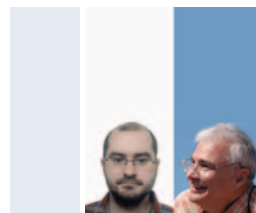


Breve historia de la máquina de vapor

**Esteban Moreno Gómez* y
José María López Sancho**

Editor de la Serie El CSIC en la Escuela

Director del Proyecto El CSIC y la Fundación BBVA en la Escuela



Palabras clave

Calor, flogisto, temperatura, cambio de estado, máquina de vapor, revolución industrial.

Resumen

Se estudia a grandes rasgos el origen, historia y funcionamiento de las máquinas de vapor. Destacando algunos puntos clave para comprender su funcionamiento y la influencia que tuvieron en el entendimiento del modelo de la constitución de la materia y en el desarrollo de los derechos humanos, ya que permitió que desapareciera la esclavitud.

Introducción

La conceptualización del calor por los seres humanos representa una de las aventuras de la imaginación más interesantes y de más trascendencia en la historia de la ciencia y, sin lugar a dudas, una de las más importantes en el desarrollo de la ingeniería. Podemos identificar, en la historia de la ciencia, tres caminos diferentes que persiguen el mismo fin desde tres puntos de vista diferentes.

El primero es el de las personas que descubrieron el fuego y sus extrañas propiedades, hace unos cuatrocientos mil años.

Podemos imaginar lo que sintieron nuestros predecesores la primera vez que transportaron o produjeron fuego en el interior de una cueva. De repente desapareció la noche que allí habitaba permanentemente y surgieron los rostros de las personas y los objetos que se encontraban en aquel espacio carente de luz. Como para ellos

* E-mail del autor: esteban@orgc.csic.es.

tanto la luz como el calor eran cosas, se preguntaron, sin duda, de donde surgía la luz y el calor que emanaban del trozo de madera y dónde estaban antes de salir al exterior de la rama que estaba ardiendo.

El segundo camino o forma de atacar el problema es el estrictamente científico, es decir, intentando elaborar un modelo de la realidad (en este caso identificando los elementos que intervienen en la combustión y organizándolos en un modelo). Dejando a un lado, de momento, el problema de la relación entre calor y luz, podemos plantearnos la cuestión de la aparición del calor cuando se produce una llama.

La primera respuesta que conocemos es la que dieron los atomistas griegos: el fuego es uno de los elementos que constituyen el mundo, junto con la tierra, el agua y el aire, y se encuentra formando parte de muchos objetos. Cuando un objeto se descompone en sus elementos, si tiene átomos de fuego se liberan y salen al exterior y producen los efectos a los que estamos acostumbrados. Cuando cocinamos un alimento, los átomos de fuego penetran en el interior del mismo y modifican la proporción de átomos de fuego que lo componen, variando su naturaleza.

Con el tiempo este modelo fue insuficiente para explicar los resultados de los procesos que se fueron descubriendo, como los que dieron lugar a la obtención de metales, y se tuvo que modificar introduciendo un elemento nuevo: el flogisto (del griego, inflamable). El flogisto, de acuerdo con el modelo propuesto a finales del siglo xvii por los químicos alemanes Johann Becher y Georg Stahl, era un nuevo elemento que formaba parte de los cuerpos inflamables y que estos perdían cuando ardían.

Con el modelo del flogisto es fácil explicar algunos experimentos de los que realizamos en clase. El más sencillo es el que consiste en hacer arder una vela en un recipiente cerrado, hasta que se extingue la llama. Joseph Priestley (**Imagen 1**), un químico inglés del siglo xviii, explicaba el hecho, de acuerdo con el modelo de Becher, diciendo que al arder la vela el flogisto que contenía pasaba al aire del recipiente (que estaba «desflogistizado») hasta el momento en que el aire no podía admitir más flogisto. En ese instante la llama se extinguía.



Imagen 1. Joseph Priestley, retratado por Ellen Sharpley.

Priestley obtuvo oxígeno y lo identificó como uno de los componentes del aire. Como este elemento era imprescindible para que fuese posible la combustión de cualquier cuerpo, Priestley llamó al oxígeno «aire desflogistizado».

Priestley, además, se dio cuenta de que el proceso de la respiración de los mamíferos era muy parecido al de la combustión; y pensó que los seres vivos también contenían flogisto (que adquirían por los alimentos) y que este pasaba al aire en el proceso de la respiración. Sus primeras investigaciones las realizó en una fábrica de cerveza próxima a su parroquia (era clérigo de la Iglesia Unitaria), descubriendo el dióxido de carbono, el mismo gas que Joseph Black (amigo de Watt) había obtenido calentando carbonato cálcico, al que llamó «aire fijo».

