extingue (hoy diríamos que los choques son inelásticos). Más de un siglo debía pasar para adquirir el concepto de que la energía cinética microscópica se transforma en energía térmica: Newton enunciaba este concepto en la *Óptica*, con afirmaciones como las siguientes:

«Desde las varias composiciones de dos movimientos aparece cierto que en el mundo no hay siempre la misma cantidad de movimiento<sup>7</sup>».

«Considerando entonces que la variedad de movimientos que encontramos en el mundo decrece continuamente, es necesario conservarla y aumentarla por medio de principios activos<sup>8</sup>».

Me parece que la única forma de explicar estas aparentes paradojas en el plano histórico, es admitir que la ciencia no refleja sólo propiedades de los fenómenos naturales, sino también el nivel de desarrollo cultural y social de cada época.

### *La clase burguesa y su actitud frente a la naturaleza*

No cabe duda que Newton fue la primera expresión llena de una nueva cultura, llevada por la burguesía<sup>9</sup>. No era la primera vez que nuevos estratos sociales emergían, introduciendo una nueva actitud frente al mundo, a la naturaleza, a los recursos. Sin duda, Galileo, al formarse en contacto con el Arsenal en Venecia, había salido del mundo cerrado de la Edad Media y del marco pasivo de la ciencia aristotélica<sup>10</sup>. El orden jerarquizado de aquel mundo se relacionaba con una concepción geocéntrica y cristalizada, en que el papel central del hombre en el mundo estaba garantizado por el orden creado por Dios. Las nuevas clases devenían dueñas de su destino, construían su propio futuro: éste era su papel central, y no necesitaban encontrarse en el centro del universo; se podía mirar a través del telescopio sin miedo ni prejuicios porque cualquier cosa que apareciera podía ser dominada por la iniciativa del hombre.

El desarrollo de una nueva estructura social se había quedado bastante limitado, y sólo con la Revolución del siglo XVII en Inglaterra surgió el verdadero nacimiento de la nueva clase burguesa. Los cambios inmediatos fueron

aparentemente muy pequeños: el Parlamento inglés inicialmente se elegía por no más de doscientos nobles. Pero la primera semilla se había implantado, y a partir de entonces la nueva clase pudo desarrollar su sistema económico basado en una acumulación primitiva que ya no constituyó pura riqueza como había sido para la clase de los nobles del pasado, sino que permitió *invertir* el dinero para que produjera nuevo valor y ganancia: o sea, el mecanismo económico del *capitalismo*.

La nueva clase burguesa tuvo sus exponentes, que elaboraron una nueva cultura: Locke enunció la nueva teoría política, y Newton la nueva teoría científica. Si con Copérnico, Galileo y, Kepler, se había eliminado el papel central de la Tierra en el universo, Newton eliminó cualquier diferencia entre los fenómenos en la Tierra y en los cielos<sup>11</sup>, unificándolos bajo la misma ley, la de la gravitación universal. La unidad física del mundo permitió reflejar entonces una visión dinámica, en que el papel central del hombre no era debido a perfección estática de la creación divina, sino que estaba garantizado por su actividad y su capacidad de modificar la realidad aprovechando los recursos naturales (recordemos que la religión inglesa privilegiaba la actitud activa, en vez de la contemplativa de la religión continental).

Las contradicciones que esta nueva actitud levantaba con respecto a la del pasado o a las de otras sociedades se pueden apreciar en el tema que estamos tratando a través de las disputas —muy fuertes— que Newton tuvo con Leibniz, en las que se reflejaban las concepciones tanto científicas como religiosas. Una de las disputas fue acerca del cálculo diferencial, que los dos habían introducido, pero con dos enfoques totalmente distintos: Newton lo hizo en términos concretos de *fluxiones*, Leibniz, por el contrario, procedió en términos más abstractos. La segunda disputa fue de naturaleza cosmológico-teológica. Hemos visto que Newton opinaba que el movimiento no se conserva y afirmaba que la cantidad de movimiento que hay en el mundo no se conserva, sino que interviene un *principio activo*: pensaba que Dios no sólo hubiese creado el universo y se conformara con quedarse a mirar la perfección de su creación, sino que tenía, por supuesto, que *actuar* interviniendo para mantener el movimiento de los planetas; a Leibniz esto le parecía algo como parecido a una herejía<sup>12</sup>. Por tanto, era muy distinta la forma en que los dos describían las características dinámicas del movimiento de los cuerpos, y esta fue la tercera disputa. Leibniz, de hecho, utilizaba la cantidad llamada *vis viva*, o sea  $m \cdot v^2$ , mientras que Newton la rechazaba y utilizaba la *cantidad de movimiento*  $m \cdot v$ . Nótese que la *vis viva* difiere de la *energía cinética* por el factor 1/2: esto no

importancia, porque quiere decir que la elección de Leibniz era ideológica e ignoraba el procedimiento (1). Pienso, por ello, que se podría decir que Leibniz tampoco introdujo el concepto físico de energía.

¿Por qué, entonces, no introdujo Newton el concepto de trabajo y de energía, sino que actuó de forma que excluía estos conceptos? La respuesta que yo doy a este problema es que Newton, aunque reflejara la visión del mundo y la forma de actuar de la nueva clase burguesa, todavía ésta se encontraba en la fase embrionaria de su desarrollo, en la que los mecanismos del capitalismo no se habían desarrollado plenamente.

### *El nuevo modo de producción capitalista*

Los historiadores marxistas de la economía distinguen diversas fases del desarrollo de la estructura económica capitalista: acumulación primitiva, capitalismo comercial, manufactura e industria. El desarrollo de la primera industria se sitúa históricamente al comienzo de la segunda mitad del siglo XVIII, precisamente en la llamada *Primera Revolución Industrial en Inglaterra*. Newton ya había fallecido en 1727.

¿Qué necesidad tenía entonces la nueva clase emprendedora de definir en forma cuantitativa y de medir el *trabajo* con anterioridad a aquella época? La base material y la división social del trabajo antes de la Revolución Industrial seguían siendo de tipo *artesanal*: seguía siendo cada trabajador quien debía accionar por sí mismo el telar. En aquella estructura económica podía pues trabajar hasta que quedara luz, o hasta que les quedara la energía física suficiente para hacerlo. La estructura económica inglesa tenía además una peculiaridad: los trabajadores eran los llamados *yoemen*, que eran dueños de un poco de tierra para cultivar, y completaban sus recursos económicos trabajando en un telar y produciendo tejidos. Parece claro que en esta estructura no se tenía necesidad ninguna de *medir* el trabajo que se hacía, ni el producto de ese trabajo. El paso siguiente, que se podría situar en la última fase de la vida de Newton, fue la intervención de empresarios que se habían enriquecido con las actividades comerciales, y compraron muchos telares, pero la forma de trabajar no cambió substancialmente por ese solo hecho, aunque entonces el trabajador no fuese dueño ni del medio ni del producto del trabajo. Sin embargo, ese cambio permitió los pasos siguientes. Por un lado nació para el empresario un estímulo para aumentar la productividad del trabajo mediante su mecanización: surgieron así las nuevas *máquinas*. Por otro lado, al empresario

ahora le era más conveniente concentrar los telares en un mismo sitio, y que los trabajadores fueran allí a trabajar: así nació la *fábrica*<sup>13</sup>. Y con este último proceso se presentó también la posibilidad de accionar el conjunto de máquinas de la planta a través de una fuente de energía central. El primer método fue por medio de una *rueda hidráulica*, accionada por la corriente de un río que pasara al lado de la planta, cuyo eje transmitía el movimiento al conjunto de las máquinas.

En el nuevo mecanismo económico capitalista el *trabajador* se transformaba en *obrero* que vendía su fuerza de trabajo al empresario. Este, por su parte, conseguía una ganancia correspondiente al plus-valor producido por el obrero. En este proceso nacía el concepto de *trabajo social* como categoría económica y social. Me parece bastante claro que sólo con este mecanismo se planteó por primera vez el problema de *medir el trabajo*, y al mismo tiempo nació el concepto de *eficiencia*, relacionado con el de productividad del trabajo: el aumento de la ganancia estaba relacionado con el aumento de la productividad del trabajo. El modo en que estos conceptos se tradujeron en los conceptos físicos de trabajo y de eficiencia también está relacionado con estos cambios y con las nuevas necesidades levantadas por el desarrollo de la industria.

### *Una limitación del concepto físico de trabajo en la mecánica*

Antes de discutir explícitamente este asunto me parece interesante agregar una anotación más, relacionada con el carácter de los conceptos científicos que marcan la estructura lógica y concreta que la física ha adquirido. Cuando yo era estudiante me acuerdo que el concepto de trabajo introducido en la física me planteaba algunos problemas. De hecho se me explicaba que si estoy de pie y parado con una maleta pesada en la mano, o si la transporto en un plano horizontal, no realizo trabajo: esta conclusión chocaba con mi experiencia habitual, relacionada con el esfuerzo, la fatiga que tales *acciones* provocaban en mi cuerpo. Haber entendido el marco y el proceso históricos en que el concepto de trabajo fue introducido, el papel que jugó, los problemas que debía resolver, me han ayudado a resolver esta paradoja y, al mismo tiempo, a entender el hecho de que conceptos físicos objetivos (en el sentido de que corresponden a situaciones medibles y reproducibles) contienen limitaciones e implican un marco social. Está claro que la paradoja se resuelve dentro de la física que conocemos, porque el concepto de energía se generaliza: hay energía química, fisiológica, que no corresponden a un desplazamiento macroscópico. ¿Pero, por qué, entonces, se sigue partiendo del concepto de trabajo como fuerza y *desplazamiento*? Esto sigue introduciendo limitaciones en su tratamiento. Así, se dice que si yo

levanto un cubo de agua de un pozo, hago un trabajo igual y opuesto a el de la fuerza-peso. Lo que es falso: en realidad yo hago un trabajo bastante mayor que el de la fuerza-peso, porque en esta acción tengo que mover partes de mi cuerpo y mantener en vida y en acción sus órganos vitales (corazón, hígado, riñones, etc.: el *metabolismo basal*); lo mismo pasa cuando llevo una maleta, y esto explica *mi esfuerzo, aunque la fuerza-peso no realice trabajo!*

Bueno, me parece que el origen social del concepto de trabajo en el siglo XVIII explica muy bien esta paradoja y el enfoque adoptado por la física. El trabajo que produce *valor*, y por lo tanto *ganancia*, necesita *no sólo aplicar fuerzas, sino que estas fuerzas también se desplacen*. Si uno lee, por ejemplo, algunas páginas del tratado de Adam Smith, el primer teórico de la economía capitalista, precisamente en las que da cuenta cuidadosamente de la producción de alfileres en una planta, se advierte cómo la producción de bienes a los que hay que incorporar un *valor* —y, en consecuencia, una *ganancia*— necesita la *acción de fuerzas que se desplazan*: porque sólo así se puede moldear, alargar, cortar, afilar, etc. el hierro, para obtener, por ejemplo, los alfileres. El trabajo que se tenía que definir y medir era pues sólo lo que podríamos llamar *trabajo productivo*. Digamos, para aclarar el concepto, que el empresario estaba dispuesto a pagarle al obrero solamente el tiempo de trabajo en que *producía valor*, accionando y *desplazando* fuerzas: ¡no quería, ni habría podido pagar al obrero el tiempo en que él se quedara parado, aun con una tonelada de hierro en sus brazos! Pero el concepto de trabajo es más general que el producto (escalar) de la fuerza por el desplazamiento.

Analicemos ahora cómo fueron introducidos explícitamente el concepto de trabajo, las primeras propiedades de la energía, el concepto de eficiencia de una máquina y otros conceptos de gran importancia.

### *Los ingenieros del siglo XVIII y la introducción del concepto de trabajo*

En relación con las nuevas tareas planteadas por el desarrollo de la industria en la segunda mitad del siglo XVIII se formó una nueva figura: el ingeniero práctico. Este no tenía una formación académica, tal como hoy la entendemos. En las universidades escocesas empezó la renovación de los contenidos de las materias de estudio, el interés hacia los fenómenos naturales: pero no se hablaba de *ciencia*, sino de *filosofía natural*. El enfoque académico permanecía esencialmente especulativo. El dado por la técnica y por los nuevos fenómenos y procesos que se tenían que utilizar en la producción, se desarrolló en los medios

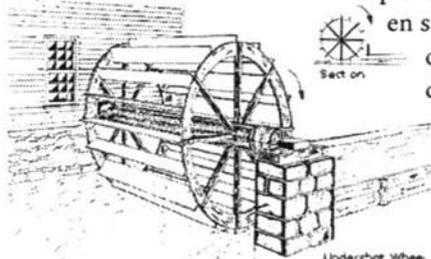
que estaban más relacionados con ellas y conllevó, también, una nueva actitud metodológica, que podría considerarse incluso más bien *científica*. Porque era necesario que las aplicaciones de los nuevos procesos *funcionaran* de forma cuantitativa; algo que las especulaciones de carácter esencialmente filosófico de los medios académicos no lograban. Así, las nuevas tareas formaron un nuevo tipo de *técnico*, que tal vez coincidía con el inventor de nuevos aparatos, con el descubridor de nuevos procesos, o con el empresario capitalista mismo<sup>14</sup>, en el sentido de que el estímulo era el nuevo proceso capitalista y, a menudo, era el propio inventor de un nuevo proceso el que buscaba e invertía dinero para explotarlo en la producción, convirtiéndose al mismo tiempo en empresario. Esta nueva cultura no se desarrolló en las universidades. Surgieron por esto una cantidad de *sociedades* privadas (la más famosa es la *Lunar Society*, así llamada porque sus reuniones se hacían en las noches de Luna llena, que permitía a los participantes volver a su casa aprovechando la luz de la luna). Así se formaron también, en estrecho contacto con este medio social y económico y con los estímulos y las tareas que planteaba, técnicos-ingenieros que en ocasiones se interesaban también directamente en asuntos científicos, con una atención prioritaria a la correspondencia experimental y práctica. Hablaremos en particular de dos de éstos: John Smeaton (1724-1792) y James Watt (1736-1819).

