



Quemando una Vela en un Frasco, un Experimento Simple con una Larga Historia.

Francisco Vera Mathias, Rodrigo Rivera
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
Valparaíso, Chile.

[Primer correo electrónico]

[Segundo correo electrónico]

Abstract- El experimento en que una vela arde en el interior de un vaso precipitado invertido, parcialmente inmerso en agua posee una historia de más de 2200 años, pero incluso hoy en día este es común que estudiantes y profesores se refieran al cambio en el volumen del aire encerrado al contenido de oxígeno. Contrariamente a lo que mucha gente piensa, Lavoisier concluyó que cualquier cambio en el volumen en el experimento es despreciable; Por otra parte, la explicación que relaciona el cambio en el volumen con el consumo de oxígeno en el aire como el cambio de volumen es conocida por estar equivocada. En este trabajo, revisaremos la historia detrás del experimento de la vela y su relación con algunas de las típicas explicaciones erróneas. Uno de los factores clave detrás del éxito de Lavoisier fue el uso de experimentos cuidadosamente diseñados para probar diferentes hipótesis. Siguiendo estos pasos, hemos realizado varios experimentos de volumen encerrado, en donde la vela fue reemplazada por un cilindro capilar de acero inoxidable, apoyado y calentado por un filamento de nicromo conectado a una fuente de alimentación externa.

Nuestros recordados experimentos están dispuestos en páginas web, diseñadas con el propósito de que el lector pueda fácilmente visualizar y analizar versiones modernas de los experimentos de Lavoisier. Estos experimentos muestran claramente una fase inicial de combustión completa, seguida por una fase de combustión incompleta con carbono puro u hollín apareciendo en la parte superior del recipiente y una fase final en que el calor artificial sólo evapora una parte de vapor blanco de la cera que no puede quemarse porque no queda oxígeno en la atmósfera encerrada. Después cualquier combustión completa o incompleta del oxígeno, nuestros experimentos muestran que el volumen del gas es aproximadamente igual al volumen inicial de aire.

Palabras claves: Lavoisier, Presión, Temperatura, Vela, Volumen.

I INTRODUCCIÓN

En siglo III A. C. el ingeniero y escritor científico, Filón de Bizancio realizó probablemente, el primer reporte sobre el experimento de quemar una vela dentro de un recipiente invertido, parcialmente sumergido en agua, el resultado ampliamente conocido es que después que la llama se apaga, el nivel del agua dentro del frasco aumenta.

Filón describió este experimento en su trabajo *Pneumatica*, y fue referido por Herón de Alejandría en el s. I A. D. (Véase Jastrow 1936, p. 171 y el final del segundo párrafo de *Treatise on Pneumatics* en la traducción de Woodcroft de *Pneumatica* de Herón de Alejandría). La explicación errónea de Filón, acerca del cambio de volumen del aire dentro del recipiente fue que los corpúsculos de aire se convirtieron en pequeñas partículas de fuego que escaparon del vaso produciendo un vacío parcial que provocó que el agua ascendiese. Aunque esta explicación sea errónea y parezca absurda en nuestros días, pareció razonable en los tiempos de Filón, basado en los cuatro elementos clásicos de la antigua Grecia.

Filón y Herón además conocieron y dominaron los efectos de la temperatura en la expansión de los gases, como lo demuestran sus explicaciones detalladas sobre el funcionamiento de muchas máquinas. En particular, en sus trabajos se discutió una máquina muy relacionada con el experimento de la vela, llamada Termoscopio. Actualmente, dispositivos similares al termoscopio son comercializados como juguetes llamados 'hand boiler' (caldera de mano), que corresponden esencialmente al termoscopio hecho popular por Galileo. Considerar, por ejemplo el siguiente extracto de una carta escrita por Benedetto Castello a Ferdinando Cesarini en 1638:

Un experimento mostrado a mí por nuestro Señor Galileo, hace más de treinta y cinco años. Él tomó un pequeño

matraz de vidrio, tan grande como un huevo pequeño huevo de gallina, con un cuello de unos dos palmos de largo y fino como una espiga de trigo, y calentó el matraz con sus manos, luego lo invirtió sobre un recipiente que estaba justo debajo, en el que había un poco de agua. Cuando él apartó el calor de sus manos del matraz, el agua instantáneamente ingresó, escalando el cuello, entrando más de un palmo por sobre el nivel del agua en el recipiente. El mismo Señor Galileo tuvo que hacer uso de este efecto para construir un instrumento para examinar los grados de calor y frío. (Knowles 1966, p.8)

El termoscopio consiste en una esfera hueca de vidrio conectada a un delgado cilindro del mismo material, cuyo extremo libre es puesto bajo el agua en un frasco bajo, como el mostrado a la izquierda de la figura 1. Si la temperatura en la esfera de vidrio es primeramente incrementada, y posteriormente el extremo libre del cilindro es invertido en agua, se verá que el agua sube por dentro del cilindro hasta que la temperatura de la esfera disminuye. El termoscopio trabaja en base a la contracción térmica del aire caliente atrapado en la parte alta del frasco, ocasionando una diferencia de presión que lleva el agua a ascender a lo largo del tubo de vidrio. El mismo principio explica el funcionamiento de un antiguo juguete llamado “El ave que bebe” y de las calderas de mano. Versiones modernas de ambos juguetes pueden ser encargadas, por ejemplo desde <http://scientificsonline.com/> (Buscar como “hand boilers” y “drinking bird”, respectivamente).

