

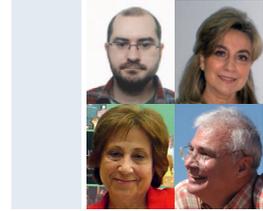
# Análisis termodinámico de un diseño conceptual de máquina de vapor debida a Papin

Esteban Moreno Gómez \*, M.<sup>a</sup> José Gómez Díaz

VACC-CSIC. El CSIC en la Escuela

M.<sup>a</sup> Carmen Refolio Refolio y  
José M.<sup>a</sup> López Sancho

IFF-CSIC. El CSIC en la Escuela



---

## Palabras clave

Máquina de vapor, diseño conceptual, Papin, Galileo, gas, vacío, calor, temperatura, termoscopio, Carnot, Guericke, Huygens, termodinámica, educación, constructivismo.

---

## Resumen

Los diseños conceptuales describen máquinas que no están destinadas a la producción, pero que presentan todos los elementos necesarios y básicos de funcionamiento. Este es el caso de la máquina de vapor de Papin, de 1690, que producía trabajo utilizando el efecto de la presión atmosférica sobre el émbolo de un cilindro en cuyo interior se había producido un vacío parcial. Este tipo de máquinas, llamadas atmosféricas, fue utilizado hasta que Watt introdujo las de doble efecto, en 1781, casi 100 años después del prototipo de Papin.

En este trabajo describimos con cierto detalle la máquina de Papin, siguiendo el camino histórico y los desarrollos conceptuales de la termodinámica que llevaron a su desarrollo y comprensión. Estos conceptos se aplicarán, en otro artículo, al estudio y construcción de una máquina de vapor sin partes móviles, un *caso concreto* de máquina fácil de construir en el aula en la que se materializan conceptos y procesos que introducimos en este artículo.

---

## Introducción

El descubrimiento y la utilización de la *potencia motriz del fuego* constituyen uno de los episodios de creatividad científica más interesantes y de mayor importancia en la historia de la ciencia y, sin lugar a dudas, uno de los más importantes en el desarrollo de la sociedad. Es difícil imaginarse pasos tan importantes como la abolición de la

---

\* E-mail del autor: [esteban@orgc.csic.es](mailto:esteban@orgc.csic.es).

esclavitud o la revolución industrial sin la existencia de la máquina de vapor. Los trenes sustituyeron a las diligencias, los barcos de vapor a los de vela y las fábricas sustituyeron los saltos de agua de los ríos por máquinas de vapor.

Hasta el desarrollo de la máquina de vapor las ciudades industriales debían situarse necesariamente en las orillas de los ríos, en parajes que permitiesen construir presas. Con el desarrollo de las máquinas de vapor las fábricas se liberaron de esa dependencia y se pudieron situar cerca de las minas de carbón o de las fuentes de materias primas. Podemos decir que cambió el paisaje de las naciones industriales.

Son numerosos los cambios sociales debidos a la aplicación del conocimiento. En general se describen como *revoluciones*, entre las cuales podemos citar la neolítica, la de los metales, la comercial, la científica, la industrial, la tecnológica, la informática, etc. En todas ellas se pueden identificar los tres procesos: I+D+i (investigación, desarrollo e innovación), como elementos esenciales de las mismas. Aunque en algunos casos no se encuentren claramente diferenciados, en la medida de lo posible intentaremos utilizar esta división para organizar nuestro trabajo.

Desde que los seres humanos comenzaron a estudiar el fuego y sus propiedades se establecieron evidentes relaciones entre la luz y el calor de, por ejemplo, una madera ardiendo. Era natural pensar que tanto la luz como el calor eran sustancias que se encontraban dentro de los combustibles, los cuales los desprendían durante la combustión. Aunque aplicaron rápidamente estas propiedades para iluminarse y cocinar los alimentos, estaban lejos de prever las posibilidades de aquella llama, entre las que se ocultaba lo que Carnot llamó, centenas de miles de años después, la potencia motriz del fuego. Esta es la historia que nos proponemos describir, continuando con nuestro trabajo anterior y, en esta ocasión, deteniéndonos con más detalle en los conceptos científicos y en su marco histórico.

## Identificación de los conceptos que intervienen en este trabajo

Si analizamos los conceptos mínimos que se necesita manejar para entender una máquina de vapor, llegamos al conjunto siguiente:

*presión y vacío, calor y temperatura, cambios de estado, calor específico y calor latente, presión atmosférica.*

La siguiente tarea es organizar estos conceptos de acuerdo con un de mapa de Novak y exponerlos en la forma que consideremos más conveniente. Como es nuestra práctica habitual, en nuestra exposición, vamos a utilizar la secuencia histórica, introduciendo los personajes que realizaron los descubrimientos y definieron los conceptos y magnitudes que intervienen en nuestra historia.

## Galileo y el termoscopio

El primer personaje que aparece es Galileo Galilei (1564-1642) y lo hace en dos ocasiones, cuando mide la *presión atmosférica* y cuando define el concepto de *temperatura* (que no la magnitud).

Galileo es un científico moderno, iniciador de la revolución científica, y no admite otra forma de conocimiento que el de «preguntar» a la naturaleza por medio de experimentos. Quiere conocer exactamente el valor de la fuerza generada por el horror al vacío y diseña un experimento para determinarlo pero que, para entenderlo, requiere haber adquirido el concepto de *presión* y las peculiaridades necesarias para su aplicación al caso de los gases.

Podemos introducir el concepto de *presión* en el aula por medio de consideraciones sobre la diferente superficie de las patas de los animales, en relación con la dureza del suelo por el que se desplazan. Aquellos que viven en hábitats con suelo resistente tienen suelas plantares de pequeña superficie, pero los que se mueven en suelo blando o de poca consistencia, como la nieve, las tienen de gran superficie. Esto nos indica que la resistencia del suelo está relacionada con la superficie de las patas; de manera que a mayor resistencia le corresponde menor superficie.



**Imagen 1.** Los osos polares tienen suelas plantares de gran superficie.

Es evidente que cuanto mayor sea la superficie en la que se soporta el peso, menos se hundirá en la nieve (**Imagen 1**). Es fácil ver que la magnitud relevante en este caso es la relación entre el peso y la superficie:

$$\text{magnitud relevante} = \frac{\text{peso}}{\text{superficie}}$$

A esa magnitud la llamamos *presión*, que se define como la fuerza ejercida por unidad de superficie:

$$\text{presión} = \frac{\text{peso}}{\text{superficie}}$$

Una vez definida la presión, podemos caracterizar un suelo por la presión que es capaz de soportar. Esa misma presión es la que pueden ejercer los animales que se desplazan por ese suelo.

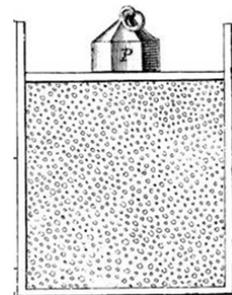
## Aplicación del concepto de presión al caso de los gases

Supongamos que disponemos de un depósito cilíndrico con un émbolo que lo cierra. Para conocer la presión que ejerce el gas de su interior debemos ejercer sobre este una fuerza determinada, como puede ser el peso de un cuerpo de masa conocida.

Una vez conceptualizada la presión, el paso siguiente es aplicar esa magnitud al estudio de otros fenómenos. La operación mental de utilizar un concepto en una clase de fenómenos diferente a la de su desarrollo inicial no es fácil y requiere un grado de abstracción considerable. Por ello, tendremos que ayudar a nuestros alumnos a identificar los elementos constitutivos de la presión, *la fuerza aplicada y la superficie sobre la que se reparte*. En el caso que nos ocupa aplicaremos el concepto de presión que hemos elaborado anteriormente (en un escenario de nieve) al estudio de la presión ejercida por un gas confinado en un depósito.