Smeaton fue de hecho una de las personalidades más destacadas de su época, relacionado con los medios culturales y técnicos más avanzados. Él comunicó muchas de sus investigaciones a la *Royal Society*, que fueron por ello publicadas en las *Transactions*. Por otro lado,

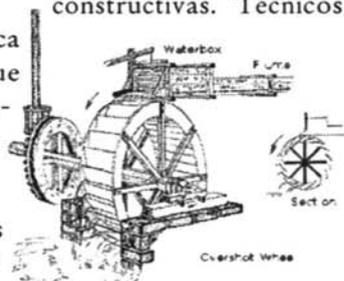
en su actividad increíblemente amplia y variada, proyectó y realizó una gran cantidad de obras y artefactos (puentes, puertos, faros<sup>15</sup>, máquinas hidráulicas y de vapor, telares y máquinas de todos tipos, etc.), renovando profundamente las técnicas constructivas. Técnicos

de su época afirman que las fundamentales mejorías que Smeaton introdujo en la técnica hidráulica retrasaron en varios años la necesidad de utilizar la energía del vapor.

Aquí nos interesan principalmente las investigaciones de Smeaton sobre las *ruedas*



Undershot Wheel

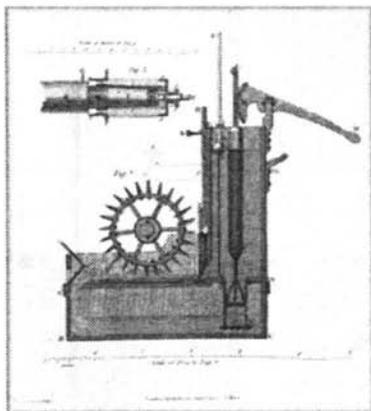


Overshot Wheel

*hidráulicas*, publicadas en 1759<sup>16</sup>. Se conocían ruedas realizadas hacía miles de años, pero nunca se había puesto atención en su funcionamiento y en su *eficiencia*. Casi sólo se construían ruedas accionadas *por abajo*, las más simples, o sea accionadas por la corriente de un río que movía las palas que al pasar por la parte inferior. Eran muy raras las ruedas accionadas *por arriba*, o sea por la caída del agua (fig. 1).

Smeaton tuvo muchas peticiones para realizar ruedas hidráulicas para plantas industriales, que generaran fuerza motriz para la maquinaria o los telares. Los ríos ingleses son pequeños y evidentemente el proyecto de la rueda tenía que hacerse cuidadosamente con el fin, por una parte, de ahorrar recursos y, por otra, de maximizar, al mismo tiempo, el resultado productivo, en este caso energético. Por primera vez en la historia Smeaton procedió con un método científico. Construyó en su taller un modelo a escala de la rueda hidráulica (fig. 2), haciendo experimentos precisos, o sea midiendo la cantidad de agua que

llegaba a la rueda y el *efecto* que la rueda accionada de este modo producía. He utilizado la palabra *efecto* para expresar el hecho de que Smeaton necesitaba definir una cantidad que correspondiera a la función que la rueda debía realizar, lo que queda muy claro en la tarea de su investigación, o sea, determinar

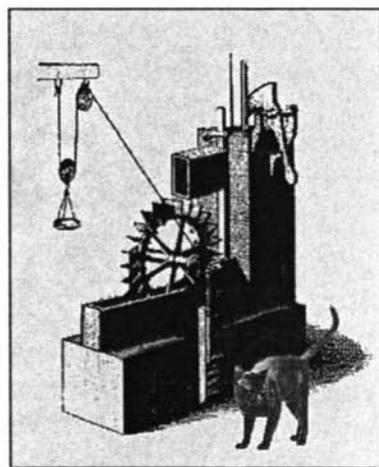


«[...] la carga que una rueda debería tener

para trabajar con la máxima ventaja [...] conociendo

el efecto que debería producir, y la velocidad que debería tener la rueda para producirlo<sup>17</sup>».

Si uno se identifica con esta tarea, parece natural que Smeaton midiese este efecto del siguiente modo: puso una cuerda en el eje de la rueda y midió el *efecto* a través de la capacidad de la rueda, accionada de una forma asignada, para levantar un peso dato a una cierta altura en un tiempo dado. Es



inmediato reconocer propiamente el concepto de *potencia*, o sea el de *trabajo en la unidad de tiempo*, aunque en aquel tiempo se utilizaban términos diferentes.

«Como estoy obligado a utilizar un término que hasta hoy ha sido causa de discusiones, considero necesario precisar el sentido en que quiero usarlo, que es en mi opinión el utilizado por la *Mecánica practica*<sup>18</sup>.

La palabra *potencia*, tal como es utilizada en la mecánica práctica, significa, en mi opinión, la aplicación de fuerza, gravitación, impulsión, o presión de modo que produzca movimiento; y por medio de fuerza, gravitación, impulsión, o presión compuesta con movimiento, la capacidad de producir un efecto y que ningún efecto es necesariamente mecánico, sino tal que necesita ese tipo de potencia para producirlo<sup>19</sup>».

Si estas palabras aparecen algo oscuras, los ejemplos que siguen son más claros

«El levantamiento de un peso, referido a la altura a que puede ser levantado en un tiempo dado, es la medida más apropiada de potencia o, en otras palabras, si se multiplica el peso levantado por la altura a que puede ser levantado en un tiempo dado, el producto es la medida de la potencia que lo levanta; y consecuentemente, son iguales todas aquellas potencias, cuyos productos, constituidos por esas multiplicaciones son iguales. Así, si una potencia puede levantar un peso doble de uno dado a una determinada altura, o el peso dado a una altura doble, en el mismo tiempo en que lo hace otra potencia, la primera potencia es doble que la segunda. y si una potencia puede levantar un peso mitad a una altura doble, o un peso doble a mitad altura, en el mismo tiempo en que otra puede hacerlo, aquellas dos potencias son iguales<sup>20</sup>».

La nueva actitud de Smeaton frente al problema y la elección del concepto físico de trabajo le permitió lograr muchos resultados de enorme valor y actualidad. Nótese que su procedimiento es el de la ciencia moderna, o sea, definir cuantitativamente, de forma rigurosa, una magnitud, que se pueda medir exactamente e investigar su dependencia de otras magnitudes, definidas y medidas con el mismo rigor. Así, por primera vez, Smeaton hizo una cuidadosa comparación del funcionamiento de la rueda, según fuera accionada por abajo o por arriba, con distintos cargas, distintos flujos de agua y distintas alturas de caída del agua.

Pero es importante que el lector entienda que la comparación entre las ruedas accionadas *por abajo* y *por arriba* planteó a Smeaton un problema conceptual muy grande. ¿Cómo se podía comparar el empuje que el agua hacía sobre las palas de la rueda llegando por abajo, con el que actuaba en su caída por arriba? Hoy sabemos cómo enfocar este aspecto en términos de energía

potencial disponible del agua que se encuentra a una altura dada y de la transformación entre las energías potencial y cinética y el trabajo. Smeaton no poseía estos conocimientos, tenía que conseguirlos, inventarlos: de hecho él fue el primero que logró entenderlos y utilizarlos de forma correcta (aunque, como veremos, la formalización llegara más tarde). El problema que Smeaton tenía era el siguiente. El agua cae a través de un desnivel dado: pero parte de este desnivel lo recorre en caída libre aumentando su velocidad (aquí la energía potencial se transforma en energía cinética. En la otra parte del desnivel, acciona directamente las palas en su descenso lento y uniforme (aquí la energía potencial se transforma en trabajo). ¿Qué relación hay entre los dos desniveles? ¿Qué papel juega el choque fuertemente inelástico del agua sobre las palas? ¿Puede advertir el lector lo problemático que podía ser razonar y experimentar sobre estos asuntos sin poseer los conceptos energéticos? Smeaton logró salir de esta dificultades con, por lo menos, dos conclusiones de suma importancia. Sigamos su razonamiento lógico en relación con la comparación entre las ruedas accionadas *por abajo* y *por arriba*, que él puso en la base de su procedimiento empírico (nótese el uso del condicional):

«Razonando sin experimento, podríamos ser llevados a imaginar que, sea cual sea el modo de aplicación, [...] cada vez que la misma cantidad de agua baja perpendicularmente a través del mismo espacio, la potencia efectiva natural sería la misma; suponiendo la maquinaria sin fricción, calculada igualmente para recibir el efecto entero de la potencia y para conseguir el mayor efecto [...] se supondría pues que una pulgada cúbica de agua, dejada caer un espacio de 30 pulgadas, e incidente allí sobre otro cuerpo, sería capaz de producir un efecto igual por colisión, que si la misma pulgada cúbica hubiese descendido a través del mismo espacio con un movimiento más lento y hubiese producido sus efectos gradualmente. Porque en ambos casos la gravedad actúa sobre la misma cantidad de materia, a través de un mismo espacio<sup>21</sup> [...]».

Y comentando la última afirmación Smeaton agrega:

«La gravedad, es verdad, actúa en un intervalo de tiempo más largo sobre el cuerpo que baja despacio que sobre el que cae rápidamente; pero esto no puede causar una diferencia en el efecto: porque un cuerpo elástico que cae a través del mismo espacio en el mismo tiempo, al chocar sobre otro cuerpo elástico, rebotará más o menos a la altura de la que cayó; o, comunicando su movimiento, hará subir otro igual a la misma altura<sup>22</sup>».

Smeaton enuncia todo esto de forma aún más clara cuando lleva a cabo, efectivamente, el cálculo de la potencia disponible en sus experimentos:

«En estos experimentos siendo la *cabeza* [del desnivel] de 6 pulgadas y la altura de la rueda 24 pulgadas, el descenso total será de 30 pulgadas: [...] si el agua utilizada en un minuto es 962/3 libras, hace que, multiplicada por 30 pulgadas de la *potencia* = 2900<sup>23</sup>».

En la fig. 3 estas cantidades serían  $h_1 - h_p = 6$  pulgadas  $h_p - h_2 = 24$  pulgadas y  $h_1 - h_2 = 30$  pulgadas.

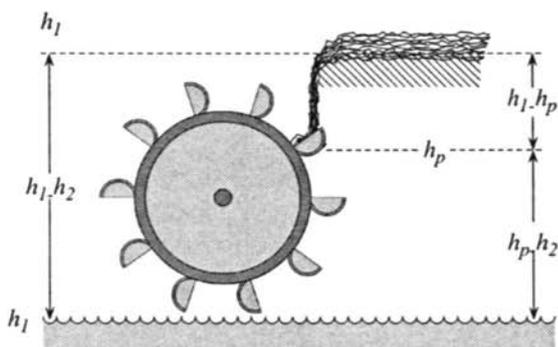
A pesar de la forma en que Smeaton podía expresarse teniendo en cuenta su época, la esencia de su *razonamiento*, en términos modernos, es que,

en el descenso del agua, las transformaciones de la energía potencial en energía cinética o en trabajo son equivalentes: o sea, que *la energía cinética o el trabajo que se obtienen de la energía potencial del agua son iguales en principio (serían capaces de producir un efecto igual)*. Pero no lo son en la práctica, debido al carácter inelástico del choque del agua sobre las palas.

El choque inelástico hace *perder* una parte del efecto que se pretende obtener, que es el movimiento de la rueda. El agua recorre una parte de la diferencia de altura total disponible en caída libre (fig. 3). En este recorrido adquiere energía cinética (igual a esa parte de la energía potencial total), que no puede transmitir completamente a la rueda, debido al choque inelástico.

Por el momento Smeaton no podía decir más (veremos que en investigaciones siguientes aclaró también este aspecto), pero esta conclusión le permitió otra implicación no menos importante: si queremos maximizar el *trabajo* producido por la rueda (ahora podemos usar este término) en condiciones de funcionamiento determinadas (flujo y caída de agua y carga de la rueda), se tiene que reducir la parte de la diferencia de altura total que el agua recorre en caída libre y la velocidad con que el agua cae (inelásticamente) en las tazas de la rueda; y así accionar la rueda de forma lenta:

«[...] los cuerpos no elásticos, cuando accionan con su impulso o choque, comunican sólo una parte de su potencia original; la restante se gasta en el cambio de su forma como consecuencia del choque.



