

LA BUJÍA DE LAVOISIER

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik | Hace siglos que un experimento de física recreativa viene recibiendo repetidamente interpretaciones variadas. Sin embargo, hace 250 años Antoine Lavoisier dio la explicación correcta.

Colóquese una bujía encendida en un cuenco con el fondo lleno de agua. Cúbrase con un recipiente grande de vidrio hasta que el borde se hunda bien en el agua. Tras unos segundos, la llama de la bujía se atenúa y luego se extingue, mientras que el agua es aspirada hacia el recipiente hasta llenar aproximadamente un quinto de su volumen (si hay agua suficiente). Para explicar este fenómeno suelen invocarse varias pistas: la desaparición del oxígeno del aire a causa de la combustión (una «explicación» muy extendida), la disolución del dióxido de carbono producido

o, incluso, la disminución del volumen del aire caliente. Sin embargo, cuidadosos experimentos han confirmado la explicación debida al químico francés Antoine Lavoisier y descartado las otras: cuando se cubre la bujía con el recipiente, el aire caliente queda atrapado; al enfriarse cuando la bujía se apaga, ese aire se contrae, lo cual provoca el bombeo del agua.

El termoscopio, un experimento milenario

Retomemos la historia desde sus inicios, hace más de 2000 años. En efecto, las primeras noticias escritas del experimento datan del 300

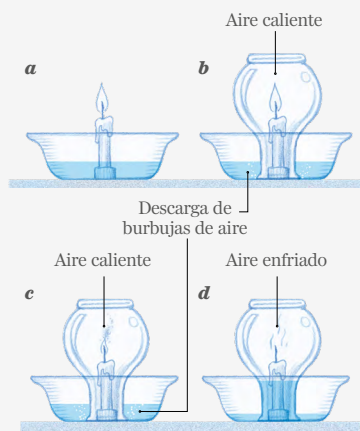


En el experimento de la bujía, así como en el del «termoscopio», es la contracción del aire, durante su enfriamiento, lo que explica el ascenso del agua.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACCARO

Dilatación seguida de compresión del aire

Cuando la bujía está encendida, el aire que la rodea se calienta y, por tanto, se dilata. A menos que el experimento se realice con cuidado, sumergiendo el recipiente invertido hasta una profundidad de agua suficiente, escaparán burbujas de aire (*b, c*). La cantidad de aire presente en el recipiente invertido se ve así reducida, y cuando ese aire se enfría tras apagarse la llama, su volumen disminuye (*d*).



antes de nuestra era. Filón de Bizancio, científico e ingeniero, lo describía en sus *Pneumatica*, y explicaba la reducción de volumen de los cuatro elementos (aire, agua, fuego y tierra). No obstante, Filón había comprendido que la dilatación y la contracción térmicas del aire se manifestaban en el «termoscopio», un aparato que presentaba el mismo efecto.

Ese instrumento consiste (en la versión que popularizó Galileo) en un frasco del tamaño de un huevo de gallina, provisto de un cuello muy largo y fino como una paja. Manteniéndolo entre las manos, el experimentador calienta el frasco y el aire que encierra; luego lo invierte y sumerge la abertura en agua. Cuando retira las manos y el frasco y el aire que contiene se enfrían, el agua asciende veloz por el cuello. Este fenómeno se explica hoy fácilmente sabiendo que una variación de 3 °C en la temperatura de un gas provoca una variación de volumen del orden del 1 % (en un medio a temperatura ambiente).

Respecto al experimento de la bujía, la explicación correcta nos la ofrece la *Memoria sobre la combustión de las candelas en el aire atmosférico y en el aire eminentemente respirable*, de Antoine Lavoisier. Dos brillantes frases la resumen: «Casi todos los que se ocupan de experimentar sobre la combustión de candelas o bujías están persuadidos de que tenía lugar

una reducción considerable del volumen del aire durante la combustión. [...] Pero no se prestaba atención a que no puede colocarse un recipiente sobre una bujía sin que se caliente el aire del recipiente en el mismo instante en que se coloca sobre la bujía, y antes de que entre en contacto con la base: así pues, en la campana se confina aire caliente; ahora bien, ese aire caliente disminuye de volumen al enfriarse».

Escape de burbujas de aire

Lavoisier comprobó también que, a causa de su calentamiento por la llama de la bujía, el volumen del aire encerrado en la campana aumentaba antes de disminuir. Si nos limitamos a poner, sin más, un recipiente por encima de una bujía encendida en pie sobre un platillo, por ejemplo, ese aumento de volumen fuerza al aire a escapar mediante la formación de burbujas, visibles si nos fijamos bien.

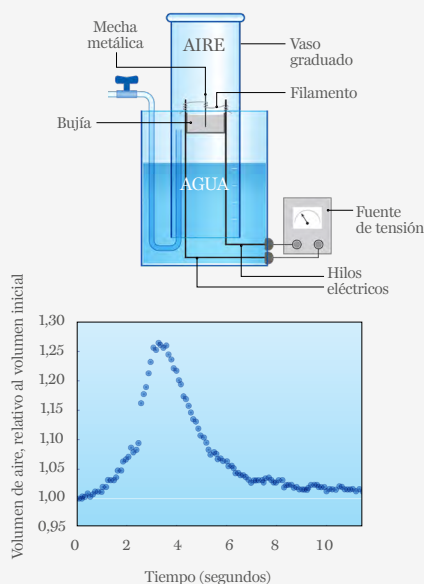
Conclusión: si el experimento se realiza sin los cuidados debidos, no se controlarán realmente la cantidad de aire dentro del recipiente ni su temperatura. Para asegurar que el aire no se escape, basta con realizar el experimento en un recipiente profundo lleno con varios centímetros de agua, de tal modo que, cuando pongamos la campana boca abajo al meterla en el agua, quede sumergida en una altura de agua suficiente. Y para asegurar que el aire contenido en la campana esté a temperatura ambiente, se precisa que el volumen de aire esté cerrado antes de prender la mecha de la bujía.