Aunque no es indispensable recurrir al modelo atómico-molecular, si los alumnos lo conocen debemos explicar el origen de la presión ejercida por un gas, es decir, la transferencia de *cantidad de movimiento* por unidad de tiempo. Pero en caso de que los alumnos no conozcan el modelo atómico-molecular podemos tratar el gas como cualquier material elástico, que al comprimirlo responde con una fuerza que se opone a la compresión.

En el caso que nos ocupa utilizaremos el ejemplo de un gas al que sometemos a una presión determinada colocando un peso sobre un émbolo de superficie conocida (**Imagen 2**); el émbolo comprimirá el gas hasta que la presión ejercida por este sea igual a la que resulta del peso que hemos colocado dividido por la superficie del émbolo.



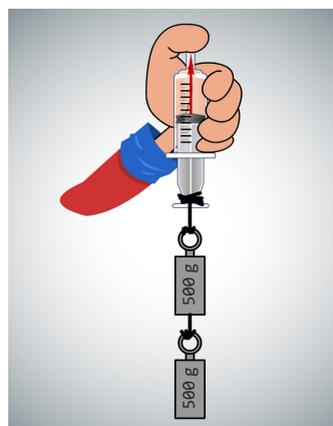
**Imagen 2.** Émbolo con una pesa ejerciendo presión sobre un gas confinado. Ilustración de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica* (1738).

A pesar de que Galileo no llegó al concepto de presión atmosférica como consecuencia del peso del aire (cuyo descubrimiento y medida se debió a su discípulo Torricelli, en 1643), fue el primero en determinarla.

Galileo creía en el *horror vacuum* y para medir el límite de su valor ideó el siguiente experimento. Construyó una especie de jeringuilla de grandes dimensiones y la colocó invertida, vació el aire que contenía llevando el émbolo hasta el punto superior, la cerró y aplicó una fuerza vertical hacia abajo que fue aumentando hasta que venció la fuerza, que él creía debida al horror al vacío y que se oponía a que el émbolo se desplazase hacia abajo (**Imagen 3**).

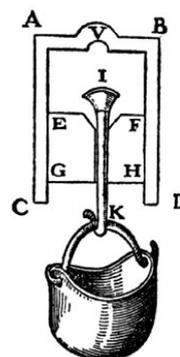
El experimento es difícil de realizar en clase, por lo que proponemos otro semejante mucho más fácil de llevar a cabo. Consiste en repetir el proceso de Galileo utilizando una jeringuilla real, de plástico: vaciarla de aire con el émbolo, tapar la boquilla con un dedo, colocarla en posición invertida y aplicar una fuerza variable (el peso del líquido que vertemos en la botella) que obligue al émbolo a desplazarse hacia abajo (**Imagen 4**).

Todo lo que tenemos que hacer, como Galileo explica, es determinar el valor de la fuerza aplicada en el momento de comenzar el movimiento y dividir esa fuerza por el valor de la superficie del émbolo. Nuestro resultado (tanto más exacto cuanto más corto sea el tubito que tiene la jeringuilla para encajar la aguja y que debemos cortar) será de unos 10 N (el peso de un kilogramo masa) por cada centímetro cuadrado de superficie del émbolo, valor que podemos comprobar utilizando diversas jeringuillas de tamaños diferentes.



**Imagen 4.** Propuesta de experimento para el aula: utilizando agua como unidad de masa y con pesas de distinta masa.

Por este procedimiento Galileo llegó a la conclusión de que el valor de la *fuerza que producía el horror al vacío* era de unos 10 N por centímetro cuadrado. Consecuentemente, si se ejercía una fuerza superior el émbolo se movería y se produciría vacío en el espacio cilíndrico. El vacío podía existir.



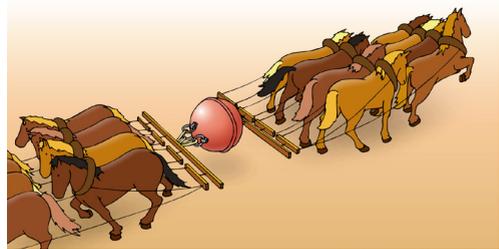
**Imagen 3.** Ilustración de Galileo mostrando su experimento. «Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze» (1638).

No podemos dejar de explicar lo que en realidad ocurrió en el experimento de Galileo. El interior de la jeringa estaba vacío, pero el exterior estaba sometido a la presión atmosférica. Esta ejercía una fuerza hacia adentro sobre el émbolo igual al valor de la presión atmosférica, que fue en realidad lo que midió Galileo.

## Las esferas de Magdeburgo

El experimento más espectacular de los efectos de la presión atmosférica lo realizó Otto de Guericke, que nació en 1602, en Magdeburgo. Su principal contribución tecnológica fue la bomba de aire con la que fue capaz de crear el suficiente vacío en ciertos recipientes como para realizar distintos experimentos. También son importantes sus aportaciones prácticas en electricidad.

Fue en 1656 cuando llevó a cabo una representación pública en la ciudad de Magdeburgo que consistió en evacuar el aire del interior de dos semiesferas unidas y posteriormente enganchar un tiro de ocho caballos a cada una de las semiesferas (**Imagen 5**).



**Imagen 5.** Ilustración del experimento con los hemisferios de Magdeburgo.

Si, por ejemplo, las semiesferas tenían un metro de diámetro, la superficie del plano central era de:

$$\text{superficie} = \pi \cdot r^2 = 7850 \text{ cm}^2$$

Empleando ahora nuestra fórmula de la presión, obtenemos:

$$\text{fuerza} = \text{presión} \cdot \text{superficie} = \frac{10 \text{ N}}{\text{cm}^2} \cdot 7850 \text{ cm}^2 = 78500 \text{ N}$$

Como había 8 caballos para cada semiesfera, cada uno debía realizar una fuerza equivalente a:

$$\frac{78500 \text{ N}}{8} = 9812 \text{ N}$$

Valor muy por encima de sus posibilidades: la fuerza horizontal que puede realizar un caballo es aproximadamente de un quince por ciento de su peso, es decir, unos 800 N por cabeza. El lector habrá adivinado la razón por la que hemos dividido la fuerza total por ocho, a pesar de que el número total de caballos era de 16.

## La medida de la presión atmosférica: Berti y Torricelli

Las nuevas ideas de Galileo aceptando la existencia del vacío, llegaron a Roma en 1638, coincidiendo con la publicación de su obra conocida popularmente como *Discorsi in torno a due nuove scienze*. Como resultado otro físico italiano, Gasparo Berti, tuvo conocimiento de estas nuevas ideas e invirtió el razonamiento de Galileo.

La intención de Berti era construir un sifón demasiado elevado y de esta forma obtener vacío, que era en lo que realmente estaba interesado. Junto con Rafael Magiotti construyó un gran tubo de vidrio de once metros rematado en la parte superior por depósito de unos diez litros anclándolo verticalmente en la fachada del convento de Mínimos, en la ciudad italiana de Picio.

Llenaron completamente de agua el tubo y el depósito aprovechando una válvula localizada en la parte superior y un tapón en la boca inferior.

Después introdujeron el extremo inferior en un gran recipiente que contenía agua, de manera que dicho extremo estuviera sumergido, y quitaron el tapón de forma que el agua saliese del tubo produciendo vacío en el depósito superior: objetivo del experimento (**Imagen 6**). Conforme a los cálculos de Galileo, el tubo quedó lleno de agua hasta una altura algo menor de diez metros dejando completamente vacío de agua el depósito superior.

Para Berti el depósito de diez litros estaba absolutamente vacío.