[...] cuanto más alta es la rueda en proporción a la diferencia total de altura, mayor será el efecto; porque depende menos del impulso del agua y más de la gravedad de la misma en las copas [...]

[...] cuanto más despacio baja un cuerpo, mayor será la parte de la acción de la gravedad aplicable a la producción de un efecto mecánico; y en consecuencia mayor puede ser este efecto.

[...] y, entonces, llegamos a esta regla general: cuando las otras condiciones son iguales, el efecto será mayor cuando la velocidad de la rueda sea menor<sup>24</sup> [...].

Si alguien examina un tratado moderno de ingeniería hidráulica se dará cuenta de que aquí están contenidos *los dos principios (o aforismos) fundamentales* de dicha ciencia. En nuestro análisis veremos las consecuencias, sumamente importantes, de esta receta de Smeaton que podríamos enunciar de la forma siguiente: *para maximizar la eficiencia de una rueda hidráulica accionada por arriba se tiene que minimizar la parte de la diferencia total de altura que el agua recorre en caída libre ( $h_1 - h_p$  en fig. 3); o sea, el agua debería recorrer la diferencia total de altura ( $h_1 - h_2$ ) lentamente, accionando el movimiento de las palas de la rueda.* Y además, si la rueda funciona despacio, se reducen los choques inelásticos del agua, y se aumenta la eficiencia. Se añadirán algunos comentarios sobre este aserto un poco más adelante.

Una última conclusión de Smeaton, relacionada con estos razonamientos, aunque tenga una importancia menor para nuestro análisis, fue la que más influyó en la técnica hidráulica de aquel tiempo. Sus mediciones, sobre la base de las premisas que hemos discutido, le permitieron concluir que *las ruedas movidas por arriba logran una eficiencia mayor que las movidas por abajo* (él concluía de sus mediciones que la eficiencia era doble). Esta conclusión tuvo una gran importancia práctica, como tuvo ocasión de resaltar en 1813 otro gran ingeniero, Peter Ewart, en relación con éste resultado de Smeaton, cuando expresó:

«[...] aunque las ruedas movidas por abajo fuesen, hace alrededor de 50 años, las más difundidas, éstas raramente se encuentran ahora, y cada vez que es necesario economizar la potencia, no se construyen otras nuevas».

En los años siguientes Smeaton continuó sus investigaciones experimentales, profundizando sus estudios sobre los efectos de las fuerzas en general, logrando así otros resultados de importancia fundamental. Mientras el debate académico se encontraba detenido en una discusión estéril sobre la elección entre la *vis viva mv<sup>2</sup>* y la *cantidad de movimiento mv*, él fue el primero en establecer, sobre la base de cuidadosos experimentos, la diferencia, en distintas

condiciones, entre el *teorema de la energía cinética* y el *teorema del impulso*, concluyendo que:

«[...] las potencias mecánicas que se tienen que gastar son proporcionales a los cuadrados de las velocidades que se tienen que generar; y las velocidades generadas son proporcionales a la potencia agente compuesta con (o multiplicada por) el tiempo de su acción, y al revés<sup>25</sup>».

O sea, que la diferencia entre los dos casos es debida a los que él llamó *términos colaterales espacio y tiempo*. La fuerza multiplicada por un espacio es la *potencia mecánica* y resulta proporcional al cuadrado de la velocidad; mientras que la fuerza multiplicada por el tiempo de su acción resulta proporcional a la velocidad (la terminología de Smeaton es distinta de la actual):

«Este parece ser, entonces, el fundamento no sólo de las disputas que han surgido, sino también de los errores que se han cometido en la aplicación de las distintas definiciones de la cantidad de movimiento; o sea, mientras los que han estado de acuerdo con la definición del Sr. Isaac Newton [o sea  $mv$ , y entonces  $m \cdot dv = F \cdot dt$ , *nota mía*. A.B.] han reprochado a sus adversarios no considerar el tiempo en que se producen los efectos, ellos mismos no tienen en cuenta el espacio que la fuerza que produce el impulso, tiene que recorrer para producir los diferentes grados de velocidad. Parece entonces que, sin tener en cuenta los términos colaterales espacio y tiempo, los términos cantidad de movimiento, momento y fuerza de cuerpos en movimiento sean absolutamente indefinidos<sup>26</sup>...».

Por último, en 1782, Smeaton publicó los resultados de otros experimentos<sup>27</sup> en los que había simulado choques de cuerpos inelásticos, demostrando que la potencia se almacena en los cuerpos deformados no elásticos (aunque no pudiera todavía darse cuenta de porqué no puede recuperarse, para lo que se precisaría el concepto de energía interna).

### *Lazare Carnot y la formalización de los conceptos energéticos en la mecánica*

No queremos detallar aquí la reconstrucción histórica de los conceptos energéticos en mecánica, pero hace falta mencionar, aunque sea brevemente, la contribución sumamente importante de Lazare Carnot. Habría aspectos muy interesantes que podemos simplemente mencionar. Mientras en Inglaterra se estaba desarrollando, en el marco de la Revolución Industrial, la *mecánica práctica*, que lograba los resultados que hemos visto, en Francia se desarrolló la *mecánica racional*, o sea su exposición matemática y formal. En la base de esta diferencia sustancial hay que situar el hecho de que en Francia no se había desarrollado todavía una clase burguesa capaz de imponer su orden económico. La

monarquía absoluta del *Rey Sol* garantizó el mantenimiento del poder de las clases nobles hasta la Revolución Francesa de 1789. Pero los estratos burgueses se iban formando y, al no poder poner en práctica sus aspiraciones, las sublimaron de forma ideológica. La filosofía de la *Ilustración* tuvo esta raíz, y el proyecto y la ejecución de la *Encyclopédie* de D'Alembert y Diderot procedieron de este enfoque. La ciencia francesa del siglo XVIII fue una ciencia matemática y racional, que podríamos llamar *ideológica*.

Esto no impidió que una figura como la de Lazare Carnot (1753-1823, el padre de Sadi Carnot) lograra resultados sumamente interesantes<sup>28</sup>. Fue un ingeniero del *génie* del ejército y una de las figuras más destacadas en los acontecimientos de la Revolución: a pesar de ser miembro del Comité de Salud Pública con Robespierre, no fue guillotinado, y pasó a ser miembro también del Directorio que le sucedió. Se le llamó el *organizador de la victoria*, cuando los científicos franceses se movilizaron bajo su dirección para organizar el ejército durante la guerra que la primera coalición emprendió contra Francia. Finalmente, fue también Ministro durante los Cien Días de Napoleón y participó en la expedición científica que acompañó a Napoleón en la campaña de Egipto. Un hombre, por tanto, muy involucrado en los más relevantes acontecimientos de su época y, por ello, exponente típico y muy destacado de la clase burguesa, un *técnico* que sobrevivió a todos los cambios. En 1794, Lazare fue, también, uno de los fundadores de la famosa *École Polytechnique* que en 1804, con las reformas napoleónicas, pasó a depender del Ejército.

En 1783 publicó un libro muy importante *Essay sur les Machines en Général* (actualizado en la segunda edición de 1803, *Principes Générales de l'Équilibre et du Mouvement*), en el que desarrolló, en relación directa con las investigaciones de Smeaton, la moderna teoría de las máquinas (por supuesto, mecánicas), pero al asumir la actitud sistemática, característica —como hemos venido diciendo— de Francia, adoptó la noción de trabajo mecánico, al que llamó *momento de actividad*, logrando plantear las bases generales del principio, establecido por Smeaton, para las máquinas hidráulicas. Según Carnot, en las máquinas mecánicas se despilfarra energía cuando hay choques entre sus partes, y afirmó explícitamente el *principio de conservación de la energía mecánica*:

«[...] el modo de hacer producir el efecto mayor a una máquina hidráulica, accionada por una corriente de agua, no se logra con una rueda cuyas palas reciban el choque del fluido. En efecto, dos razones impiden que así se produzca el efecto mayor: la

primera es que es necesario evitar cualquier choque; la segunda es que, después del choque del fluido, éste mantiene todavía una velocidad que se pierde, que se podría emplear para producir otro efecto más, que se agregaría al primero. Para hacer la máquina hidráulica más eficiente, o sea capaz de producir el efecto mayor posible, habría que conseguir, primero, que el fluido pierda absolutamente todo su movimiento con su acción sobre la máquina, o que al menos les quede, sólo, la cantidad necesaria para irse después su acción; En segundo lugar habría que hacerle perder todo su movimiento por grados insensibles [o sea de forma muy lenta], y sin que haya tenido ningún choque, ni por parte del fluido, ni entre las partes sólidas de la máquina<sup>29</sup>[...].»

Los principios generales de la tecnología hidráulica son formulados aquí de forma aún más evidente. Veremos la herencia de estos conceptos sobre lo que prácticamente se considera *máquina hidráulica ideal* o sea, *la máquina hidráulica más perfecta*.

## Parte II. De la Máquina de Vapor a la Termodinámica

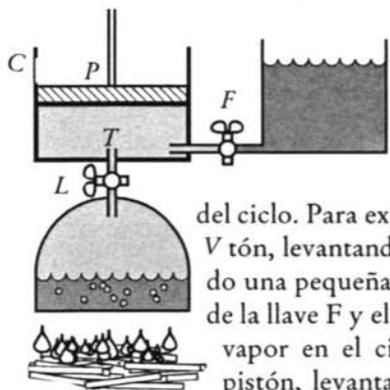
### *La invención de la máquina de vapor*

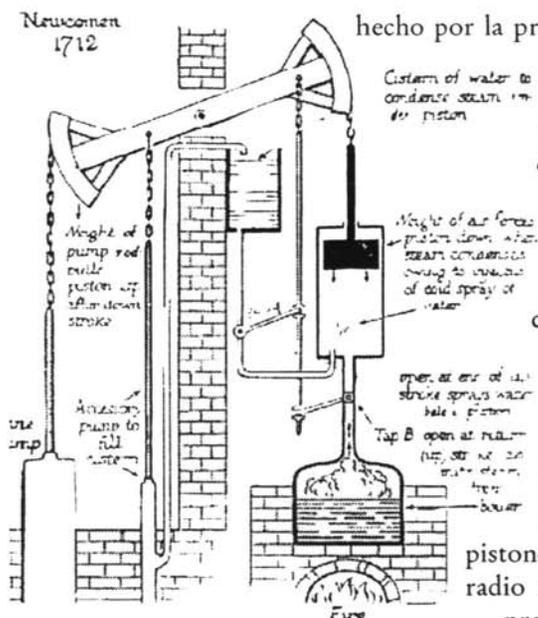
El tipo de máquina de vapor que ha jugado el papel determinante para el desarrollo de la explotación de la energía térmica fue un invento hecho en 1712 por un simple herrero<sup>30</sup>, sin conocimientos científicos llamado Newcomen. La tarea principal para la que se diseñaron esas máquinas en aquella época fue para bombear el agua de las minas, que se inundaban más conforme el progreso tecnológico permitía alcanzar mayores profundidades. El esquema de dicha máquina era el siguiente (fig. 4.a). Un pistón P dentro de un cilindro C estaba conectado a través de un brazo B a la barra de una bomba A. Cuando el pistón

P estaba en su posición inferior, se abría la llave L conectada con la

caldera V, donde había agua hirviendo; la presión del vapor actuaba sobre el pistón equilibrando la presión atmosférica que actúa sobre él, así que el peso de la barra de la bomba A bajaba esta última y levantaba el pistón. Pero esta no era la parte activa

del ciclo. Para extraer el agua del pozo había que bajar el pistón, levantando la bomba. Esto se conseguía introduciendo una pequeña cantidad de agua fría en el cilindro a través de la llave F y el tubo T. El agua fría disminuía la presión del vapor en el cilindro, y la presión atmosférica bajaba el pistón, levantando la bomba. Como se ve, el trabajo era



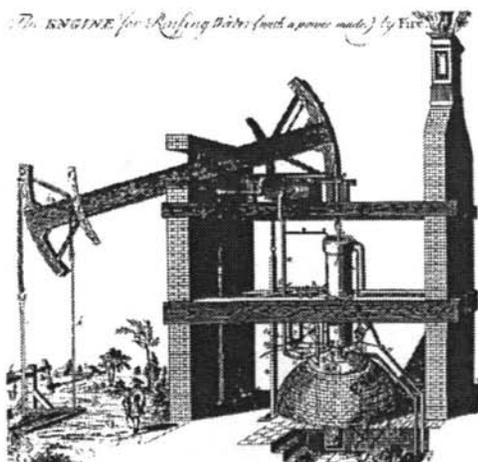


DIAGRAMMATIC VIEW OF NEWCOMEN'S ATMOSPHERIC FIRE ENGINE (1712)

hecho por la presión de la atmósfera, así que a esa máquina se le dio, en concordancia con su fundamento, el nombre de *máquina atmosférica* (fig. 4.b).