La tercera vía histórica en el estudio del calor y sus propiedades es la seguida por los ingenieros que iniciaron la revolución industrial, como Denis Papin (1647-1712, colaborador de Robert Boyle), Thomas Newcomen (1663-1729), Joseph Black (1728-1799) y su colaborador James Watt (1736-1819) y Sadi Carnot (1796-1832), que inventaron y estudiaron las formas de producir enormes fuerzas a partir del fuego.

En este artículo, el primero de una serie, nos proponemos recorrer a grandes pasos el tercer camino, el de las máquinas de vapor, señalando algunos puntos clave para comprender su funcionamiento y la influencia que tuvieron en el entendimiento del modelo de la constitución de la materia y en el desarrollo de los derechos humanos, ya que permitió que desapareciera la lacra de la esclavitud.

El funcionamiento básico de una máquina de vapor

Como todos sabemos, las máquinas de vapor se basan en la conversión de agua líquida en vapor, que era el encargado de empujar el émbolo del cilindro, y en la posterior conversión del vapor en agua, lo que producía un vacío parcial en el cilindro, permitiendo que la presión atmosférica empujase el émbolo en el otro sentido.

Podemos mostrar este ciclo con un montaje sencillo, que nosotros utilizamos en nuestro programa de encuentros entre científicos y maestros. Nuestra máquina se construye uniendo un globo a la parte superior de una lata de refresco vacía que contenga un poco de agua en su interior (**Imagen 2**).

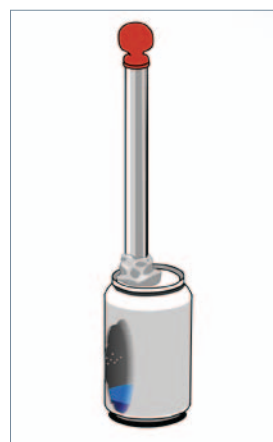


Imagen 2. Nuestra máquina.

Este es el primer punto del ciclo: agua en estado líquido en el interior del cilindro, es decir, a una temperatura inferior a los 100°C, y el globo desinflado.

A continuación se calienta el agua hasta una temperatura superior a los 100°C, lo que provoca la evaporación del agua, que pasa a forma de vapor. El vapor produce un aumento de presión en el interior del globo; la presión se hace mayor que la atmosférica y eso produce un aumento del volumen del globo. En ese proceso de aumento de volumen aparece una fuerza en el interior del globo que se puede aprovechar para producir trabajo. En este segundo punto del ciclo tenemos la máquina llena de vapor y el volumen del globo en su valor máximo (**Imagen 3**).

Una vez que el volumen del globo ha llegado a un valor determinado, la parte inferior del bote se retira de la llama y se introduce en agua a temperatura ambiente, lo que provoca la condensación del vapor y la consiguiente disminución de la presión en el interior del globo hasta hacerse menor que la presión atmosférica.

Como consecuencia de ello el volumen del globo disminuye y recuperamos las condiciones que teníamos al comenzar el ciclo: un recipiente con agua líquida y el globo que cierra el volumen de la máquina desinflado.

Podemos utilizar lo que hemos aprendido para construir mentalmente la máquina atmosférica de Papin. Estaba constituida por un cilindro y un émbolo con agua en su interior.

Como en el caso de la máquina que hemos construido, con un globo y un bote de refresco, en el primer punto del ciclo hay una cierta cantidad de agua en estado líquido en el interior del cilindro y este se encuentra en el punto inferior de su recorrido.

A continuación se acerca el fuego, fuente de la energía de la máquina, y se calienta el agua hasta una temperatura superior a los 100°C, lo que provoca el paso del agua líquida a la forma de vapor. El vapor produce un aumento de presión en el interior del cilindro, que se hace mayor que la atmosférica, produciéndose un aumento del volumen del cilindro. En ese proceso de aumento de volumen aparece una fuerza que se puede aprovechar para producir trabajo.



Imagen 3. Segundo estado de funcionamiento de nuestra máquina de vapor.

Al final del proceso la máquina se encuentra en el segundo punto del ciclo con el cilindro lleno de vapor y el volumen en su valor máximo.

Una vez que el cilindro ha llegado al punto superior de su recorrido, retiramos el fuego de la parte inferior y refrigeramos con agua fría las paredes del cilindro.