Cuando Galileo era ya un anciano conoció a un joven científico, Evangelista Torricelli, al que admitió como alumno. Torricelli actuaría, además, como amanuense en la escritura de los trabajos del maestro. Probablemente comunicó a su discípulo sus dudas sobre el verdadero origen del horror al vacío. Galileo murió a los pocos meses. Pero Torricelli no estaba de acuerdo con la teoría aristotélica del vacío de Galileo (ya que conocía los trabajos de Jean Rey, que en 1630 había comprobado que el aire, como todas las cosas materiales, tiene masa y, por lo tanto pesaba) y decidió repetir el experimento de Berti utilizando mercurio en lugar de agua.

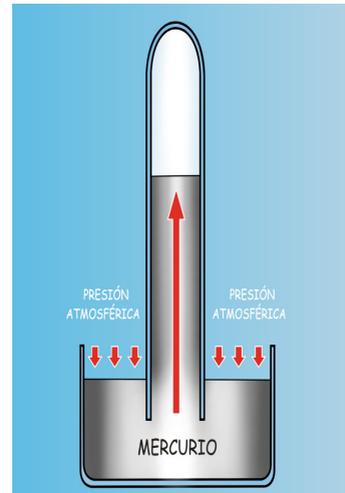


**Imagen 6.** Ilustración del experimento de Berti.

Por ser la densidad del mercurio 13,6 veces mayor que la del agua, bastaba con un tubo 13,6 veces más corto, por lo cual Torricelli empleó un tubo de un metro para realizar, sin duda, uno de los experimentos más bellos de la ciencia. La altura que alcanza la columna de mercurio sobre el nivel del depósito es de 0,76 metros, cuyo peso es el mismo que el de una columna de agua de 10,33 metros.

El peso debido a la presión del aire empujaría la superficie del mercurio hacia el interior del tubo, elevando el líquido metal, hasta que esta fuerza ascensional fuese equilibrada por el peso del mercurio (**Imagen 7**).

Consecuente con este nuevo dato, nosotros vivimos en la superficie de la Tierra en el fondo de un mar de aire que se extiende hacia el espacio hasta una altura no demasiado grande (unos 11 kilómetros).



**Imagen 7.** Representación esquemática del experimento de Torricelli.

## Dos nuevos conceptos necesarios: calor y temperatura

Siguiendo nuestro esquema inicial los siguientes conceptos que debemos dominar son los de *calor y temperatura*. Para ello podemos recurrir, de nuevo, a la historia de la ciencia.

Es seguro que los seres humanos, desde sus primeros contactos con el fuego, se dieron cuenta de que los distintos materiales transmitían el calor de la llama de manera diferente. Esta propiedad debió hacerse más evidente cuando dispusieron de materiales metálicos, ya que la conducción del calor por estos es mucho más rápida que por la cerámica y la madera.

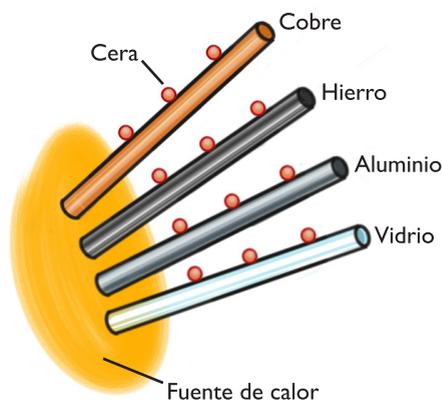
En el momento actual la mayoría de los profesores piensan que es útil dar a conocer a los alumnos modelos y teorías que han tenido importancia en la historia de la ciencia, tanto porque son útiles para adquirir los conceptos como por el hecho de que suelen coincidir con la manera de pensar intuitiva de los alumnos. Y justamente en este caso veremos que el método histórico es el más apropiado. Es fácil realizar en el aula experimentos sobre conductividad térmica, como las que realizó

Benjamin Franklin, calentando un extremo de diferentes varillas del mismo diámetro y longitud, a las que se han añadido diferentes trozos de cera a distancias regulares del extremo caliente (**Imagen 8**).

Si pedimos a nuestros alumnos que analicen el resultado del experimento es seguro que reproducirán el mismo de Benjamin Franklin. El calor que se origina en la llama es conducido con una cierta velocidad a lo largo de las varillas, aumentando la temperatura de estas. Cuando la temperatura de un cierto punto alcanza el punto de fusión de la cera, esta se funde, indicándonos cómo el calor avanza a lo largo de las varillas.

En esta explicación están implícitos el concepto de calor como *una cosa, algo material*, como el aire o el agua, que avanza desde los puntos *calientes* a los puntos *fríos*. Esta misma idea permeó la sociedad científica de finales del siglo XIX.

Basta con hacer que los alumnos profundicen sobre el significado de la expresión, *puntos calientes* y *puntos fríos*, para que ellos mismos se den cuenta de que, en realidad, se refieren a puntos a más temperatura y puntos a *menos temperatura*, tal como la indicaba el termoscopio de Galileo y mide el termómetro que inventó Fahrenheit.



**Imagen 8.** Ilustración del experimento sobre conductividad térmica de Franklin.

## El concepto de temperatura: el termoscopio

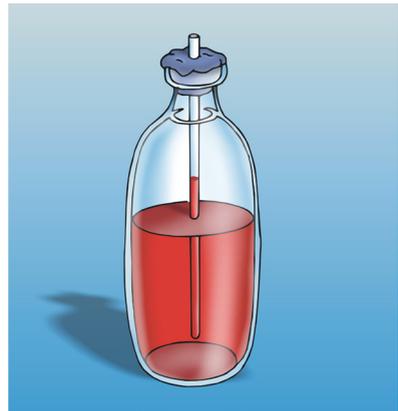
Con objeto de determinar el valor del nivel térmico de los cuerpos de alguna forma, Galileo construyó en 1592 un instrumento al que llamó *termoscopio* utilizando vino florentino como líquido indicador.

En el aula podemos utilizar un termoscopio, mucho más sencillo de construir y que funciona por el mismo principio. El instrumento está compuesto por una botella de vidrio transparente, de pequeño volumen (con 0,1 litro es suficiente), cerrada por medio de un tapón o plastilina atravesado por un tubo fino de plástico o una pajita

transparente de refresco (suficientemente larga como para que no se salga el líquido cuando utilicemos el instrumento) cuyo extremo inferior está sumergido en agua teñida con un colorante vegetal de los usados en la cocina (**Imagen 9**).

En este caso, es la superficie del líquido de la pajita la que se encuentra a presión atmosférica, y la superficie del líquido de la botella la que se encuentra sometida a la presión del aire que se encuentra encerrado en ella, cuya presión y volumen cambia al variar la temperatura. Podemos comprobar su funcionamiento calentando con las manos la parte superior de la botella. Al aumentar su temperatura veremos que el nivel del líquido de la pajita asciende.

A continuación emplearemos el termoscopio para determinar *lo caliente* que se encuentran dos recipientes con agua a distinta temperatura. Sumergimos el cuerpo del termoscopio, es decir, la botella en el recipiente con agua fría y observamos cómo desciende el nivel del agua coloreada hasta llegar a una situación estable. Señalamos la posición del nivel de agua coloreada con un rotulador y a continuación sumergimos el termoscopio en el recipiente que contiene agua caliente. El líquido rojo ascenderá hasta llegar a un nivel estable, indicando que ha alcanzado el equilibrio, y marcamos la posición alcanzada. Podemos decir que la altura del líquido en la pajita indica lo caliente que se encuentra el agua en el que hemos sumergido el termoscopio.



**Imagen 9.** Ilustración de un termoscopio para el aula.

Galileo y otros investigadores de la época comenzaron a considerar el nivel del líquido del tubo como indicador del nivel térmico del cuerpo, al que nos hemos referido, y llamaron a ese nivel *temperatura*. De esta manera, por medio de este instrumento Galileo sustituyó la expresión *lo caliente que se encuentra un cuerpo* por la *temperatura a la que se encuentra un cuerpo*, siendo la altura de la columna una especie de medida de la nueva magnitud: *la temperatura*.