La utilización de esta máquina se difundió, a pesar de varios inconvenientes. Su eficiencia, calculada según nuestros conocimientos actuales, era ínfima, posiblemente de 0,5%, aunque por fortuna el carbón no faltaba en Inglaterra. Uno de los aspectos más difíciles a realizar fue la construcción de los pistones perfectamente cilíndricos del radio requerido. En aquella época, el proceso de construcción de los pistones consistía en martillar una

lámina de hierro alrededor de un cilindro de madera. Smeaton, aplicando su técnica cuidadosa, logró construir la máquina de Newcomen más eficiente; aunque no tuvo ninguna idea respecto a la mejora del diseño básico. Podríamos decir que aquí se ve que el genio de Smeaton estaba reducido solamente a la mecánica: Fue otra personalidad genial y abierta a las propiedades nuevas del calor, la que logró superar el horizonte del mecanicismo newtoniano<sup>31</sup>. De hecho, el funcionamiento de esas máquinas era muy irregular, solían pararse a menudo. Estos inconvenientes eran graves sobre todo en las nuevas aplicaciones que se necesitaban para el desarrollo de la revolución industrial, o sea como máquinas que pudiesen sustituir a las ruedas hidráulicas, con la ventaja que



pudiesen ser utilizadas en cualquier lugar que se encontrara la planta, aunque estuvieran lejos de un río.

### *La invención fundamental de James Watt de 1765*

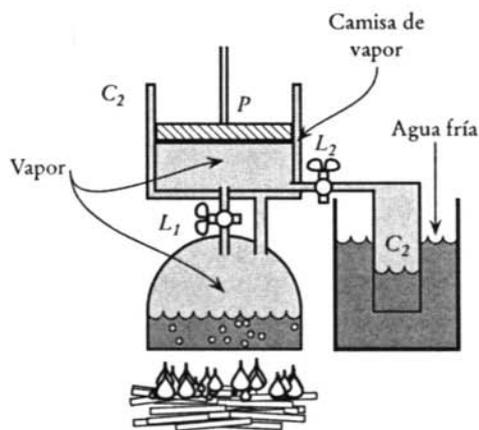
En la Universidad de Glasgow<sup>32</sup> había un modelo a escala de la máquina de Newcomen que se utilizaba para demostraciones docentes, pero que tendía a detenerse tras algunos movimientos del pistón. Trabajaba en esa universidad un *reparador de instrumentos* muy hábil, James Watt (1736-1819), a quien se le pidió que resolviera esta dificultad. Watt era también un genio muy versátil, que abordó problemas neurálgicos para el desarrollo económico e industrial del país<sup>33</sup>.

Watt abordó el problema de la máquina de Newcomen con una actitud parecida a la que Smeaton había utilizado para construir el modelo de la rueda hidráulica: midió cuidadosamente la cantidad de vapor que entraba en el cilindro del modelo a escala de la máquina de Newcomen<sup>34</sup>. Es necesario subrayar en este sentido que en aquel tiempo todavía no se habían introducido los conceptos fundamentales concernientes al calor. La contribución de Watt en este sentido, propiamente *científica*, resultó fundamental y constituye otro ejemplo, aún más claro, de los logros científicos estimulados por necesidades técnicas. Watt pudo colaborar en la introducción de estos conceptos con su amigo, de la misma universidad, el químico Black. Watt se dio cuenta de que las paredes del cilindro absorbían calor (la relación superficie/volumen era mayor en el modelo que en las máquinas normales). Tuvo, entonces, que introducir los conceptos de *calor específico* y de *conducción térmica*. Tras medir la capacidad térmica de varias sustancias, construyó un modelo con paredes de madera, intentando mantener las paredes lo más calientes posibles para evitar que parte del vapor se condensara. Midiendo las cantidades de vapor, se dio cuenta que había una anomalía en los volúmenes de dicho vapor. Estas consideraciones lo llevaron a advertir, con Black, el concepto fundamental de *calor latente*. A continuación, vio que, tras la condensación del vapor, en el cilindro se encontraba todavía una cantidad residual de vapor a temperatura bastante alta, que obstaculizaba el descenso del pistón. Al final, se encontró entonces frente a la contradicción de que era necesario que el cilindro estuviera lo más caliente posible a la entrada del vapor y lo más frío posible en la condensación. Las dos cosas parecían inconciliables. Se advertirá que el problema con que Watt se enfrentaba es lo que actualmente se formula en la segunda ley de la termodinámica, o sea la *existencia de (por lo menos) dos temperaturas diferentes en una máquina térmica*.

De hecho la realización genial de Watt, o sea el *condensador separado*, correspondió al descubrimiento de las dos fuentes de calor y su separación física, y resultó fundamental para todo el desarrollo de la tecnología del vapor y de la ciencia termodinámica. En una carta a su amigo Robinson le cuenta de forma extremadamente clara su descubrimiento:

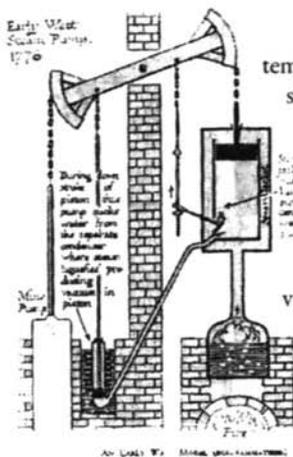
«Me di cuenta de que para utilizar el calor de forma mejor, era necesario, primero, que el cilindro se mantuviese siempre a la misma temperatura del vapor que entraba en él, y, segundo, que cuando el vapor se condensaba, el agua que resultaba de esto y la de la inyección misma se enfriasen a 37,7 C o aún menos, si era posible<sup>35</sup>. La posibilidad de realizar esto no se presentó de inmediato; pero al comienzo de 1765 me saltó a la mente que si se abría una comunicación entre un cilindro que contiene vapor y otro recipiente en que se hubiesen quitado el aire y otros fluidos, entonces el vapor, fluido elástico<sup>36</sup>, penetraría de inmediato en el recipiente vacío y seguiría penetrando en él hasta cuando se hubiese alcanzado el equilibrio; y si el recipiente se hubiese mantenido muy frío, con una inyección o de otro modo, habría entrado más vapor hasta que se hubiese condensado todo».

El invento de Watt consistió entonces en añadir a la máquina un segundo cilindro C2, *separado* por una llave L2 del primero C1, en el que se efectúa la expansión del pistón (fig. 5.a).



Así, el cilindro C1 se podía tener lo más caliente posible (más tarde Watt lo encerró dentro de una camisa en contacto con el vapor de la caldera, como se indica con líneas punteadas en la misma fig. 5.a, para que estuviera a la misma temperatura del vapor que levantaba el pistón), mientras que C2 se mantenía sumergido en agua fría. Cuando

el vapor entraba en C1, la llave L1 estaba abierta y la L2 cerrada. Para obtener la condensación se cerraba L1 y se abría L2. En 1769 Watt consiguió una patente por su invención cuyo texto recogemos parcialmente. En sus dos primeros párrafos se puede reconocer la primera parte de la formulación de Kelvin del segundo principio de la termodinámica (la segunda parte tuvo que esperar, como sabemos, casi un siglo, porque implicaba el conocimiento de la naturaleza de la transformación entre calor y trabajo, que Watt no podía poseer):



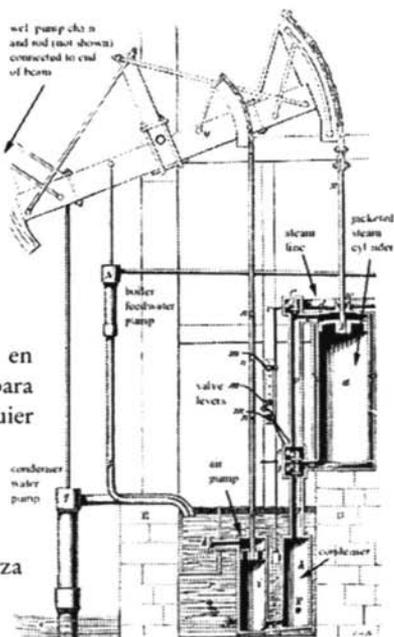
«Mi método de reducir el consumo de vapor, y consiguiendo de combustible, en las máquinas de fuego, se basa en los siguientes principios:

*Primero:* El recipiente en que la potencia del vapor debe ser empleada para accionar la máquina, al que se le llama cilindro en las comunes máquinas de fuego, debe, durante todo el tiempo en que la máquina esté funcionando, ser mantenido tan caliente como el vapor que entra en él; en primer lugar cerrándolo con una envoltura de madera o de cualquier material que transmita el calor lentamente; en segundo lugar rodeándolo con vapor u otros cuerpos calientes; y en tercer lugar, impidiendo que el agua o cualquier otra substancia más fría que el vapor entre o se ponga en contacto con el cilindro durante ese tiempo.

*Segundo:* En las máquinas que tienen que ser accionadas por entero o parcialmente por la condensación del vapor<sup>17</sup>, éste debe ser condensado en recipientes separados de los del vapor o cilindros, aunque ocasionalmente se comuniquen con ellos; yo llamo condensadores a estos recipientes y, mientras que las máquinas estén funcionando, esos condensadores deberían ser mantenidos fríos por lo menos como el aire que se encuentra alrededor de las máquinas, a través de la aplicación de agua o de otros cuerpos fríos.

*Tercero:* Cualquier cantidad de aire o de otro vapor elástico que no haya sido condensado por el frío del condensador, y que pueda impedir el funcionamiento de la máquina, debe ser expulsada de los recipientes del vapor o de los condensadores por medio de bombas, accionadas por las máquinas mismas, o de otro modo.

*Cuarto:* Tengo la intención de emplear en muchos casos la fuerza expansiva del vapor para empujar los pistones por su parte superior, o cualquier cosa que pueda ser usada a su vez; del mismo modo que la presión de la atmósfera se emplea ahora en las máquinas comunes de fuego. En casos en que no pueda haber agua fría en abundancia, las máquinas pueden ser accionadas sólo por esta fuerza del vapor, descargando el vapor en el aire después que el ha hecho su función.»



El cuarto punto contiene el principio de otra mejora importante que Watt patentó en 1782, la máquina de doble acción, la verdadera máquina *de vapor*, en que el mismo vapor se utiliza por abajo para levantar el pistón, y por arriba para bajarlo (como muestra la fig. 5.b).

### *Una historia muy moderna: la explotación de la patente de Watt*

La historia de la explotación de la patente de Watt de 1769 constituye un aspecto emblemático y sumamente moderno del desarrollo de la economía capitalista. Watt de hecho se asoció con empresarios capitalistas, quienes pusieron el dinero para construir y comercializar las nuevas máquinas de vapor. Un primer intento de Watt con el empresario Roebuck no tuvo suerte. Cabe subrayar que la máquina de Watt constituía un artefacto extremadamente avanzado para su época, muy difícil de construir y también de vender. Por un lado, varios empresarios preferían máquinas menos avanzadas, más simples y económicas (¡aunque gastasen más combustible!), como las de Savery o de Newcomen. Era muy difícil que los empresarios comprendiesen las verdaderas características y ventajas de la máquina de Watt. Además, era también muy difícil en aquel tiempo barrenar cilindros del diámetro requerido con la precisión necesaria para una máquina tan avanzada como era la de Watt, una máquina de Newcomen necesitaba de una precisión mucho menor (la de Savery no tenía cilindros). Por otra parte se hicieron muchísimos intentos de violar, o de imitar, la patente de Watt, construyendo una cantidad de máquinas *piratas*.

La empresa que tuvo suerte fue la asociación de Watt con Boulton, en la que éste puso el capital y el primero su ingenio y habilidad técnica. Puede pensarse como un embrión de una planta moderna con dirección comercial y laboratorio de investigación<sup>38</sup>. Boulton y Watt tuvieron que recurrir a muchos pleitos para proteger la patente contra de los imitadores. Teniendo en cuenta la competencia de todos los demás constructores de máquinas, es probable que Boulton y Watt hayan construido en el Lancashire, hasta el año en que expiró la patente, no más de la tercera parte de las máquinas que funcionaban entre 1775 y 1800<sup>39</sup>. Por otra parte, no hay datos fiables. Ritson señala que

«En 1778 en Cornwall funcionaban más de 70 máquinas de Newcomen; alrededor de 1790 todas habían desaparecido menos una, substituidas por máquinas de Boulton y Watt; en las Consolidated Mines de Cornwall el gasto de carbón se redujo de alrededor de 19.000 hasta alrededor de 6.100 toneladas al año. Esto constituyó un ahorro anual de 10.830 libras esterlinas al precio corriente del carbón<sup>40</sup>».

### *Más allá del horizonte mecánico: trabajo termodinámico, ciclo y eficiencia de la máquina*

Durante su sociedad con Boulton, Watt no se limitó a construir máquinas explotando la patente de 1769, sino que siguió introduciendo muchas innovaciones y nuevas patentes. No vamos a seguir con detalle estos desarrollos, descritos en la bibliografía recomendada, pero hay algunos que hace falta discutir, porque fueron base de conceptos físicos nuevos, que iban realmente más allá de la mecánica y resultaron fundamentales para la termodinámica.

