

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

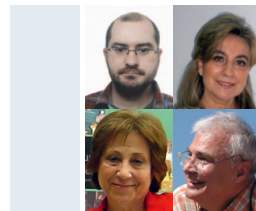
Esteban Moreno Gómez *, M.ª José Gómez Díaz

VACC-CSIC. El CSIC en la Escuela

M.ª Carmen Refolio Refolio y

José M.ª 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.

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 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.

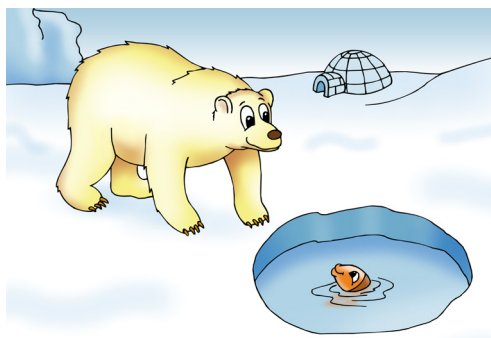


Imagen 1. Los osos polares tienen suelas plantares de gran superficie.

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.

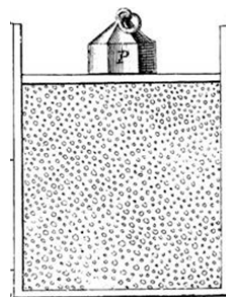


Imagen 2. Émbolo con una pesa ejerciendo presión sobre un gas confinado. Ilustración de Daniel Bernoulli, *Hydrodynamica* (1738).

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**).

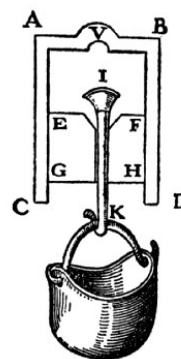


Imagen 3. Ilustración de Galileo mostrando su experimento. «Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze» (1638).

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.

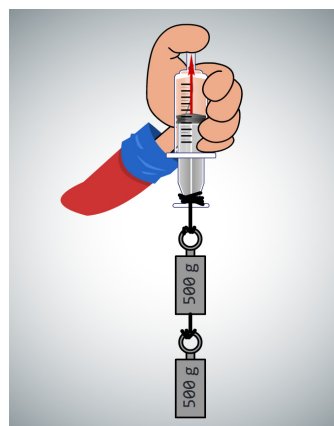


Imagen 4. Propuesta de experimento para el aula: utilizando agua como unidad de masa y con pesas de distinta masa.

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.

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**).

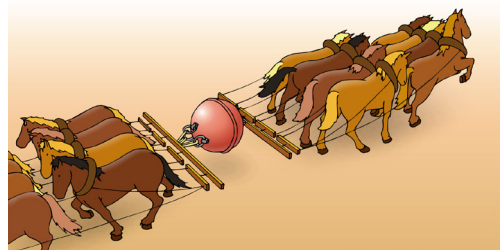


Imagen 5. Ilustración del experimento con los hemisferios de Magdeburgo.

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.

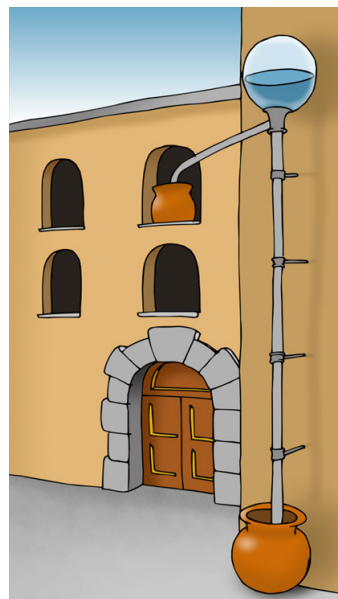


Imagen 6. Ilustración del experimento de Berti.

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.

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).

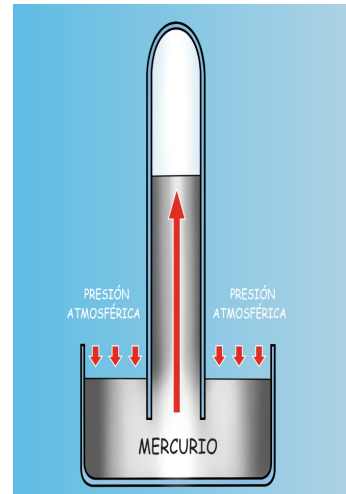


Imagen 7. Representación esquemática del experimento de Torricelli.

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.

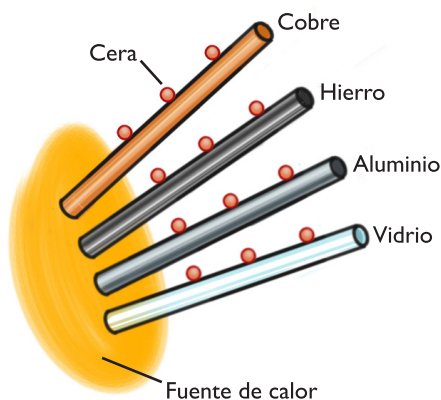


Imagen 8. Ilustración del experimento sobre conductividad térmica de Franklin.

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.

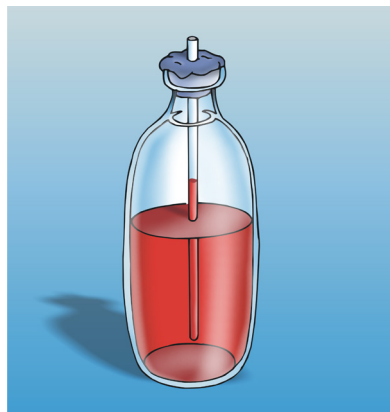


Imagen 9. Ilustración de un termoscopio para el aula.

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.

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.