Llegados a este punto merece la pena que reflexionemos sobre el procedimiento que se sigue para medir. Cuando se pone en contacto el termoscopio y el cuerpo cuya temperatura queremos determinar, debemos esperar hasta que la altura de la columna permanezca estable. Esto implica que la temperatura del termoscopio va-

ría hasta ser igual a la del cuerpo cuya temperatura queremos conocer. ¿Cuál es el mecanismo por el que se llega a ese equilibrio? Podemos preguntar a nuestros alumnos para ver cómo razonan.

La respuesta es simple y a la vez complicada. El termoscopio indica la temperatura a la que él mismo se encuentra; cuando sumergimos en agua caliente su temperatura aumenta, por lo que el líquido coloreado asciende por el tubo. El nivel se estabiliza cuando la temperatura del termoscopio es la misma que la del líquido, por lo que la temperatura indicada es, a la vez, la del termoscopio y la del agua en la que lo hemos sumergido.

Lo mismo ocurre cuando lo sumergimos en agua fría. Su temperatura disminuye por lo que el líquido coloreado desciende por el tubo. El nivel se estabiliza cuando la temperatura del termoscopio se iguala a la del líquido y, de nuevo, la temperatura indicada es, a la vez, la del termoscopio y la del agua fría en la que lo hemos sumergido.

Podemos pedir a nuestros alumnos que propongan una definición de *temperatura*, comprobando así si han entendido el proceso que hemos seguido para introducir este concepto.

Pero aún podemos aprender mucho más de la observación de estos procesos. Cuando sacamos el termoscopio del recipiente con agua caliente su temperatura es la misma que la del agua y corresponde al nivel elevado del líquido rojo. Si sumergimos el termoscopio caliente en el agua fría el nivel comienza a descender, indicando que la temperatura del termoscopio disminuye. ¿A qué se debe y cómo se produce esa disminución de temperatura?

Seguramente nuestros alumnos nos habrán dado la explicación. Cuando se ponen en contacto dos cuerpos *el calor pasa del que tiene una temperatura más elevada al que tiene una temperatura más baja* y este proceso continúa hasta que ambos cuerpos llegan al equilibrio, es decir, a estar a *la misma temperatura*. Esta explicación corresponde, como es habitual en ciencia, a un modelo que ha ido modificándose con el paso del tiempo para explicar los fenómenos que se iban descubriendo. Nosotros vamos a ir describiendo estos modelos sucesivos y los experimentos que hicieron necesario los cambios de modelo.

Debemos señalar que cuando Galileo construyó su termoscopio, en 1592, aún no se conocía de forma cuantitativa la ley de los gases perfectos, cuyo primer enunciado referido a la presión y el volumen se debe a Robert Boyle que nació treinta y cinco años después.

## La importancia del proceso de medir: la temperatura como magnitud

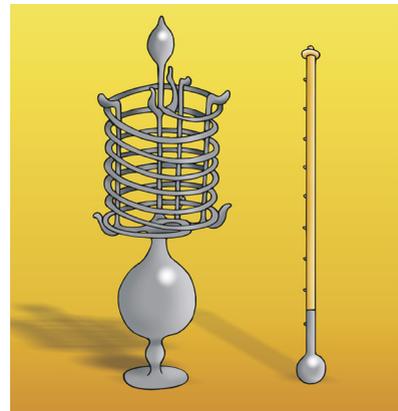
Muy probablemente nuestros alumnos nos preguntarán la razón por la que llamamos termoscopio en vez de termómetro al instrumento inventado por Galileo. La respuesta es muy sencilla: el nombre del instrumento procede del griego *termo* (calor) y *scopio* (mirar) ya que únicamente se pueden observar con él cambios de temperatura de una manera semicuantitativa. Un termómetro, en cambio, puede *medir la temperatura* (*metro* en griego), proporcionando como resultado de la medida un número seguido del nombre de una unidad (15 grados centígrados, por ejemplo).

Con el conocimiento aportado por Galileo, Fernando II, el Gran Duque de Toscana, perfeccionó el termoscopio, pero no llegó a inventar el termómetro, ya que no hizo uso de puntos fijos al definir su escala, que seguía resultando arbitraria (**Imagen 10**).

A pesar de ello, la mayoría de los termómetros que vemos en la actualidad son de líquido y siguen las líneas generales del termoscopio de Fernando II. Por eso debemos transmitir a nuestros alumnos la idea de que, una vez elaborado el concepto, el establecimiento de una unidad es tan importante como la definición del proceso de medida.

En 1701 Ole Christensen Roemer publicó el primer termómetro con puntos de calibración fijos y reproducibles, utilizando un tubo de vidrio que contenía alcohol. El cero de temperatura correspondía a una mezcla de hielo y sal y asignaba 60 grados a la temperatura de ebullición del agua. Por alguna razón este termómetro no se hizo popular entre los científicos, reservándose para Fahrenheit la gloria de construir el primer termómetro operativo y ampliamente utilizado.

En 1724 Daniel Gabriel Fahrenheit estableció una escala objetiva de temperaturas de tres puntos fijos y, por lo tanto, una unidad. Fahrenheit, usando tubos de vidrio calibrado y mercurio, tomó como puntos de calibración las temperaturas de la mezcla frigorífica (0° F), la de fusión del hielo (32° F) y la del cuerpo humano (96° F). Así eliminó la necesidad de utilizar frecuentemente temperaturas negativas, como ocurría con el termómetro de Roemer.



**Imagen 10.** Ilustración de termoscopios de Fernando II (también conocidos como termómetros florentinos).

Además, la sustitución del alcohol del termómetro de Roemer por mercurio presentaba la ventaja de que el termómetro se podía utilizar hasta los 600° F, temperatura de ebullición del mercurio (unos 356° C). Algunos de nuestros alumnos pueden preguntarnos cómo es posible que Roemer midiese temperaturas de 100° C (la de ebullición del agua) con un termómetro de alcohol etílico, que hierve a unos 79° C. La razón es que esta temperatura es la de ebullición a presión atmosférica; al estar el tubo del termómetro cerrado (al vacío) permanece con una fase líquida hasta alcanzar el punto crítico, a partir del cual no existe fase líquida. Para el etanol esta temperatura es de 241° C y la presión 65 bar, por lo cual podemos utilizar un termómetro de alcohol etílico (con el vidrio suficientemente grueso) para medir temperaturas de 100° C.

Una vez que disponemos de una unidad de *temperatura* es fácil definir la unidad de cantidad de calor. Como ya comentamos en «Breve historia de la máquina de vapor», la primera unidad de cantidad de calor fue la British Thermal Unit (BTU) que corresponde, en medidas modernas, a 1055 julios (J). Así, a partir de 1724 se pudieron realizar cálculos con cantidades de calor, lo que posibilitó la caracterización de los materiales y la ingeniería de máquinas térmicas.

Más adelante, en 1742, Anders Celsius definió una nueva escala de temperaturas con dos nuevos puntos fijos, el punto de congelación del agua y el de ebullición. Esta escala, corregida por Carlos Linneo en 1745, es la escala centígrada que se utiliza en la actualidad, salvo en los países anglosajones. La unidad de cantidad de calor correspondiente a la escala centígrada es la caloría (con c minúscula), que se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1 grado Celsius (C) la temperatura de un gramo de agua y equivale a 4,18 J.

Con estos adelantos en la conceptualización y en la medida es fácil comprobar que si se ponen dos cuerpos en contacto el calor siempre fluye del de mayor temperatura al de menor temperatura. Así, el proceso tiende a equilibrar ambos cuerpos a la misma temperatura, momento en el que el calor deja de fluir.