Un problema importante era el relacionado con la medición de la potencia desarrollada por la máquina de vapor. Cabe subrayar que cuando la máquina era utilizada principalmente para bombear agua, el concepto de trabajo desarrollado por ésta caía en el mismo marco del concepto de trabajo mecánico que hemos visto introducido por Smeaton en la *mecánica practica*. Pero la verdadera novedad y potencialidad de la máquina de vapor eran las de accionar directamente las maquinarias de una planta industrial, principalmente a partir de la mejora introducida por Watt, que había eliminado las irregularidades de funcionamiento de la máquina de Newcomen. Pero esta utilización era, sin embargo, tan novedosa, conceptual y prácticamente, con respecto a la otra forma, la de utilizarla como bomba, que encontró muchas dificultades en difundirse: ¡no se olvide que se llegaba a utilizar una máquina de vapor para bombear agua que alimentaba ruedas hidráulicas! En 1790 Southern, asistente de Watt, escribía el nuevo punto de vista de Boulton y Watt:

«Ellos desean hacerle observar a ustedes que una máquina de 10 caballos construida para bombear agua para las ruedas hidráulicas no producirá el efecto de 10 caballos» en la maquinaria [de la planta]. Para hacer esto, podría ser necesaria una máquina de 16 o 20 caballos, según la construcción de las ruedas hidráulicas que ustedes utilicen. Ustedes tendrán más interés en construir una máquina para hacer girar la maquinaria directamente, si puede,... Una máquina para bombear agua resulta más costosa y produce poco más de la mitad del efecto que se consigue cuando se inserta sobre una rueda<sup>3</sup>».

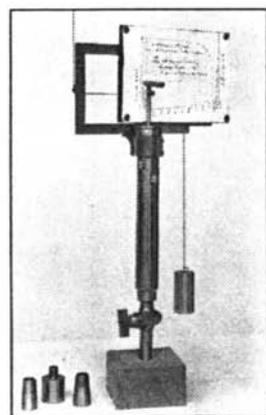
Watt patentó técnicas muy ingeniosas para resolver el problema de transformar el movimiento alterno del pistón en movimiento circular (el fundamental mecanismo biela y manivela; también patentó máquinas de vapor rodantes). Pero es interesante advertir cómo esta nueva utilización de la máquina introducía en realidad *aspectos que no se podían tratar de forma mecánica y requerían conceptos verdaderamente nuevos*, ya que el trabajo desarrollado no

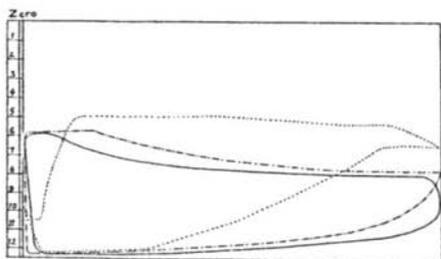
se podía seguir midiendo a través de la cantidad de agua levantada a una cierta altura. Por un lado, se planteaba el problema de medir la fricción de las maquinarias de la planta: Paul y Wyatt, los inventores de la máquina para hilar, habían intentado en 1750 determinar la pérdida de potencia debido a la fricción de los telares, y Watt menciona asimismo otro intento, hecho por otros, que indicaba que la potencia era absorbida, sobre todo, por la fricción, siendo muy poca la requerida para estirar el hilo. Por otro lado, era sumamente importante adecuar la potencia de las máquinas a las características de la planta que las utilizaba. Hay que tener en cuenta que Boulton y Watt fundamentaban su empresa en la superioridad de la máquina de Watt, por lo que exigían un canon anual proporcional al ahorro de carbón respecto a una máquina de Newcomen equivalente. La experiencia directa sugería a Watt suministrar alrededor de un caballo de vapor por cada cien bobinas, pero él mismo admitía no tener una norma adecuada. Así, por ejemplo, contestó a un cliente:

«Hemos construido muchas máquinas para fábricas textiles, pero las maquinarias son tan diferentes en los distintos lugares que no podemos darle instrucciones sobre la potencia».

Ambos problemas se podían resolver midiendo la potencia desarrollada por la máquina cuando estaba accionando el conjunto representado por la maquinaria de la planta. Watt resolvió este problema en dos etapas. En la primera, alrededor de 1790, llevó a cabo la introducción de válvulas a presión. La segunda, en 1796, fue la evolución de este método en el *diagrama indicador*<sup>44</sup>. En estas etapas se reconoce la sucesiva y gradual evolución desde el concepto de *trabajo mecánico* al de *trabajo termodinámico*. Las válvulas a presión debían registrar la presión máxima y mínima en el cilindro, cuya diferencia daba una

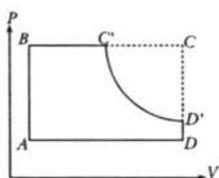
indicación de la presión efectivamente desarrollada, según la cual se ve que se pasa de la fuerza mecánica a la presión del fluido. En 1796, Southern, asistente de Watt, perfeccionó este método al conseguir registrar la presión de forma continua (fig. 6.a) a través de una pluma que trazaba una línea de una altura proporcional a la presión, sobre una hoja que se movía hacia arriba y hacia abajo, sincrónicamente, con la posición del pistón. En otras palabras, se trazaba realmente *el ciclo termodinámico de la máquina en un diagrama P-V* (al que llamó *diagrama indicador*), y se definía por primera vez *la potencia desarrollada por la máquina a través del área de esta curva* (fig. 6.b).





El diagrama indicador fue empleado por Watt para regular la abertura de las válvulas de la máquina y mejorar así su eficiencia. Esta aplicación le condujo a otras realizaciones muy importantes. Pensemos en una máquina de vapor *ideal*—que no tiene nada que ver con la máquina ideal de

Carnot, que veremos después— en la que la apertura y cierre de las válvulas son instantáneas y que, por tanto, no hay pérdidas de presión, como se muestra en los diagramas de la fig. 6.b, cuyo ciclo es un rectángulo en el diagrama P-V (fig. 7, ciclo ABCD). En A se abre la llave de la caldera y la presión en el cilindro sube instantáneamente a B, BC es la expansión a presión constante con la llave abierta, en C se cierra la llave de la caldera y se abre la del condensador, la presión baja instantáneamente a D, y al final el pistón baja a presión constante. Watt se dio cuenta de que se podía cerrar la llave de la caldera antes de que el pistón hubiese subido hasta al máximo, por ejemplo en el punto C' de la fig. 7. En ese caso, la presión residual del vapor sería suficiente para el levantamiento final del cilindro, ahorrando de esta forma vapor. Esto se denominó *el principio de expansión* de Watt. Puede observarse que la parte de curva C'D' constituye probablemente la primera *transformación adiabática* que se haya realizado. Por cierto, en la práctica era aproximada (véanse los diagramas indicadores de la fig. 6.b), pero el principio, esto es, la interrupción de cualquier transmisión de calor al vapor del cilindro, ahorrando de esta forma energía, era efectivo.



### *La Revolución Francesa y la ciencia: las modernas ramas científicas*

Como ya se ha señalado, en esta reconstrucción no vamos seguir en detalle el desarrollo histórico de la termodinámica. Simplemente, vamos a enfocar algunos momentos de cambio y de desarrollo de los conceptos científicos en correspondencia con el estado del desarrollo social y la demanda de tecnología. Por lo tanto, como último punto de referencia haremos una discusión de la contribución de Sadi Carnot, *Reflexiones sobre la Potencia Motriz del Fuego*<sup>45</sup>, de 1824, principalmente en conexión con lo que se ha visto hasta ahora.

Sadi Carnot (1796-1832) era también, como su padre, oficial del *génie* militar y estaba muy interesado en aspectos prácticos<sup>46</sup>. Murió muy joven. En

la citada obra que dejó publicada emerge muy claramente el profundo influjo procedente de los progresos ingleses (que, repetimos, se convirtió en modelo para la cultura francesa de buena parte del siglo XVIII, que se manifestó en la *Ilustración* y la *Encyclopédie*). Su admiración queda clara desde la introducción, donde reconoce que Inglaterra debe su gran potencial industrial, principalmente, a las máquinas de vapor, y añade, además, que:

«Las máquinas de fuego parecen destinadas a provocar una gran revolución en el mundo civilizado[...] Si algún día los perfeccionamientos realizados en la máquina de fuego se extendieran tanto para hacerla más económica en su fabricación como en el gasto de combustible, reuniría todas las cualidades deseables y daría a las artes industriales un progreso que sería difícil prever en toda su extensión».

La forma de razonamiento de Sadi muestra de forma muy clara el nivel de los conocimientos de su época sobre el calor. Aunque, como hemos visto anteriormente, se habían introducido algunos conceptos fundamentales (como calor específico, calor latente, y la necesidad de dos fuentes de calor en una máquina térmica cíclica), no existía una *ciencia del calor* en su conjunto, ni siquiera se sabía qué era el calor ni cómo se podía tratar desde un punto de vista físico. De hecho, fue propiamente en estos mismos años cuando se percibió la necesidad de elaborar una teoría del calor basada en principios específicos.

Este fue un proceso general. La Revolución Francesa de 1789 había desarrollado un gran interés por las ciencias, como hemos visto en conexión con la figura de Lazare Carnot, y su papel en los principales acontecimientos de todo el periodo revolucionario, como, por ejemplo, la aludida movilización de los científicos franceses, bajo su dirección, frente la ofensiva de la Primera Coalición<sup>48</sup>. También en Francia en el periodo revolucionario se fundaron las grandes instituciones científicas francesas (entre otras, el *Institute*, y la *École Polytechnique*, primer modelo de los modernos Politécnicos), convirtiéndose la actividad científica en una *profesión* financiada por el Estado. Los científicos se convirtieron en profesionales con un salario, mientras que, por el contrario, en Inglaterra siguieron siendo, durante mucho tiempo, individuos ricos que podían hacer esta actividad independientemente a partir de sus propios recursos.

Con las nuevas condiciones, en Francia nacieron las primeras formas de especialización de las disciplinas científicas. El *Institut National*, la más alta institución de la ciencia francesa, se dividió en clases y secciones, contrariamente a la vieja *Académie des Sciences* suprimida por la revolución. Las ramas científicas específicas modernas se articularon buscando su propio estatuto, basado

sobre principios propios. Así, por ejemplo, se desarrollaron el Análisis Matemático, gracias, entre otros, a las aportaciones de Cauchy; la ciencia de la Electricidad, en la que descuellan los trabajos de Ampère, o las variadas contribuciones de Biot, Savart y otros, etc. En este marco se expresó también el intento de fundar la Ciencia del Calor, desarrollada fundamentalmente por Fourier, Sadi Carnot, y Clapeyron. Por ejemplo, en la obra de Fourier de 1822 se lee

«Cualquiera que sea el campo de aplicación de las teorías mecánicas, éstas no se aplican a los efectos del calor. *Estos constituyen un orden especial de fenómenos, que no pueden explicarse con los principios del movimiento y del equilibrio.* Durante mucho tiempo hemos contado con ingeniosos instrumentos para medir muchos de estos efectos; se han recogido preciosas informaciones; pero por estos caminos sólo hemos logrado resultados parciales, y no la *demonstración matemática de las leyes que los incluyen a todos*» [Cursivas mías. A.B.].

Fourier formalizó la dinámica del calor así como su transmisión. Sadi Carnot, por su parte, estudió más bien la *potencia motriz* del calor.

#### *Las Reflexions de Sadi Carnot de 1824*

En esta obra también Sadi Carnot empezaba reconociendo la necesidad de fundamentar una ciencia autónoma, específica, para el calor:

«Para observar en toda su generalidad el principio de la producción de movimiento a través del calor, es necesario concebirlo independientemente de cualquier mecanismo, de cualquier agente particular [...]

Las máquinas que no realizan su movimiento por causa del calor... pueden estudiarse hasta los mínimos detalles con la teoría mecánica. Todos los casos están previstos, todos los movimientos imaginables están sujetos a principios generales sólidamente establecidos y aplicables en cualquier circunstancia. Esta es la característica de una teoría completa. Una teoría parecida falta, evidentemente, para las máquinas de fuego. La lograremos, sólo, cuando se amplíen suficientemente las leyes de la física, cuando se hagan lo bastante generales para hacer conocer anticipadamente todos los efectos del calor cuando éste actúa de modo determinado sobre un cuerpo cualquiera<sup>50</sup>».

Es importante darse cuenta de que Sadi no disponía de ningún principio para fundamentar una posible *teoría del calor*. Pero existía una rama, que ya se había fundado de forma bastante sólida, que parecía tener algunas fuertes analogías con el calor, sobre principios que empezaban a quedar claros: la teoría de las máquinas mecánicas, en particular de las hidráulicas, cuyas bases hemos visto anteriormente introducidas por Smeaton y por el

padre de Sadi, Lazare Carnot. De hecho era muy común en aquella época considerar el calor como un fluido imponderable (*fluido calórico*, introducido hacía 50 años por Lavoisier como parte de su programa para eliminar el flogisto de la química). Parece así que haya sido muy natural para Sadi razonar sobre la base de la *analogía hidráulica*, que constituyó el primer intento de fundar una teoría del calor.