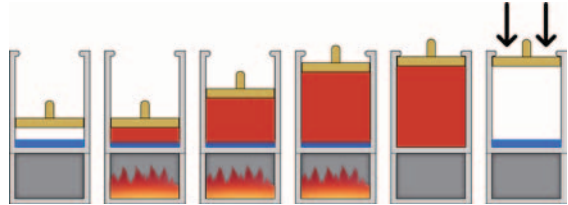


Imagen 4. Estadios de funcionamiento de la máquina de Papin.

Al enfriarse el vapor por debajo de los 100°C se condensa y pasa a agua líquida, ocupando un volumen mucho menor. La presión en el interior del cilindro es menor que la atmosférica, produciéndose un vacío parcial y ejerciéndose sobre el émbolo una fuerza vertical hacia abajo que puede producir trabajo útil.

Así recuperamos las condiciones que teníamos al comenzar el ciclo: el cilindro con agua líquida y con las paredes a temperatura menor de 100°C. Este es de nuevo el punto 1 del ciclo y el proceso vuelve a comenzar (**Imagen 4**).

Máquina de Newcomen

La máquina de Papin nunca se comercializó, pero el diseño fue mejorado por Newcomen que modificó el lugar en el que se producía la generación de vapor; construyó su primera instalación en 1712, para bombear agua en una mina de carbón cerca de Dudley Castle. Newcomen añadió una caldera exterior donde se genera el vapor y un depósito de agua situado a más altura que el cilindro.

Primera parte del ciclo de la máquina de Newcomen

Al comienzo del ciclo ambas válvulas se encuentran cerradas y el cilindro está a temperatura ambiente, por debajo de los 100°C (**Imagen 5**).

A continuación se inyecta vapor en el interior del cilindro abriendo la válvula que separa la caldera del cilindro. El vapor hace aumentar la presión en el interior del cilindro y que

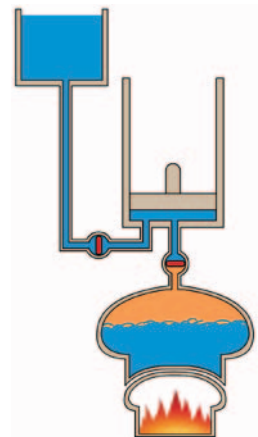


Imagen 5. Máquina de Newcomen al inicio del ciclo.

produce una fuerza hacia arriba que provoca el desplazamiento del émbolo. Esta fuerza se utiliza para realizar trabajo (**Imagen 6**).

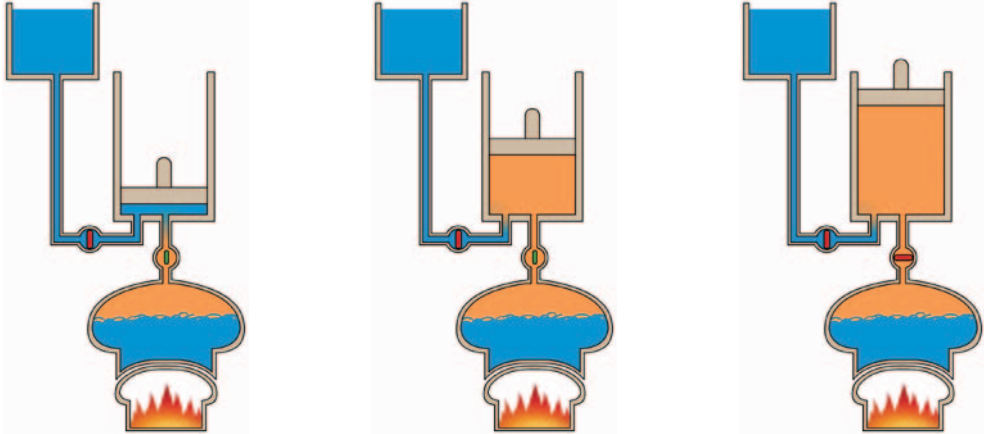


Imagen 6. Máquina de Newcomen en funcionamiento.

A final de esta primera parte del ciclo el émbolo se encuentra en su punto superior, lleno de gas y se cierra la válvula que separa el cilindro de la caldera y ambas válvulas están cerradas.

Segunda parte del ciclo de la máquina de Newcomen

Una vez que el émbolo llega a su punto superior, se abre la válvula del agua fría y se enfrían las paredes del cilindro por debajo de los 100°C. El vapor de agua se condensa y se produce un vacío parcial en el interior del cilindro, con lo cual la presión atmosférica empuja el émbolo hacia abajo, generando también una fuerza útil (**Imagen 7**).