## **El primer modelo práctico del calor: el calórico de Lavoisier**

De descubrimiento en descubrimiento, llegamos al año 1789, en el que se produjo la Revolución francesa y en el que el químico francés Antoine Lavoisier publicó su libro *Traitée Élémentaire de Chimie*, postulando la existencia de un nuevo fluido al que llamó *calórico*, responsable de todos los procesos térmicos. Lavoisier pensó que el calórico era un elemento, como el hidrógeno o el oxígeno.

El calórico no tenía masa ni peso, era inodoro e invisible y estaba formado por partículas que se repelían entre sí. Esta fuerza de repulsión era la responsable de que el calórico pasara de los cuerpos calientes (que tenían mayor densidad de partículas de calórico) a los cuerpos fríos. Es fácil ver, desde nuestro siglo XXI, que el calórico se comportaba a grandes rasgos como lo hace el calor, *energía cinética de las partículas*. Por ello, Carnot pudo utilizarlo para su estudio termodinámico de las máquinas de vapor, lo que nos enseña que los modelos científicos no tienen que ser necesariamente exactos para ser útiles.

## Lavoisier utiliza la definición de elemento de Boyle: una sustancia pura que no puede descomponerse en otras más sencillas

En el lenguaje moderno los *elementos* son los *átomos* de la tabla periódica y las *sustancias* las *moléculas* que se forman por combinación de los átomos. Con este modelo Lavoisier describió el proceso de combustión *como una combinación de un elemento con oxígeno, semejante al de la respiración de los seres vivos*, comenzando así lo que se considera la química moderna. En su libro Lavoisier enumeró la siguiente serie de elementos (**Imagen 11**).

Como vemos, los dos primeros elementos de Lavoisier son la luz y el calor, aunque ahora sabemos que son dos formas de *energía* y, por lo tanto, no deberían haber sido incluidos en la relación.

El cuadro que hemos incluido (**Imagen 12**), realizado por David, representa a Lavoisier con su esposa, Marie-Anne Pierrette, y en él aparecen algunos elementos de laboratorio que indican la faceta científica de ambos. Marie-Anne era hija de uno de los propietarios de La Ferme Générale, una empresa concesionaria de la recau-

	Noms nouveaux	Noms anciens correspondans
Substances simples qui appartiennent aux trois régnes & Qu'on peut regarder comme les élémens de corps.	Lumière. ....	Lumière.
	Calorique. ....	Chaleur. Principe de la chaleur. Fluide igné. Feu.
	Oxygène. ....	Matière du feu & de la chaleur. Air déphlogiftiqué. Air empiréal. Air vital. Bafe de l'air vital.
	Azote. ....	Gaz phlogiftiqué. Mofete. Bafe de la mofete. Gaz inflammable. Bafe du gas inflammable.
	Hydrogène. ....	Soufre. Phofphore. Charbon pur.
Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.	Soufre. ....	Inconnu.
	Phofphore. ....	Inconnu.
	Carbone. ....	Inconnu.
	Radical muriatique.	Antimoine.
	Radical fluorique.	Argent.
	Radical boracique.	Arfenic.
	Antimoine. ....	Bifmuth.
	Argent. ....	Cobolt.
	Arfenic. ....	Cuivre.
	Bifmuth. ....	Etain.
Substances simples métalliques oxidables & acidifiables.	Cobolt. ....	Per.
	Cuivre. ....	Manganéfe.
	Etain. ....	Mercure.
	Per. ....	Molybdéne.
	Manganéfe. ....	Nickel.
	Mercure. ....	Or.
	Molybdéne. ....	Platine.
	Nickel. ....	Plomb.
	Or. ....	Tungftene.
	Platine. ....	Zinc.
Substances simples falifiables terreftes.	Plomb. ....	Chaux.
	Tungftene. ....	Magnéfié.
	Zinc. ....	Baryte.
	Chaux. ....	Alumine.
	Magnéfié. ....	Silice.
Baryte. ....		
Alumine. ....		
Silice. ....		

**Imagen 11.** Elementos propuestos por Lavoisier en *Traitée Élémentaire de Chimie*.

dación de impuestos del reino en la que Lavoisier aparecía como socio. Por esa razón y por el odio de Marat, fue arrestado en 1793, procesado y guillotinado el 8 de mayo del año siguiente a los cincuenta años de edad.

## Huygens y el invento del motor de explosión

En 1629 nace Christiaan Huygens en La Haya, en una familia cuyo padre, diplomático de profesión, era amigo personal de Galileo, René Descartes y Marin Mersenne, proporcionando a Christiaan una educación acorde con las aficiones de su progenitor.

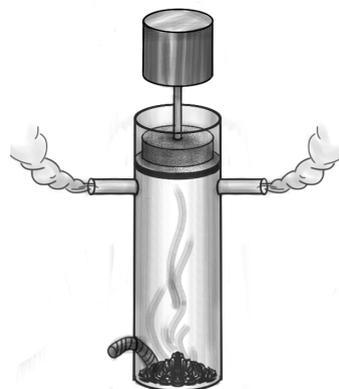
La razón por la que Huygens aparece en nuestra historia es por inventar el primer motor de émbolo con posibilidades de funcionar. Pero no fue ese su único mérito. En 1656 construyó el primer reloj de péndulo, sustituyendo a los de *foliot*, muy imperfectos. En 1660 Huygens se trasladó a París, donde obtuvo el puesto de *curator* (encargado de los laboratorios y talleres de experimentación) en la Académie des sciences.

Esta institución contrató, en 1671, a un experimentado investigador llamado Denis Papin, que ya contaba cincuenta años, como ayudante de Huygens. Papin construyó y experimentó con una posible máquina, que funcionaba con pólvora como combustible, siguiendo las indicaciones de su maestro. La máquina de pólvora (**Imagen 13**) fue descrita en 1678 y es el primer motor de explosión que se conoce.

El funcionamiento de la máquina es conceptualmente muy simple. Con el émbolo (o pistón) en la posición inferior se introduce pólvora (como en la recámara de un cañón) y se hace explotar. Los gases generados por la combustión de la pólvora producen en el interior del cilindro una presión superior a la atmosférica, empujando el pistón hacia la parte superior del cilindro. Al llegar al punto superior el pistón descubre dos orificios por los que los



**Imagen 12.** Retrato de Antoine-Laurent y Marie-Anne Lavoisier, óleo sobre lienzo de Jacques Louis David.



**Imagen 13.** Ilustración de la máquina de pólvora (gunpowder engine) de Huygens-Papin.

gases del interior escapan a la atmósfera, reduciendo la presión del interior del cilindro hasta el valor de la presión atmosférica. El peso del cilindro hace que descienda hasta la posición inferior, a la vez que se impide que el gas remanente se comprima mediante la apertura del orificio de carga, situado en la parte inferior.

Papin se trasladó a Londres poco después de la publicación del motor, con la idea de construir una máquina mejorada, interesándose en el empleo del vapor de agua en sustitución de los gases de combustión de la pólvora.

## Papin y el primer diseño conceptual de máquina de vapor

En Londres Papin trabajó a las órdenes de Robert Hooke, el cual realizó entre otras cosas descubrimientos en elasticidad. Papin estudio la relación entre la temperatura de ebullición y la presión, desarrollando la olla a presión (*steam digester*) que, trescientos años después, todavía utilizamos en nuestras cocinas.

Pero en este artículo estamos interesados en su máquina de vapor, una variación del prototipo de la máquina de pólvora. Papin decidió utilizar agua líquida en lugar de pólvora y transformarla en vapor para elevar el pistón de su máquina, que construyó en 1690. Para volver a su punto inicial únicamente tendría que enfriar el vapor y volver al estado líquido. El motor consiste en un cilindro metálico y un émbolo o pistón que ajusta al cilindro por medio de juntas de cuero engrasadas con una pequeña cantidad de agua en su interior.