Eso es lo que hizo John Priestley, el competidor de Lavoisier: encerró en la campana inmersa en mercurio una bujía apagada, para luego prenderla con los rayos solares concentrados por una lente. Lavoisier se sirvió de una variante en la cual situaba junto a la mecha fósforo, que encendía con un hierro caliente que acercaba a través del mercurio.

En una versión más moderna del experimento, informada en 2011, Francisco Vera y dos colegas de la Universidad Católica de Valparaíso, la mecha se enciende merced a una corriente eléctrica que la atraviesa (*véase el recuadro «Un experimento concluyente»*). La conclusión es categórica: en esas condiciones, el volumen de aire varía menos de un 1 % entre el comienzo y el fin del experimento, como si nada hubiera pasado con el aire, salvo calentarse y dilatarse antes de recobrar la temperatura ambiente y su volumen inicial.

Un experimento concluyente

En el experimento realizado por Francisco Vera y sus colaboradores, el recipiente cilíndrico se invierte y se hunde hasta una profundidad suficiente para impedir que el aire se escape (previamente se habrá abierto el grifo del pequeño tubo, para permitir el retorno parcial del agua al recipiente; luego se cierra). La mecha de la bujía es un tubo muy fino de acero inoxidable, y se enciende mediante una corriente eléctrica que pasa por un filamento metálico. Así, el volumen de aire permanece cerrado durante todo el experimento. En estas condiciones se comprueba que ese volumen primero aumenta (a causa del calentamiento del aire), para luego disminuir (por el enfriamiento) hasta recobrar prácticamente su valor inicial.



La química complica las cosas

En ello hay algo que nos desorienta, pues se produce desde luego una reacción química: la combustión de la parafina de la bujía, que se vaporiza por el calor y reacciona con el oxígeno del aire. Esta transformación se escribe $C_{25}H_{52} + 38O_2 \rightarrow 25CO_2 + 26H_2O$, que nos indica que por cada 38 moléculas de oxígeno consumidas se producen 25 moléculas de gas carbónico y 26 de agua. Ahora bien, el oxígeno constituye, en volumen, el 21 % del aire atmosférico: si se consumiera todo durante la combustión de la llama —lo que, por cierto, sugiere la extinción de esta—, obtendríamos, por proporcionalidad, el 13,8 % (21 % x 25/38) del volumen inicial en forma de gas carbónico y un 14,4 % en forma de vapor de agua. Podemos considerar que todo el vapor de agua se condensa, pero ¿qué pasa

con el dióxido de carbono? Experimentos complementarios muestran que su disolución en el agua es insignificante y que, por tanto, debería finalmente sufrir una reducción de volumen del 7 %. ¿Por qué no es este el caso?

Hemos supuesto que la reacción es completa. Ahora bien, cuando la llama se extingue, en realidad se ha consumido solo un 60 % del oxígeno. Se realizó un experimento cuantitativo con una hoja de papel, cuya masa se eligió de modo que su combustión completa requiriera exactamente la cantidad de oxígeno presente bajo la campana. De esa hoja ardió solo la mitad.

¿Por qué una combustión incompleta? Conforme avanza la combustión, disminuye la cantidad de oxígeno presente; ello lentifica la reacción y, por ende, la generación de calor. Llega un momento en que la temperatura de la llama y la cantidad de oxígeno disponible localmente no bastan para mantener la reacción, que se detiene por sí misma. Y eso es lo que observamos con la bujía.

En los primeros segundos, la llama es muy luminosa y la combustión es total. Luego disminuye la luminosidad y vemos humo negro; la combustión es incompleta: en ella se produce carbono en forma de hollín y, también, monóxido de carbono. Al final, la llama se extingue y un poco de parafina sigue evaporándose de la mecha caliente. Ese consumo solo parcial del oxígeno y la producción de monóxido de carbono (que necesita solo un átomo de oxígeno y no dos) explican por qué la reducción de volumen observada es muy inferior al 7 % previsto para una combustión completa. Pero cuando el experimento se efectúa sin precauciones, predomina el efecto térmico: una variación media de 60 °C en la temperatura del aire provoca la variación observada de un quinto de su volumen.

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik
son profesores de física en
la Universidad de París-Sorbona.



PARA SABER MÁS

[Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique, et dans l'air éminemment respirable.](#) A. Lavoisier en *Mémoires de l'Académie des sciences*, pág. 195, 1777.
[Paradoxes, puzzles, and pitfalls of incomplete combustion demonstrations.](#) E. Vitz en *Journal of Chemical Education*, vol. 77(8), pág. 1011, 2000.
[Burning a candle in a vessel, a simple experiment with a long history.](#) F. Vera et al. en *Science & Education*, vol. 20(9), págs. 881-893, 2011.