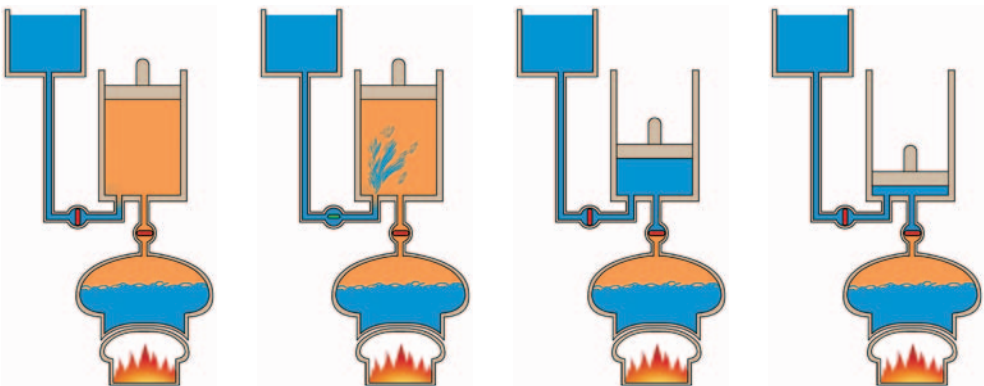


Imagen 7. Máquina de Newcomen. Enfriamiento del cilindro y cierre de ciclo.

Al final de la segunda parte del ciclo el émbolo se encuentra en su punto inferior, el cilindro se encuentra a una temperatura inferior a los 100°C y ambas válvulas se encuentran cerradas, como en el punto inicial del ciclo. Y todo vuelve a empezar, produciéndose un movimiento alternativo y una sucesión de ciclos que proporcionan el trabajo.

Intermedio histórico para situarnos en el tiempo

Para fijar ideas queremos señalar algunos personajes que pueden ayudarnos a situar los descubrimientos científicos que estamos estudiando en la historia de España.

Diego Velázquez nació en 1599 (un año después de morir Felipe II) y murió en 1660 (cinco años antes de que muriese Felipe IV). Papin contaba con trece años de edad.

En 1616 murieron Miguel de Cervantes y Shakespeare.

El reinado de Carlos II, el último de los Austrias, terminó en 1669, dando paso a la dinastía de los Borbones en España.

Felipe V (con un periodo corto de reinado de Luis I), Fernando VI, Carlos III y Carlos IV ocupan el periodo que va desde 1700 a la Revolución Francesa (1789), periodo en el que se declara independiente América del Norte y se imponen las ideas de la Ilustración.

La Guerra de la Independencia (1808-1814), la derrota de Napoleón en Waterloo en 1815 y la vida de Goya (1746-1828) terminan el periodo que estamos estudiando, en el que el barroco y el neoclásico marcaron los gustos artísticos de la época.

Los personajes que intervienen en nuestro relato son, como hemos indicado:

Denis Papin (1647-1712), contemporáneo de Newton (1642-1727) y colaborador de Robert Boyle (1627-1691). Reinan en España Felipe III, Felipe IV y Carlos II.

Thomas Newcomen (1663-1729), inventor de la máquina de vapor atmosférica, muere cuando en España reina Felipe V.

En 1714 Fahrenheit (1686-1736), inventó el primer termómetro propiamente dicho. Murió el mismo año en que Watt patentó su máquina de vapor.

Joseph Black (1728-1799), médico e investigador. Sus primeras investigaciones las realizó en el campo de la química y de los gases, pero en 1760 su interés se centró en la física, sobre todo en el estudio de los procesos en los intervenía el calor. Fue médico personal de Adam Smith, David Hume y James Hutton, entre otros. Reinaban en España Carlos III y Carlos IV.

James Watt (1736-1819). A lo largo de su vida tuvo lugar la Independencia Americana, la Revolución Francesa y la Guerra de la Independencia Española. En 1819 reinaba en España Fernando VII, el rey Felón.