Las máquinas constituidas por un cilindro y un émbolo funcionan todas en un ciclo repetitivo que los ingenieros dividen en tiempos. Un tiempo comprende el movimiento del émbolo desde el punto inferior de su recorrido al punto superior del mismo, o viceversa. El ciclo de la máquina comprende un número entero de tiempos, de manera que al final del ciclo la máquina se encuentre exactamente en el punto inicial del ciclo siguiente. La máquina de Papin corresponde a la clase de máquinas cuyo ciclo es de dos tiempos y pasaremos a estudiarla a continuación con mayor detalle que en nuestro anterior trabajo.

En el primer tiempo se aplica calor al cilindro por medio de una llama, hasta que se alcanza la temperatura de ebullición del agua. Como la presión a la que se encuentra el líquido es superior a la atmosférica (debido al peso del émbolo), comenzará a hervir a una temperatura algo superior a los 100° C.

En esta parte del ciclo ocurren diferentes procesos, muy interesantes en sí mismos; los podemos describir como lo haría, de forma elemental, el mismo Sadi Carnot: en primer lugar, el calor de la llama (que se encuentra entre 1000 y 1500° C) pasa al metal del cilindro y después al agua, que se encuentra a temperatura muy inferior a la de la llama. El agua, al absorber calor, aumenta su temperatura paulatinamente. Este aumento de temperatura absorbe una caloría por gramo de agua. La temperatura del agua del cilindro va aumentando a medida que absorbe el calor generado por la combustión hasta llegar a los 100° C, momento en el que comienza a hervir.

Este proceso de cambio de estado es especialmente importante y merece un estudio aparte. Fue Joseph Black, maestro de Watt, el que estudió por primera vez los procesos de cambio de estado desde el punto de vista térmico.

Joseph Black nació en Francia en 1728 (cuatro años después de la construcción del primer termómetro Fahrenheit) y murió en Edimburgo, en 1799 (diez años después del comienzo de la Revolución Francesa). Su gran descubrimiento consistió en darse cuenta de que cuando un gramo de agua líquida absorbe una caloría, la emplea en aumentar un grado su temperatura. Pero cuando alcanza la temperatura de ebullición, el agua sigue absorbiendo calor sin que su temperatura aumente.

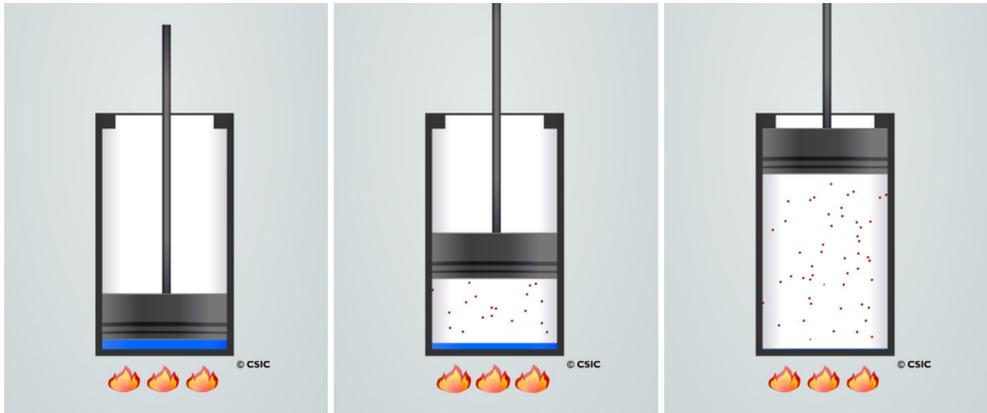
Black conceptualizó este proceso de la siguiente forma: cuando se produce un cambio de estado, por ejemplo, de líquido a gas, la temperatura se mantiene constante en tanto existan las dos fases, líquido y gas. El sistema absorbe calor, que emplea en el cambio de estado, sin que se produzca aumento de temperatura.

La cantidad de calor absorbido que se emplea en el cambio de estado, por ejemplo en pasar de líquido a gas, lo llamó *calor latente* de cambio de estado, en nuestro caso de vaporización.

En el caso del agua, el calor de vaporización es de unas 540 calorías por gramo, que se emplean en romper los enlaces que mantienen a las moléculas en estado líquido. Como elemento de comparación diremos que el calor latente de fusión del hielo es de unas 80 calorías.

Volvamos a nuestra máquina, ayudados por las investigaciones de Black, podemos decir que el agua del cilindro, una vez alcanzada la temperatura de ebullición, sigue absorbiendo 540 calorías por gramo hasta su completa evaporación. En cambio, una vez transformado en vapor solo absorbe 0,48 calorías por gramo y grado de aumento de temperatura.

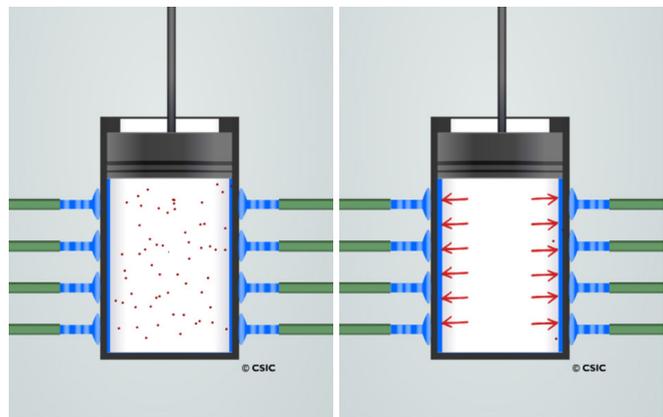
Al aparecer vapor de agua en el cilindro y seguir absorbiendo calor, se desarrolla una presión superior a la atmosférica, por lo que el émbolo comenzará a ascender hacia el punto superior del recorrido; allí se completa el primer tiempo del ciclo (**Imagen 14**).



**Imagen 14.** Sucesión: inicio del ciclo, inicio del primer tiempo y final del primer tiempo.

Como la madera tiene un poder calorífico de unos cinco millones de calorías por cada kilogramo que se quema, es fácil hacerse una idea aproximada del consumo teórico de la máquina.

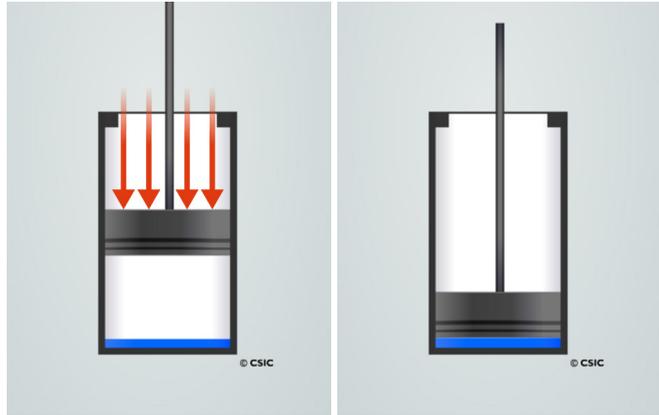
Una vez alcanzada esta situación, se retira el fuego y se refrigera el cilindro por medio de unos chorros de agua fría. El agua absorbe calor de las paredes del cilindro, con lo que la temperatura de las paredes baja por debajo del punto de rocío del interior de la máquina (**Imagen 15**).



**Imagen 15.** El agua absorbe calor de las paredes del cilindro y se condensa el vapor.

La condensación del vapor crea un vacío parcial dentro del cilindro, con lo cual la presión atmosférica exterior lleva al pistón a su punto inferior, terminando así el segundo tiempo de la máquina (**Imagen 16**). Como la fuerza que produce este descenso se debe a la presión atmosférica, a estas máquinas se las llamaba *máquinas atmosféricas*.