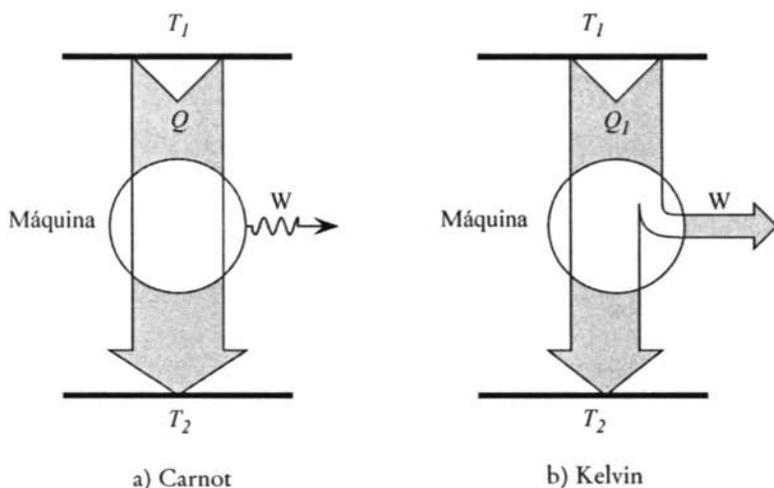
La obra de Sadi de 1824 se basa en la idea de que el calor es un fluido *cuya cantidad se conserva*, y que puede encontrarse a *niveles térmicos* diferentes —o sea a temperaturas diferentes— que indicaremos por  $T$ . La idea básica era que estos *niveles térmicos* de calor sean los análogos a los distintos *niveles de altura* del agua; es decir, así como el agua puede producir trabajo bajando de una altura superior  $h_1$  a una inferior  $h_2$ ,, así mismo, el calor puede hacerlo *bajando* de una *altura térmica* superior  $T_1$  a una inferior  $T_2$ .

«La producción de movimiento en las máquinas de vapor viene siempre acompañada por una circunstancia a la que tendremos que dedicar nuestra atención. Esta circunstancia es el restablecimiento del equilibrio en el calórico; o sea su paso desde un cuerpo en el que la temperatura es más o menos elevada, a otro en que la temperatura es más baja. [...] La producción de potencia motriz en las máquinas de vapor, es entonces debida no al consumo de calórico, sino a su transporte desde un cuerpo caliente a uno frío.

[...] podemos comparar la potencia motriz del calor a la de un salto de agua [...] la potencia motriz de un salto de agua depende de su altura y de la cantidad de líquido; análogamente, la potencia motriz del calor depende de la cantidad de calórico empleado y de lo que podríamos llamar la altura de su caída, es decir, la diferencia de temperaturas de los cuerpos entre los que tiene lugar el intercambio de calórico<sup>31</sup>».

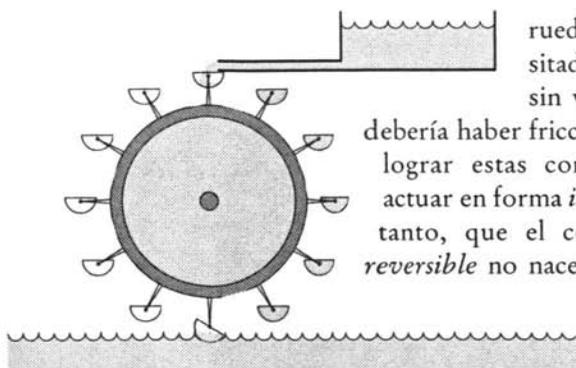
Hoy sabemos que el calor no es un fluido que se conserva, sino más propiamente energía que se intercambia, de forma parecida al trabajo. Pero es interesante ver de qué manera procedió, tentativamente, la investigación en una rama todavía desconocida, a base de intentos, analogías con otras ramas más conocidas, y logrando resultados importantes, aunque basados sobre hipótesis que más tarde resultaron equivocadas, como, por ejemplo, la aludida conservación del calor<sup>32</sup>. El esquema de Sadi de la máquina térmica en términos de flujo puede ser representado como en la fig. 8.a, en comparación con el esquema actual basado en la formulación de Kelvin del segundo principio, fig. 8.b. En el esquema de Sadi hemos indicado el trabajo  $W$  producido por la máquina con una representación distinta a la del flujo de calor, porque en principio serían dos magnitudes físicas diferentes, que se identifican solo cuando se reconoce

que el calor es una manifestación de energía. Veremos ahora cómo Sadi supo desarrollar conceptos sumamente importantes desde esta analogía<sup>53</sup>. Si comparamos este esquema con el de una rueda hidráulica, podemos aprovechar los principios que vimos enunciados por Smeaton para preguntarnos cuáles deberían ser las condiciones para obtener el trabajo máximo de una cantidad de calor concreta que pueda caer a través de una caída térmica determinada.



Se puede desarrollar el razonamiento que en la obra de Sadi se encuentra en forma parcialmente implícita. Veremos que el concepto de *máquina ideal de Carnot*, que tiene un papel tan importante en la termodinámica, no nació por casualidad, sino de un *procedimiento racional riguroso*. Aunque el trabajo de Sadi no es matemático (estaba dirigido a los ingenieros), su razonamiento es formal: es decir, que se ubica en el marco de la ciencia francesa que procedía del siglo de la Ilustración.

Smeaton había aclarado que la potencia motriz del agua se pierde por dos motivos: *a) cada vez que el agua recorre una diferencia de altura en caída libre*, o sea, sin accionar la rueda (como en la fig. 3), debido a que al ser sus choques inelásticos adquiere una energía cinética que no comunica a la rueda; *b) por causa de fricciones*. Es interesante ver cómo se podría diseñar una *rueda hidráulica ideal* (fig. 9). En ésta, el agua debería ser transferida a la rueda sin una diferencia de altura y *sin velocidad inicial* (las dos condiciones están relacionadas); debería, además, descender la diferencia total de altura accionando la



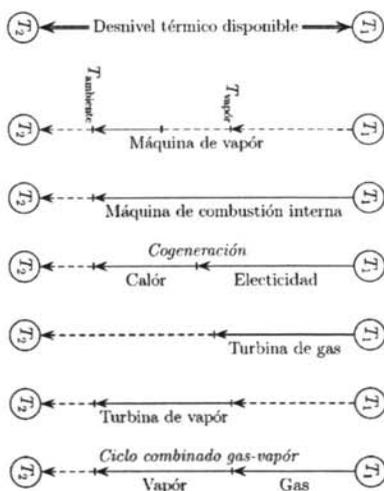
rueda; y al final debería ser depositada al nivel más bajo sin salto y sin velocidad (y, obviamente, no debería haber fricciones). Queda claro que para lograr estas condiciones la rueda debería actuar en forma *infinitamente lenta*. Se ve, por tanto, que el concepto de *transformación reversible* no nace sólo en relación con la termodinámica y, también, que el de *máquina ideal* es más general. No sólo eso, una máquina ideal, además de

que sea imposible construirla en la práctica, sería de todos modos una máquina *inútil*, porque debería actuar en forma *infinitamente lenta*, o sea, desarrollaría una *potencia nula*.

Si ahora transferimos estos criterios a la máquina térmica, utilizando la analogía hidráulica, veremos que se obtiene directamente la máquina ideal de Carnot. La eliminación de cualquier fricción es obvia. El criterio básico para obtener el trabajo máximo posible de la caída del calor tiene entonces que ser el siguiente: *el calor no puede transferirse a través de un salto de temperatura* (no debe descender en caída libre), o lo que es lo mismo, *cada transferencia de calor debe hacerse entre cuerpos a la misma temperatura*:

«La condición necesaria del máximo [de la fuerza motriz del calor] en los cuerpos empleados para realizar la potencia motriz del calor es que no debería ocurrir ningún cambio de temperatura que no sea debido a un cambio de volumen. Recíprocamente, cada vez que esta condición se respeta se logrará el máximo. Nunca se debería perder de vista este principio en la construcción de las máquinas térmicas, en las que constituye su base fundamental. Si no se puede respetar estrictamente, se debería alejarse de él lo menos posible.

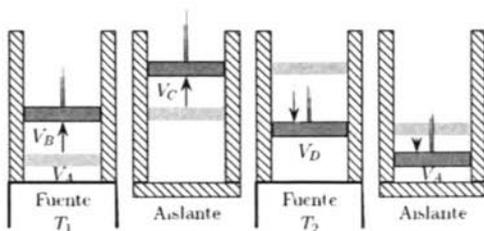
Cualquier cambio de temperatura, que no sea debido a un cambio de volumen o a una acción química (acción que provisionalmente suponemos ausente), es necesariamente debido

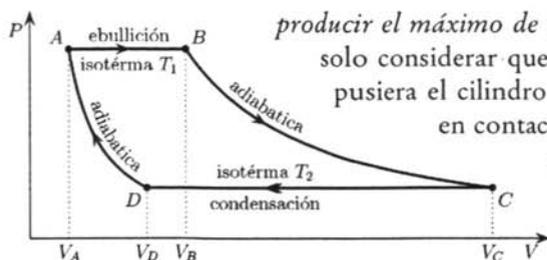


al paso directo del calórico desde un cuerpo más o menos caliente a otro más frío. Este paso ocurre, principalmente, por el contacto entre cuerpos a temperaturas distintas; por lo que este contacto debería evitarse lo máximo posible, aunque, probablemente, no pueda lograrse totalmente. Pero, al menos, se debería actuar de forma que los cuerpos que se ponen en contacto tengan, entre ellos, diferencias de temperatura lo más pequeñas que sea posible. [...] En realidad el funcionamiento puede no ocurrir exactamente como lo hemos asumido. Para que el calor pase de un cuerpo a otro, es necesario que el primero tenga una temperatura más alta, pero podemos suponer que esta diferencia de temperatura sea tan pequeña como queramos. Podemos pues, en teoría, considerarla despreciable [*infinitesimal*], sin destruir con esto la exactitud de los razonamientos<sup>44</sup>.

Obsérvese, entonces, que en la máquina ideal las transferencias de calor se harán en forma *infinitamente lenta* (hoy hablamos de transformaciones *reversibles*), con lo que la potencia generada por la máquina ideal sería cero.

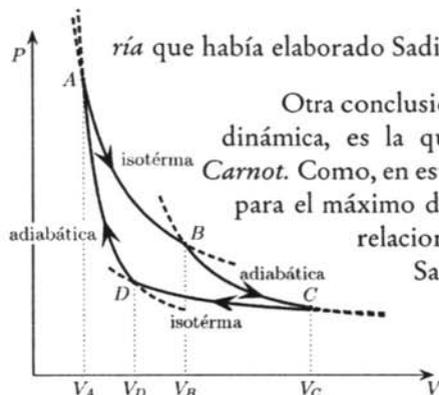
Es muy interesante observar cómo Sadi Carnot, para satisfacer estos criterios que surgían de la teoría que había asumido, *tuvo que contradecir la gran invención de Watt, e introducir en el ciclo ideal una transformación que, a primera vista, es absurda!* En efecto, en primer lugar, en la máquina ideal no se pueden utilizar dos recipientes separados a temperaturas diferentes, porque el calor no puede transferirse a través de una diferencia finita de temperatura (se puede añadir además que el paso del vapor a través de la llave introduciría una fricción): *la máquina ideal debe estar compuesta, por tanto, de un solo cilindro cerrado*. En segundo lugar, el cilindro debe tener paredes perfectamente aislantes para el calor, y puede ponerse en contacto con dos fuentes de calor a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  sólo cuando el fluido material en el interior esté a las mismas temperaturas  $T_1$  o  $T_2$ : de estos requisitos se obtiene el esquema de la máquina ideal, fig. 10, que corresponde al ciclo termodinámico de fig. 11 (en la fig. *b* se representa el ciclo que se conoce habitualmente para un gas ideal; en la *a* se representa un ciclo para un sistema líquido-vapor, en el que las transformaciones isotérmicas son también isobáricas, porque corresponden a cambios de fase). En fin, hay una transformación del ciclo que a primera vista, como decimos, parecería absurda. Cuando el sistema ha cedido el calor a la temperatura inferior se encuentra en el volumen  $V_D$  y a la temperatura  $T_2$ : en este punto se aísla el cilindro y se hace la compresión  $AD$ . ¿No es absurdo que se realice un trabajo sobre un sistema que tiene que





producir el máximo de trabajo? Pues, no lo es, con tan solo considerar que el despilfarro sería mayor si se pusiera el cilindro a temperatura  $T_2$  directamente en contacto con la fuente de calor a temperatura  $T_1$  y el calor pasara a través de un salto finito de niveles de temperatura sin hacer funcionar la máquina. Esto es lo que prescribe la teo-

ría que había elaborado Sadi Carnot.



Otra conclusión de Sadi, muy importante en la termodinámica, es la que hoy conocemos como *teorema de Carnot*. Como, en este punto del razonamiento, las condiciones para el máximo de la eficiencia de la máquina sólo están relacionadas con el salto térmico disponible, a Sadi le parece natural concluir que

«[...] el máximo de potencia motriz que resulta del empleo del vapor es también el máximo de potencia motriz realizable con cualquier otro medio<sup>55</sup>».