Black y Watt se encuentran en Glasgow con una máquina de Newcomen

En 1756 James Watt entró a trabajar en la Universidad de Glasgow como mecánico y experto en la fabricación de aparatos científicos; entre otras tareas ayudaba a Black en sus experimentos y ambos se hicieron muy amigos. Uno de los trabajos que encargaron a Watt hacia 1763 fue el de reparar un modelo de tamaño reducido de máquina de Newcomen, tarea que realizó sin dificultad, pero en las pruebas del modelo se dio cuenta de que el rendimiento de la máquina reducida era muy inferior a la de tamaño real. Este fenómeno, que sin duda llamó la atención de Black y Watt, fue el desencadenante de las investigaciones de ambos en el campo del calor, que continuaron por separado cuando Black se trasladó a Edimburgo a la cátedra que quedaba vacante por la muerte de su maestro William Cullen.

Si estudiamos, como hicieron nuestros investigadores, los procesos que intervienen en la transformación del calor que la llama cede al agua, veremos que pueden dividirse en tres diferentes fenómenos.

En primer lugar el fuego calienta el agua desde temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición.

A continuación el calor hace que el agua hierva y se convierta en vapor.

Como todos sabemos, en ciencia únicamente se contemplan propiedades de los cuerpos que pertenezcan a la categoría de magnitudes, que de acuerdo con una definición ya clásica son propiedades que se pueden medir, pesar o contar. La razón para esta restricción de los observables que trata la ciencia es evidente: cuanto medimos, pesamos o contamos un observable del mundo real obtenemos como resul-

tado un número (seguido del nombre de la unidad utilizada) y ese número se puede utilizar introduciéndolo en fórmulas matemáticas, permitiéndonos realizar comprobaciones y predicciones.

Es fácil ver que para describir estos procesos hemos necesitado tres magnitudes: calor, temperatura y cambio de estado. Afortunadamente en el año 1765, en el que ocurrían los hechos que estamos refiriendo, en los laboratorios de la Universidad de Glasgow (como en los de otras universidades) se podía medir con el termómetro, un aparato inventado por Fahrenheit en 1714 y que determinaba la temperatura de los cuerpos (la historia del invento del termómetro se tratará en otro trabajo).

Black introdujo un termómetro en el agua de la caldera y observó cómo la temperatura iba aumentando desde la temperatura inicial (podemos suponer que era de unos 140° Fahrenheit, unos 60°C) a medida que la llama le comunicaba calor. De una manera provisional Black definió la cantidad de calor absorbida por el agua de la caldera como el producto de la cantidad de agua líquida (medida en libras) por el aumento de temperatura medido en grados Fahrenheit. La unidad correspondiente utilizada en los países anglosajones es la Btu (British Thermal Unit), cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de un libra de agua en un grado Fahrenheit. Para fijar ideas podemos decir que una Btu es aproximadamente la cantidad de calor que produce una cerilla al quemarse.

Con la creación por los ilustrados del siglo XVIII del sistema métrico decimal, en Europa continental se utilizó la unidad de cantidad de calor, llamada Caloría (con C mayúscula) o kilocaloría, que se cede a un litro de agua hace aumentar su temperatura en un grado centígrado. Como es fácil ver, una Btu equivale a un cuarto de Caloría.

Cuando llegaba a la temperatura de ebullición (212° Fahrenheit), el agua comenzaba a hervir y se producía vapor, pero la temperatura del agua apenas se modificaba. En tanto quedara agua líquida en la caldera su temperatura era la misma, 212° Fahrenheit (equivalentes a 100°C) ¿Qué estaba ocurriendo con el calor, que unas veces provocaba aumento de temperatura y otras no?

Para entender la explicación que podía dar Black hay que tener en cuenta el momento de la historia de la ciencia en el que se encontraba, a mediados del siglo XVIII. Boyle y Newton habían elaborado un modelo corpuscular de la materia en el cual los átomos (átomos o moléculas, en nuestro lenguaje actual) se encontraban inmóviles en los gases, líquidos y sólidos. La dilatación que sufren los cuerpos cuando se calientan lo explica este modelo diciendo que el calor es un fluido que rodea

a las partículas, como la carne de un melocotón rodea a la semilla. De esta manera cuando se añade calor a un cuerpo las partículas se separan unas de otras y su volumen aumenta.

Utilizando este modelo Black explicaba el fenómeno del calentamiento por el efecto que el calor producía en las partículas. Cuando se trataba de agua sólida, el calor recubre a las moléculas produciendo un aumento de temperatura. Pero si la cantidad de calor sobrepasaba un cierto límite las partículas rompían las ligaduras que las mantenían en estado líquido y escapaban al aire en forma de vapor.