Es fácil calcular la fuerza que se ejerce sobre la superficie superior del émbolo; dado que el valor de la presión atmosférica es de unos 10 N por centímetro cuadrado, una máquina de 1 metro de diámetro produciría unos 75000 N de fuerza sobre el pistón, fuerza que corresponde a la que proporcionarían unos cien caballos, de acuerdo con el cálculo que hicimos en



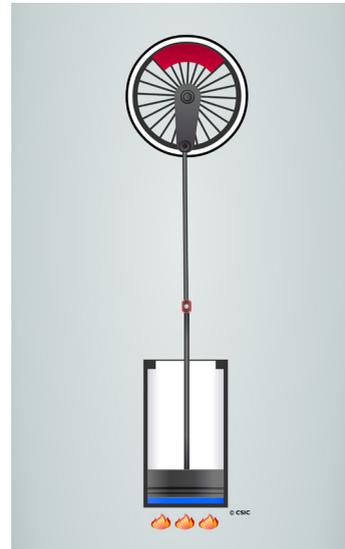
**Imagen 16.** Fin del segundo tiempo de la máquina.

el caso de los hemisferios de Magdeburgo. El efecto de esta fuerza es llevar el pistón al punto inferior. Esta situación marca el final del segundo tiempo, reproduciéndose la situación previa al primer tiempo del siguiente ciclo.

Papin pensó aplicar la máquina para bombear agua de las minas o para mover un eje al que se pudieran conectar correas motrices, haciendo el mismo efecto que las turbinas de los saltos de agua (**Imagen 17**).

## Experimento para familiarizarse con los procesos que ocurren durante el funcionamiento de la máquina de Papin

Para que los alumnos se den cuenta de la enorme fuerza que la presión atmosférica puede producir podemos realizar un experimento fácil y de interpretación sencilla: la implosión de un bote de refresco. Para ello preparamos un bote vacío de un tercio de litro y vertemos en él unos 20 centímetros cúbicos de agua. A continuación lo calentamos con la llama de un mechero de alcohol hasta que oigamos el ruido típico que indica que el agua está hirviendo. Seguimos aplicando calor durante medio minuto, observando la neblina que sale por la parte superior del bote, de



**Imagen 17.** Nuestra recreación de la máquina de Papin adaptada a un eje.

manera que el vapor producido por la ebullición arrastre todo el aire contenido en el bote.

En este punto, en el interior de la lata de refresco no debe quedar más que vapor de agua, ya que el aire que contenía ha sido obligado a salir por la corriente de vapor y la temperatura de la pared debe ser superior a los  $100^{\circ}\text{C}$ . A continuación tomamos el bote por la chapa de la apertura con unas pinzas o unos alicates pequeños y lo sumergimos rápidamente en un recipiente con agua, con la apertura hacia abajo. Inmediatamente la temperatura de la chapa bajará por debajo de los  $100^{\circ}\text{C}$  y el vapor se condensará rápidamente, produciendo un vacío parcial en el interior de la lata. Como la presión exterior es la atmosférica la lata implotará (**Imagen 18**).

Una vez realizado el experimento delante de nuestros alumnos deberemos asegurarnos de que entienden cada uno de los pasos del proceso.

A continuación mostramos a la clase la siguiente fotografía, pidiéndoles que nos expliquen qué ha ocurrido (**Imagen 19**).

El depósito cilíndrico se destinaba probablemente a transportar algún tipo de líquido con punto de ebullición bajo. Cuando estaba abierto, recibiendo los rayos del sol, algún operario cerró los grifos; al enfriarse se condensó el vapor de su interior disminuyendo la presión, provocando la implsión del depósito.



**Imagen 18.** Ilustración de la experiencia de implotar un bote.



**Imagen 19.** Implsión de depósito cilíndrico. Fuente: YouTube.

## Construcción de una máquina de vapor en el aula

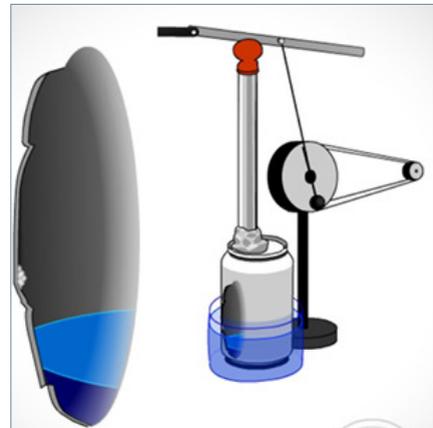
La fabricación de la máquina es muy sencilla. Consta de un bote de refresco de un tercio de litro al que se le ha unido un tubo de unos 15 centímetros de longitud, de cobre. Para la unión se ha empleado un polímero de dos componentes de los que se utilizan en fontanería. Se introduce en el bote una pequeña cantidad de agua y se coloca un globo, de goma gruesa, en extremo superior del tubo. En esta situación nuestra máquina se encuentra en el inicio de primer tiempo del ciclo (**Imagen 20**).

A continuación se calienta la lata de refresco por medio de un mechero, hasta que hierva el agua. El vapor resultante infla el globo.

Seguimos calentando hasta que el volumen del globo aumente hasta el punto que deseemos. Este punto corresponde al final del primer tiempo y el inicio del segundo.

En este punto se retira la llama y se sumerge la lata en un recipiente con agua, lo que provoca la disminución de la temperatura de la misma, produciéndose la condensación del vapor de agua. La presión en el interior de la lata se reduce y el globo se deshincha a lo largo del segundo tiempo.

Si el conjunto no tiene poros, cuando se haya condensado el vapor producido en el primer tiempo nos encontraremos en las condiciones iniciales, final del segundo tiempo y comienzo de un nuevo ciclo.



**Imagen 20.** Ilustración de nuestra máquina de vapor para el aula.

## Los principios de la termodinámica

Debe quedar claro en la mente de los alumnos, algunas características básicas del funcionamiento de estas máquinas:

- El trabajo útil que realizan se debe a que aparece una fuerza (producida por la presión atmosférica sobre el pistón) que actúa a lo largo del recorrido del émbolo.
- Para que la máquina funcione es imprescindible la existencia de dos elementos, uno a alta temperatura (el fuego) y otro a baja temperatura (el agua de refrigeración). El foco caliente cede calor a la máquina y el foco frío absorbe calor.

- La máquina funciona gracias al calor suministrado por el foco caliente menos el calor que se ha cedido al foco frío. Por lo tanto podemos decir que convierte una parte de esa cantidad de calor en trabajo.
- No todo el calor que se le suministra se transforma en trabajo. De hecho, en esta máquina, la mayoría del calor suministrado se emplea en calentar el cilindro y el émbolo, para luego volver a enfriarlo al final del ciclo.

Estas observaciones dieron lugar a los los tres principios básicos de la termodinámica:

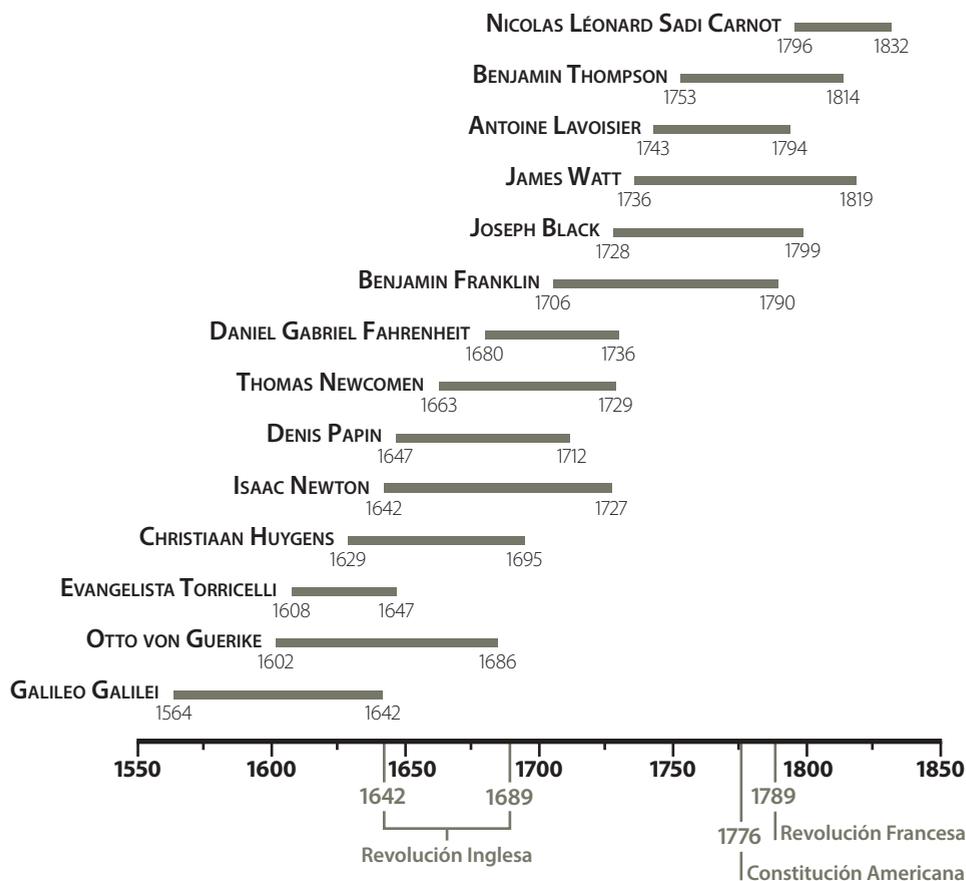
- **Principio cero:** si se ponen en contacto dos objetos a diferente temperatura, el calor pasará del cuerpo a temperatura más elevada (más caliente) al de menor temperatura, hasta que ambas se igualen (se alcance el equilibrio).
- **Primer principio:** no se puede obtener energía de la nada; la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. En nuestro caso la energía calorífica se transforma en trabajo.
- **Segundo principio:** toda máquina térmica que funcione en ciclos debe absorber calor de un foco caliente y ceder parte del mismo a un foco frío. Podemos añadir que el rendimiento de la máquina, es decir, la parte de calor que se transforma en trabajo, aumenta al aumentar la diferencia entre la temperatura de ambos focos.

## Marco de referencia histórico

Creemos, y es nuestra práctica habitual, que la enseñanza de cualquier contenido científico en las aulas no debe ser nunca ajena al desarrollo histórico de los conceptos y personajes que intervienen. Las razones son múltiples: conveniencia didáctica, transversalidad con otras disciplinas, situación temporal de los problemas y paradigmas del momento, etc.

Proponemos al maestro no solo realizar un marco histórico con los científicos intervinientes sino ampliarlo también a otros personajes y movimientos de carácter artístico, político, etc. Las personas que crean conocimiento científico no son nunca ajenas a su sociedad contemporánea ni a sus ideas y creencias.

En el caso de los protagonistas de este artículo valga un breve esquema temporal de aproximadamente tres siglos de grandes cambios sociales (**Imagen 21**).



**Imagen 21.** Extensión temporal de la vida de los científicos, protagonistas de este trabajo, en función de algunos acontecimientos históricos.

## Agradecimientos

Esta publicación forma parte de las actividades de comunicación social de la ciencia previstas en el *Proyecto El CSIC y la FBBVA en la Escuela 2013-2015* que cuenta con la financiación de la Fundación BBVA.

### Recursos complementarios

*Termoscopio para el aula.* Museo Virtual de la Ciencia (CSIC). Recursos Complementarios. [En línea]: <[http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos\\_csic\\_escuela2.htm](http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos_csic_escuela2.htm)>.

*Implosión de un bote.* Museo Virtual de la Ciencia (CSIC). Recursos Complementarios. [En línea]: <[http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos\\_csic\\_escuela3.htm](http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos_csic_escuela3.htm)>.

*Tanker Implodes*. YouTube. [En línea]: <<http://www.youtube.com/watch?v=8RiDWnzDQsQ>>.

*Máquina de vapor para el aula*. Museo Virtual de la Ciencia (CSIC). Recursos Complementarios. [En línea]: <[http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos\\_csic\\_escuela.htm](http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos_csic_escuela.htm)>.

*Proyecto «vacío». Ciencia en el Aula. Teoría Molecular: experiencias en el aula*. El CSIC en la Escuela. MARTÍN M.; PALACIOS, A.; JIMÉNEZ, M.<sup>a</sup> C.; RODRÍGUEZ, S. [En línea]: <<http://www.csicenlaescuela.csic.es/proyectos/moleculas/experiencias/corella/pdf/vacio.pdf>>.

### Referencias bibliográficas

BERNOULLI, D. *Hydrodynamica: sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*. Argentorati, Johann Reinhold Dulsecker. 1738. [En línea]: Books.Google <<http://books.google.es>> [consulta octubre 2013].

CARNOT, S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Annales scientifiques de l'ENS. Serie 2. Tomo 1. 1872. Archivos Numdam. [En línea]: <<http://archive.numdam.org>> [consulta diciembre 2013].

GALILEI GALILEO. *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti la meccanica e i movimenti locali*. Leiden. 1638. Ousia. [En línea]: <<http://www.ousia.it/content/Sezioni/Testi/GalileiDimostrazioniMatematiche.pdf>> [consulta noviembre 2013].

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

LAVOISIER A. L. *Traitée Élémentaire de Chimie*. Paris: Cuchet, 1789. Wikipedia. [En línea]: <[http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File%3ALavoisier\\_-\\_Trait%C3%A9\\_%C3%A9l%C3%A9mentaire\\_de\\_chimie.djvu&page=1](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=File%3ALavoisier_-_Trait%C3%A9_%C3%A9l%C3%A9mentaire_de_chimie.djvu&page=1)> [consulta noviembre 2013].

LÓPEZ SANCHO, J. M.; GÓMEZ DÍAZ, M. J.; REFOLIO REFOLIO, M.<sup>a</sup> C.; LÓPEZ ÁLVAREZ, J. M. *Descubriendo las moléculas: un proyecto para el aula*. Material Didáctico. Madrid: Comunidad de Madrid. Consejería de Educación. Dirección de Orientación Académica. 2006. 200 pp.

MARTÍN MARTÍN, M. & RODRÍGUEZ SAMBLÁS, S. *Proyecto sobre el vacío: la máquina de Savery*. Serie El CSIC en la Escuela. Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula. N.º 2, pp. 7-15. Editorial CSIC. 2011. <<http://libros.csic.es/index.php?cPath=95>>.

MORENO GÓMEZ, E. & LÓPEZ SANCHO, J.M. *Breve historia de la máquina de vapor*. Serie El CSIC en la Escuela. Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula. N.º 6, pp. 104-114. Editorial CSIC. 2012. <<http://libros.csic.es/index.php?cPath=95>>.

*Retrato de Monsieur Lavoisier y su esposa*. Licencia de Dominio Público. Wikipedia. <[http://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:David\\_-\\_Portrait\\_of\\_Monsieur\\_Lavoisier\\_and\\_His\\_Wife.jpg](http://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:David_-_Portrait_of_Monsieur_Lavoisier_and_His_Wife.jpg)>.

*Start your Engines. Huygen's explosion engine*. [En línea]: <<http://library.thinkquest.org/C006011/english/sites/huygens.php3?v=2>> [consulta noviembre 2013].

VALENTI P. *Leibniz, Papin and the Steam Engine: A Case Study Of British Sabotage of Science*. American Almanac. 1996. [En línea]: <[http://members.tripod.com/~american\\_almanac/papin.htm](http://members.tripod.com/~american_almanac/papin.htm)> [consulta noviembre 2013].

Wikipedia. Christiaan Huygens. [En línea]: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan\\_Huygens](http://en.wikipedia.org/wiki/Christiaan_Huygens)> [consulta noviembre 2013].