«La potencia motriz del calor es independiente de los agentes empleados para producirla; su cantidad es fijada, únicamente, por las temperaturas de los cuerpos entre los cuales se efectúa, en última instancia, el paso del calórico<sup>56</sup>».

Sadi no pudo obtener la dependencia de la eficiencia de la máquina con el salto de temperaturas<sup>57</sup> y llega a la siguiente observación:

«En la caída del agua la máxima potencia motriz es rigurosamente proporcional a la diferencia de niveles de los depósitos. En la caída de calórico, la potencia motriz se incrementa, sin duda, con la diferencia de temperaturas entre el cuerpo caliente y el cuerpo frío pero no sabemos si es proporcional a esta diferencia. Ignoramos por ejemplo si la caída de calórico de 100 a 50 proporciona más potencia motriz que la caída del mismo calórico de 50 a 0<sup>58</sup>».

Las últimas páginas del ensayo de Sadi contienen varias recomendaciones valiosas para mejorar en la práctica el rendimiento de las máquinas de vapor (que no son máquinas ideales). Esto se conseguiría aumentando la diferencia de temperatura entre el cilindro y el condensador; con los combustibles disponibles podía llegarse a 1000 grados de diferencia frente a los 140 grados que se

aprovechaban en las máquinas habituales (el progreso fundamental será la invención de los motores de combustión interna). Por la misma razón, eran preferibles las máquinas que trabajaban a alta presión y las máquinas de dos cilindros que permitían una mayor expansión.

En este sentido cabe subrayar uno de los resultados de mayor alcance tecnológico del ensayo de Sadi. El se dio cuenta de que lo que había sido inicialmente la gran ventaja del vapor —o sea su propiedad de enorme aumento de volumen y de presión con aumentos moderados de temperatura— se volvería una desventaja en el futuro. El hecho de que la presión del vapor aumente más rápidamente que la temperatura, habría hecho difícil trabajar con temperaturas alrededor de 1.000° C por la combustión del carbón:

«[...] una de las desventajas más grandes del vapor es que no es posible emplearlo a alta temperatura sin usar recipientes de extraordinaria resistencia. No sucede lo mismo con el aire, para el cual no hay una relación fija entre la presión y la temperatura. El aire sería, entonces, mejor que el vapor para utilizar la potencia motriz de caídas de calórico desde altas temperaturas; pero, probablemente, en el intervalo inferior el vapor sea más conveniente. Se podría pensar que la misma cantidad de calor podría obrar antes sobre el aire y luego sobre el vapor. El aire conservaría, después de su uso, una alta temperatura y en lugar de emitirlo directamente en la atmósfera, podría circular alrededor de una caldera de vapor».

El uso del aire atmosférico para generar la potencia motriz del calor pone dificultades muy serias en la práctica; pero estas no son insuperables. Si se pudiesen resolver, el aire sería sin duda mucho más efectivo del vapor<sup>39</sup>».

Este principio habría sido en el futuro la base de los motores térmicos de aire de alta eficiencia desarrollados alrededor del final del siglo: *antes de Carnot el énfasis se había puesto en lograr la máxima expansión a temperaturas razonablemente bajas; después de él se pondrá en utilizar al el salto de temperatura*. Aquí también la innovación fundamental será la de los motores de combustión interna.

### *Potencialidades del razonamiento de Sadi Carnot*

Aunque hoy sabemos que la base física del razonamiento de Carnot es incorrecta, pienso que su razonamiento, por su sencillez y su eficacia intuitiva, tiene potencialidades muy interesantes para entender de forma elemental e informal fenómenos bastante complejos. En concreto, pienso que —con el cuidado que se requiere para subrayar que en realidad el calor no es un fluido y no

se conserva— el criterio de Carnot pueda ilustrar de forma intuitiva conceptos muy actuales relacionados con el problema energético que es, como se sabe, un gran problema del mundo en que vivimos, y en concreto del despilfarro de energía y de los criterios para un uso racional de la energía.

Esto no debe maravillar. De hecho el criterio de Carnot para lograr el máximo rendimiento es equivalente al razonamiento que se encuentra en la base de la *entropía*, y puede además considerarse como la primera introducción de la substancia de este concepto en una forma muy cualitativa e intuitiva. En efecto, si una cantidad de calor  $Q$  pasa de una fuente de calor con temperatura absoluta superior  $T_1$  (y que entonces pierde el calor) a una con temperatura menor  $T_2$  (y que entonces recibe el calor), esto conlleva una variación de entropía

$$\Delta S = \frac{-Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} > 0$$

Podría ser  $\Delta S = 0$  sólo si fuera  $T_2 = T_1$ , como en el criterio de Carnot.

Con el estallido de la crisis energética de 1973 nos hemos dado cuenta de que la energía no es inagotable, tiene un precio, y tiene que utilizarse evitando despilfarros, que anteriormente a esta fecha ni se percibían. El ejemplo convertido en clásico es el del calentador eléctrico de agua, en el que se calienta agua a pocas decenas de grados utilizando energía preciosa como la energía eléctrica, que además se produce en centrales que tienen eficiencias de 30-40% (o sea despilfarrando casi 2/3 de la energía térmica del combustible). Como se sabe, el segundo principio de la termodinámica introduce el concepto de *calidad*, y de *degradación* de la energía.

Los conceptos utilizados por Sadi Carnot nos permiten entender de inmediato e intuitivamente las principales razones de despilfarro de energía, los criterios y métodos de uso racional de la energía. En primer lugar, tenemos que comparar las formas de energía de calidad más alta, o sea la eléctrica y la mecánica, con el calor, que es energía de calidad más baja: y así como de la energía eléctrica y mecánica se puede obtener calor a alta temperatura sin límites, por el contrario la transformación del calor en estas formas de energía siempre tiene límites (por el segundo principio). Podemos, en este caso, considerar, en la lógica del razonamiento de Carnot, que estas energías sean equivalentes a *calor a temperatura infinita*. El criterio de Carnot asocia el despilfarro de energía disponible a cualquier parte del salto de temperatura que no se utilice para fines prácticos, o sea sin accionar dispositivos energéticos. El despilfarro del calentador eléctrico se entiende de inmediato, porque utiliza electricidad, o sea *calor a*

*temperatura infinita*, para calentar agua a pocas decenas de grados, con lo que la parte mayor del salto de temperatura no se utiliza.

El uso racional de la energía impone utilizar al máximo posible el salto de temperatura. Las soluciones más modernas son, por ejemplo, el principio de la *cogeneración*, o sea la generación simultánea de trabajo y calor, o de energía eléctrica y calor. Una central eléctrica emite calor a temperatura bastante alta, pero no tanto como para accionar otra central. Este calor, que en el pasado se despilfarraba descargándolo en el medio ambiente, puede recuperarse y utilizarse para usos adecuados<sup>60</sup>. Si por ejemplo una planta industrial necesita para sus procesos energía eléctrica y calor en una cierta cantidad y a una determinada temperatura, es posible diseñar y regular un sistema de conversión de energía térmica de modo que produzca esta energía y este calor. Otro ejemplo que se da en los países fríos es el de la *telecalefacción*. Aquí se recolecta el calor que la central descarga y se distribuye con un sistema adecuado de tuberías a los usuarios privados o industriales para usos térmicos a baja temperatura, tales como usos sanitarios, calefacción de edificios, o pre-calefacción de fluidos para procesos industriales. Estas pueden considerarse formas de cumplir el requisito de utilizar al máximo el salto de temperatura de que se dispone postulado por Carnot.

Otro ejemplo puede ser el *ciclo combinado de gas y vapor* que está logrando eficiencias altísimas (de más del 50%). Una central funciona con una turbina de gas, que trabaja a una temperatura muy alta (la de combustión del gas) y descarga gas a temperatura de 500-600 °C: con este gas se puede vaporizar agua y accionar una turbina de vapor, cumpliendo así el requisito de Carnot también.

¡La teoría de estos procesos puede ser bastante complicada, pero el criterio de Carnot permite explicarla bien hasta a un niño!

### *El camino hacia los principios de la termodinámica*

No vamos a seguir aquí en detalle el amplio camino recorrido hasta la formulación definitiva de los principios de la termodinámica. Lo que nos interesa primordialmente es entender las fases de los cambios fundamentales en las tareas de la ciencia y en los conceptos que se introdujeron y no tanto la descripción de una reconstrucción detallada del desarrollo de la ciencia. Por tanto, de las aportaciones que ocurrieron después podemos limitarnos a recordar las etapas fundamentales.

El trabajo de Sadi Carnot fue ignorado por los físicos durante algunos años, hasta que en 1834 Emile Clapeyron lo reconsideró. Un desarrollo físico fundamental vino de las investigaciones de Joule, entre los años 1842 y 1848, en las que demostró que el calor no es un fluido, sino energía que se transfiere y se convierte. En 1849, Kelvin, al recuperar el trabajo de Carnot, observó una aparente contradicción entre su teoría del fluido calórico y los resultados de Joule. A su objeción respondió Clausius, y en una serie de artículos de Kelvin y Clausius entre 1849 y 1951 quedó enunciado el segundo principio de la termodinámica, en las dos formulaciones que conocemos. En los años setenta Clausius introdujo el concepto de entropía, que también nos parece haber sido anticipado aunque en forma implícita, aunque correcta en su utilización práctica, a través del criterio de eficiencia de Sadi Carnot, que hemos discutido ampliamente.

## NOTAS

1. LEVY-LEBLOND [1979, p. 25].
2. Una primera crítica a la evolución acumulativa fue desarrollada por KUHN [1962] en un famoso ensayo, *La Estructura de las Revoluciones*, que ha jugado un papel importante pero tiene también limitaciones. Kuhn introdujo la idea de un desarrollo de la ciencia por fases de revoluciones científicas, separadas por fases de *ciencia normal*, en las que no se descubren hechos nuevos, si no se aplican las nuevas teorías sacando todas sus implicaciones. Esta tesis de Kuhn, aunque sea valiosa, «subraya la autonomía relativa de la ciencia: podrán existir demandas sociales pero éstas tienen que ser traducidas en términos de problemas científicos y por ello se exige su incorporación al tejido conceptual de la ciencia que proviene del paradigma vigente. Pero aquí se absolutiza un lado de la dinámica más general: falta por considerar lo que Engels indicó claramente: una necesidad técnica impulsa más a la ciencia que diez universidades, es decir, no existe una acumulatividad de saber absolutamente al margen de las demandas sociales» [NÚÑEZ JOVER, 1994, pp. 13-14].
3. NÚÑEZ JOVER [1994, p. 14].
4. NÚÑEZ JOVER [1994, p. 19].
5. No es fácil de encontrar en las historias de la tecnología valoraciones de este tipo sobre las relaciones entre *ciencia y técnica*, y de las dos con el desarrollo social. Hay buenas reconstrucciones de la *primera revolución industrial* del siglo XVIII en Inglaterra: por ejemplo la clásica de MANTOUX [1979]; véanse también los ensayos muy interesantes y específicos de MUSSON y ROBINSON [1969]. Por lo demás recomendamos una obra que nos parece sumamente valiosa y que abarca a grandes rasgos, pero con un análisis muy profundo y atento, los aspectos que esta-

- mos discutiendo, el entero desarrollo de la revolución industrial en Occidente: LANDES [entre 1948 (Vol. 1) y 1982 (Vol. 7)].
6. Cabe citar un artículo muy interesante e instructivo sobre el proceso conceptual que Diesel siguió en el invento de su motor: él se propuso realizar las condiciones de la máquina ideal de Carnot, lo que naturalmente era imposible: pero, al tener una *teoría*, sí pudo alcanzar resultados nuevos. Véase BRYANT [1969].
  7. NEWTON [1952, p. 340].
  8. NEWTON [1952, libro III, question 20]. En esta cita aparece la razón de la disputa con Leibniz, de la que hablaremos después.
  9. Un primer ensayo, que ya es un clásico, fue el de HESSEN [1931].
  10. Una análisis clásico de la figura y la obra de Galileo es la de KOYRÉ [1990].
  11. En la física de Aristóteles y de toda la Edad Media los fenómenos en la Tierra estaban sujetos al cambio, a la irreversibilidad, mientras que las esferas celestes eran perfectas, sin fricción, en el movimiento eterno imprimido por Dios en la creación.
  12. Las disputas entre Newton y Leibniz son analizadas con gran profundidad histórica por A. Koyré, en particular en KOYRÉ [1982]; Koyré ha publicado también ensayos recogidos como *Etudes Newtoniennes*, KOYRÉ [1968].
  13. Esta se suele mencionar como *fase de la manufactura*, aunque es probable que tal vez la mecanización del trabajo la haya precedido (pueden verse por ejemplo las referencias en la nota 3): es una sutil cuestión histórica que no influye en nuestro análisis.
  14. El fermento de actividades que se desarrolló en los medios de la burguesía emprendedora, la organización espontánea de las sociedades culturales y científicas, las novedades técnicas y científicas que surgieron han sido analizadas por MUSSON y ROBINSON [1969].
  15. Hay una empresa que merece la pena mencionarse, porque tiene varios aspectos significativos, empezando por una observación. Los antiguos romanos habían descubierto el llamado *cemento hidráulico*, ligando la torba *pozolana* con cal, que era capaz de fraguar bajo el agua. Con la desaparición del Imperio Romano la técnica de construir con cemento y hormigón se perdió. En 1757 se le encargó a Smeaton la construcción de un faro en la roca llamada Eddystone en el Canal de La Mancha, para lo cual se dedicó a investigar el material cementante para la construcción y llegó a la conclusión de que para obtener cemento hidráulico las calizas con alguna proporción de arcillas eran muy superiores a las calizas puras [DE LAS CUEVAS, 1998]. Esto da una idea de la amplitud de los intereses y de las contribuciones de Smeaton. Además, la construcción del faro puso graves problemas debido a la pequeñez de la roca de Eddystone y al estado del movimiento del mar en ese Canal. El transporte y la descarga del material del barco pudo realizarse a veces con peligro para la misma vida del ingeniero (la historia está contada en la obra de SMILES [1861-62]). Esta empresa me parece que da una idea concreta del entusiasmo con que

los representantes de la nueva clase burguesa actuaban, de su confianza en una misión para transformar el mundo y progresar.