Esta explicación ponía al descubierto dos procesos: la absorción del calor por el agua líquida y la absorción de calor necesaria para cambiar de estado. La definición de la unidad de una manera precisa la realizó Black: a la cantidad de calor necesaria para romper las ligaduras entre las moléculas y pasar del estado líquido al gaseoso la llamó calor oculto o calor latente de evaporación.

Es importante que nos demos cuenta de que las ideas del calor específico y del calor latente constituyen dos conceptos nuevos para la época. La importancia que tienen los conceptos, tanto en el lenguaje normal como en ciencia, es fundamental. Un concepto nuevo permite identificar una propiedad determinada. Una vez que se adquiere el concepto se puede utilizar para analizar la realidad en otras situaciones diferentes de las que hemos utilizado para elaborar el concepto. Así, si la temperatura de ebullición del alcohol etílico es menor que la del agua, podemos concluir que las moléculas de agua están más fuertemente unidas entre sí que las de alcohol y entender por qué cuando destilamos vino (que contiene alcohol y agua, además de otras muchas sustancias) el alcohol se evapora antes que el agua. También podemos entender por qué tenemos que enfriar el vapor (extrayendo el calor que rodea sus moléculas) para que la sustancia vuelva al estado líquido.

Determinación del valor del calor específico y del calor latente de evaporación de un líquido

Para fijar ideas nosotros vamos a llevar a cabo un experimento mental que nos aclarará ambos conceptos. Para ello colocaremos un recipiente de vidrio con un litro de agua y un termómetro suspendido en el interior del mismo de manera que no toque las paredes. Sumergiremos también una resistencia eléctrica de características conocidas y el conjunto lo colocaremos en un peso de cocina. El peso señalará unos 1,1 Kg y el termómetro unos 15°C, por ejemplo (**Imagen 8**).

Si conectamos la resistencia conocida a una pila de un voltaje determinado podemos calcular exactamente la cantidad de calor que se está generando en la resistencia y que pasa directamente al líquido. Para fijar ideas supondremos que la resistencia genera 1 Caloría por segundo.

Si comenzamos con un litro de agua a 15°C, como hemos dicho, cada cuatro segundos la temperatura que señala el termómetro aumentará un grado, llegando en 85 segundos a los 100°C. En todo el proceso la masa de agua que señala la báscula de cocina permanecerá prácticamente constante.

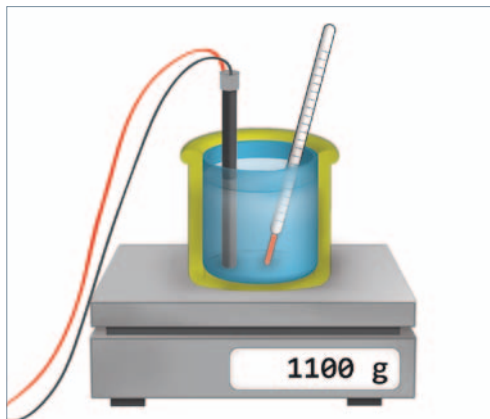


Imagen 8. Montaje del experimento.

Cuando la temperatura alcanza los 100°C, observaremos que, a pesar de que la cantidad de calor cedida al agua sigue siendo la misma (1 Caloría cada segundo) la temperatura del agua permanece constante, aunque comenzará a hervir. Y gracias a la báscula podremos determinar la cantidad de calor que es necesario añadir al agua para que se evapore: cada 100 gramos de agua requieren 54 Calorías (cincuenta y cuatro segundos de calentamiento) para pasar de líquido a vapor. Así pues, el calor específico del agua es de 1 Caloría por litro y el calor latente de evaporación es de unas 540 Calorías por litro. Y si aplicamos la ley de Boyle veremos que el litro de agua en forma de vapor ocupa, a la presión atmosférica, un poco menos de 1700 litros, que se utilizan para llenar el cilindro en las máquinas de vapor.

Si tenemos en cuenta que el volumen del cilindro del modelo reducido de máquina de Newcomen que poseía la Universidad de Glasgow era aproximadamente de 1700 litros, que el ciclo de la máquina era de unos cinco segundos y que el poder calorífico de la madera (combustible que se utilizaba entonces) es de unas 5000 Calorías por kilogramo, resulta que Black y Watt tenían que quemar más de sesenta kilogramos de madera para hacer funcionar la máquina una hora.

Referencias bibliográficas

GRIBBIN, John. *Historia de la ciencia 1543-2001*. Crítica. Barcelona. 2006. 553 pp.

WIKIPEDIA [en línea]: <http://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Priestley>.