16. SMEATON [1759, p. 100].
17. SMEATON [1759, p. 123].
18. Hace falta subrayar la importancia de esta definición, que se corresponde bien a la situación histórica: en la Inglaterra del siglo XVIII, bajo los desarrollos de la Revolución Industrial y la iniciativa de la clase burguesa, dominaba en general un enfoque empirista y los estudios físicos, tanto en la mecánica como en los fenómenos del calor, tenían un enfoque práctico; mientras que en la Francia de ese siglo, en que dominaba todavía el poder de la monarquía absoluta y la clase burguesa no había tomado el poder; dominaba el enfoque racional característico de la Ilustración.
19. SMEATON [1759, p. 105].
20. *Íbidem*, pp. 105-106.
21. *Íbidem*, pp. 124-125.
22. *Íbidem*, p. 125.
23. *Íbidem*, p. 128.
24. *Íbidem*, p. 130.
25. SMEATON [1776].
26. *Íbidem*.
27. SMEATON [1782].
28. El estudio más detallado sobre la figura y la obra de Lazare Carnot es el de GILLESPIE [1971]. Véase también SCOTT [1970, Capítulo V].
29. CARNOT L. [1803].
30. En 1690 Papin había trabajado en un modelo llamado «olla de Papin». Antes de la de Newcomen, una máquina térmica que funcionaba fue inventada en 1698 por Thomas Savery, para bombear el agua de las minas (de hecho la patente llevó el expresivo título de *The Miner's Friend*), pero ésta era una máquina sin pistón, que utilizaba vapor de alta presión, y que no jugó un papel importante en los desarrollos siguientes. Hace falta mencionar que recientemente se ha hallado en Valladolid un manuscrito del año 1606 de Jerónimo de Ayanz —que tampoco era un científico— con una patente de una máquina que resulta ser muy similar a la de Savery: GARCIA TAPIA [1998].
31. La ciencia académica no poseía todavía ningún concepto que le permitiera hacer cálculos de esa realización del puro genio técnico que era la máquina de vapor; pero es preciso, sin embargo, mencionar a los estudiosos que habían intentado hacer las primeras consideraciones cuantitativas: DESAGULIERS [1719]. Henry Beighton, otro destacado ingeniero y científico práctico, que construyó ruedas hidráulicas y máquinas de Newcomen presentó en 1717 un cálculo físico-mecánico de la potencia de una

- de una máquina, que publicó en las *Philosophical Transactions*. (Vease MUSSON Y ROBINSON [1969].
32. La renovación de las universidades, aunque retrasada respecto a los desarrollos de la revolución industrial y a la nueva cultura desarrollada por la clase burguesa, empezó por las universidades escocesas.
  33. Por ejemplo, en 1768 colaboró en el proyecto del canal entre el Forth y el Clyde. A este respecto, es necesario recordar la importancia de estas vías de comunicación.
  34. Véanse, por ejemplo, las obras de CARDWELL [1965,1971, 1996]. Una buena historia de la tecnología traducida al español, en la que hay un capítulo de historia de las máquinas térmicas, es la de DERRY [1977].
  35. ¿Cómo no reparar en la *analogía* entre este razonamiento y el de Smeaton, si se substituye el término temperatura con al de altura del agua? que quedará clara y explícita, en tanto que fundamental, en el trabajo de Sadi Carnot. Se puede además observar que, así como el agua puede bajar en caída libre o bien accionando la rueda, el calor puede pasar de la temperatura más alta a la inferior o bien directamente, por conducción o convección, o bien accionando la máquina. Luego se verá como se planteó y se desarrolló este problema.
  36. Ese término, de evidente extracción mecánica, se utilizaba en la física de fluidos. Autores tan distantes cronológicamente como Boyle y Gay Lussac calificaban el tema de sus investigaciones como de la *elasticidad* de los gases.
  37. Esta especificación parece equivalente a la condición de máquinas *cíclicas* en la formulación de Kelvin del segundo principio.
  38. SMILES [1865].
  39. Un estudio detallado de este asunto se encuentra en la citada obra de MUSSON Y ROBINSON [1969].
  40. RITSON [1958].
  41. Se refiere aquí a la unidad de caballo de vapor.
  42. Carta de Southern a Ainsworth, 28 de Junio de 1790.
  43. Carta de Watt a Con, 19 de Marzo de 1790.
  44. HILLS Y PACEY [1972]]; véase también HILLS [1970].
  45. CARNOT S. [1824].
  46. La figura de Sadi Carnot está contemplada, por ejemplo, en la introducción del traductor de la edición inglesa citada en la nota precedente.
  47. CARNOT S. [1824, p. 2-3].
  48. No debe engañarnos el hecho de que Lavoisier, durante el Terror, fuera guillotinado (sin que Lazare Carnot pudiese hacer nada) por el tribunal revolucionario, a cuyo Presidente se atribuye la sentencia de que *la Revolución no necesitaba de científicos*. En realidad, Lavoisier, que había fundado la química moderna, basándola en medi-

ciones exactas por medio de la balanza, aparecía comprometido con el régimen precedente, principalmente por haber sido miembro de la *Ferme General*, la agencia tributaria de la época. Por la misma razón, el compromiso con el antiguo régimen, también fue disuelta la *Académie des Sciences*. En ambos casos, por supuesto, se fundaron nuevas instituciones de hechura más moderna.

49. FOURIER [1822].

50. CARNOT S. [1824, pp. 8-9].

51. *Ibidem*, p. 9-10.

52. Cabe subrayar que hay un manuscrito póstumo de Sadi Carnot, que se encontró y se publicó al final del siglo pasado, en que el discute la naturaleza energética del calor, y aún hace una evaluación cualitativamente buena del equivalente mecánico del calor: el manuscrito se encuentra publicado por ejemplo en la traducción al inglés citada.

53. El concepto de *analogía* se volverá más y más importante al final del siglo XIX, cuando se acepte la utilización de hipótesis y se desarrolle verdaderamente la *física teórica*. La *analogía* se transformará, entonces, en *modelo* físico y adquirirá una formulación matemática (la analogía con fluidos resultará fundamental, por ejemplo, en Maxwell para lograr la teoría del electromagnetismo). Véase por ejemplo mi escrito *Las raíces de la Revolución Científica del Siglo XX y el desarrollo de la Mecánica Cuántica*, Universidad de La Habana, 1998.

54. CARNOT S. [1824, pp. 23-25].

55. *Ibidem*, p. 22.

56. *Ibidem*, p. 38.

57. Pero me parece interesante notar que se podría imaginar el siguiente razonamiento elemental para obtenerla de forma intuitiva, aunque por cierto sea equivocado para las dimensiones físicas (de hecho *no* se trata de la termodinámica que conocemos, el calor *no* es en este enfoque equivalente al trabajo). Si *el calor Q se conserva*, tal como ocurre con la masa de agua y sabemos que la energía disponible del agua es  $mg(h_1 - h_2)$ , planteamos la hipótesis muy fuerte de expresar de forma análoga la energía del calor  $Q$ , lineal en la diferencia de temperatura, o sea en la forma  $Q(T_1 - T_2)$ . Si ahora pensamos que el calor pudiera tener en principio una energía *total* posible correspondiente a la caída *total* desde la temperatura  $T_1$  hasta la temperatura cero (absoluto), la definición de eficiencia  $h$  nos daría

$$\eta = \frac{Q(T_1 - T_2)}{QT_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Pero insisto en que Sadi Carnot no hizo este paso.

58. CARNOT S. [1824].

59. *Ibidem*.

60. Este principio aparece enunciado explícitamente en la última cita que hemos hecho del libro de Sadi, sobre la recuperación del calor del aire para calentar la caldera.

## BIBLIOGRAFÍA

- BARACCA, A. (1998) *Las raíces de la Revolución Científica del Siglo XX, y el Desarrollo de la Mecánica Cuántica*. Universidad de La Habana.
- CARDWELL, D.S.L. (1965) «Power technologies and the advance of science, 1700-1825». *Technology and Culture*, VI, 188-203.
- CARDWELL, D.S.L. (1971) *From Watt to Clausius*. London,
- CARDWELL, D.S.L. (1996) *Historia de la Tecnología*. Madrid, Alianza Editorial.
- CARNOT Lazare (1803) *Principes Fondamentaux de l'Équilibre et du Mouvement*. 2da edición, Paris, Chez Deterville libraire.
- CARNOT, Sadi (1824) *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines propres a Developper cette Puissance*. Paris, Bachelier. Hay una traducción al inglés de R. Fox, New York, Dover Publication, 1960.
- DE LAS CUEVAS, Juan (1998) «Historia del desarrollo tecnológico del cemento». En: *Segundo Congreso Nacional de Historia de la Ciencia y la Tecnología*. La Habana, 25-27 de febrero de 1998 (en prensa).
- DERRY, T.K. (1977) *Historia de la Tecnología*. Madrid, Alianza/Siglo XXI.
- DESAGULIERS, J.T. (1719) *Course of Experimental Physics*. London, printed for B. Creak, J. Sackfield.
- FOURIER, J. (1822) *Théorie Analytique de la Chaleur*. Paris, F. Didot.
- GILLESPIE, G.C. (1971) *Lazare Carnot Savant*. Princeton University Press.
- GARCÍA TAPIA, N. (1998) «La primera patente de aplicación de la energía del vapor, Jerónimo de Ayanz (1606)». En: L. Navarro Veguillas (coor.), *Trobades Científiques de la Mediterrània, Història de la Física*. Barcelona, pp. 301-310.
- HESSEN, B. (1931) *Las raíces sociales y económicas de los Principia de Newton*. Componente de la delegación soviética al Congreso Internacional de Historia de la Ciencia, Londres.
- HILLS, R.L. (1970) *Power in the Industrial Revolution*. Manchester.
- HILLS, R.L. y PACEY, A.J. (1972) «The measurement of power of the early steam driven textile mills». *Technology and Culture*, 13.
- KOYRÉ, A. (1968) *Etudes Newtoniennes*. Paris, Gallimard.
- KOYRÉ, A. (1982) *Del Mundo cerrado al Universo Infinito*. Madrid, Siglo XXI.
- KOYRÉ, A. (1990) *Estudios Galileanos*. Madrid, Siglo XXI.
- KUHN, T.S. (1962) *La Estructura de las Revoluciones Científicas*. México, Fondo de Cultura Económica.
- LANDES, D.S.L. (1948, Vol. 1 - 1982, Vol. 7), «La Revolución Industrial». En: *Historia Económica de Europa de Cambridge*. Madrid, Editorial Revista de Derecho Privado.

- LEVY-LEBLOND, J.M. (1979) «La ideología de y en la física contemporánea». *La Radicalización de la Ciencia*. México, Editorial Nueva Imagen, S.A., p. 25.
- MUSSON, A.E. & E. ROBINSON, E. (1969) *Science and Technology in the Industrial Revolution*. Manchester.
- NEWTON, I. (1952) *Optics*. New York.
- NÚÑEZ JOVER, J. (1994) «La ciencia y sus leyes de desarrollo». En: *Problemas Sociales de la Ciencia y la Tecnología, Grupo de Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología*. La Habana.
- SCOTT, W. (1970) *The Conflict between Atomism and Conservation Theory, 1664-1860*. London.
- SMEATON, J. (1759) «An experimental enquiry concerning the natural powers of water and wind to turn mills and other machines depending on a circular motion». *Phil. Trans.*, 51.
- SMEATON, J. (1776) «An experimental examination of the quantity and proportion of mechanical power necessary to be employed in giving different degrees of velocity to heavy bodies from a state of rest». *Phil. Trans.*, 66.
- SMILES, L. (1861-62) *Lives of Engineer*. London, John Murria. Reedición, London, Routledge/Thoemmes Press, 1997.
- SMILES, L. (1865) *Lives of Boulton and Watt*. London, John. Murria Reedición, London, Routledge/Thoemmes Press, 1996.