El principio que actúa detrás del experimento de la vela es también el cambio térmico de volumen en un gas que produce cambios observables en el nivel de la columna de agua. Importantes nombres que trabajaron en los principios subyacentes detrás del experimento de la vela en orden cronológico, son: Filón de Bizancio, Herón de Alejandría, Galileo Galilei, Joseph Priestley y Antoine Lavoisier. La parte inicial de esta línea de tiempo es a la vez, compartida por el termoscopio hecho popular por Galileo, dispositivo muy importante en la historia de la ciencia a causa de que proporcionó el nacimiento del descubrimiento del termómetro por numerosos científicos. Las similitudes de este aparato con el experimento de la vela de Filón son evidentes en la Figura 1. Un buen punto de partida para leer sobre este tema es la sección de Wikipedia en la historia del termómetro: <http://en.wikipedia.org/wiki/Thermometer>.

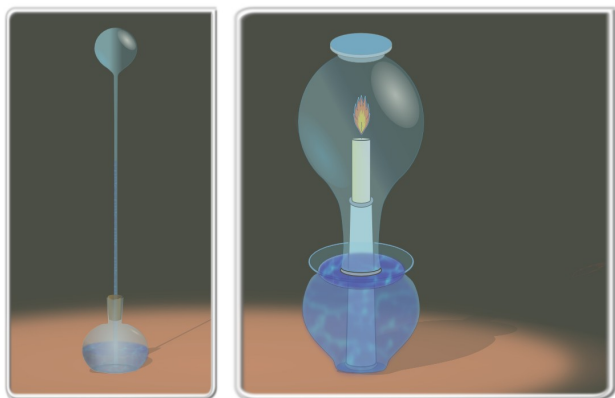


Fig. 1. El termoscopio de Galileo (A la izquierda), Experimento de la vela de Filón de Bizancio (A la derecha)

Una explicación errónea muy común para el cambio de volumen en el experimento de la vela es la siguiente: El oxígeno del aire y el

carbón de la vela se combinan para producir dióxido de carbono y agua. Después de la combustión, debido a que la concentración de oxígeno en el gas es de un 21% (Benedict, 2010¹), se produce una disminución del volumen del gas de 21% cuando éste desaparece.

Los orígenes de algunas concepciones erróneas para el experimento de la vela y muchas variantes de típica formulación han sido discutidas en la literatura (Birk 1999, Krnel 2001, Nuevo Científico 1998, Peckhman 1993) y la postura actual es que la reacción química sólo juega un papel menor. La correcta explicación para este experimento es que se el cambio observado en el volumen es causado por la expansión térmica del aire, por el encierro de aire caliente al interior del recipiente y/o por el aire que burbujea desde el exterior del recipiente. Este burbujeo puede ser fácilmente observado en el video que acompaña este trabajo, el que hemos realizado para el típico experimento de la vela.²

Un elemento común encontrado en trabajos que proporcionan la explicación errónea es su fracaso en diseñar nuevos experimentos para probar o refutar sus hipótesis, o el uso de sistemas no estrictamente cerrados. La mayoría de los científicos experimentales adhieren a la idea que el único mecanismo para aceptar o rechazar una explicación para cualquier fenómeno observado es diseñar cuidadosamente un experimento de prueba para él. Ésta es la esencia del método científico de Galileo Galilei, pero sus orígenes pueden ser rastreados hasta los trabajos de Filón de Bizancio y otros³ (Russo 2004, Jastrow 1936, p. 172).

En este trabajo, nosotros mostraremos algunos nuevos experimentos basados en los experimentos de un volumen encerrado y una vela de Lavoisier, diseñados para testear si los cambios en el volumen realmente existen. Nuestro sistema cerrado simple demuestra convincentemente los efectos que la expansión térmica juega en la demostración clásica del experimento. Nuestro montaje incluye una vela cuya mecha ha sido reemplazada por un delgado cilindro de acero inoxidable que ha sido calentado usando corriente eléctrica. Éste montaje nos permite encender la vela, incluso, bajo la presencia de bajas concentraciones de oxígeno las cuales proveen el

- 1 Esta es una reproducción de un libro publicado antes de 1923, una copia de una edición de 1912 está disponible en línea en http://www.archive.org/details/compositionofatm00beneric_h.
- 2 El experimento puede ser visualizado en la página web http://laplace.ucv.cl/TrackMovingObjects/Gallery/Candle/Candle_demonstration/movimiento.html. Después que todas las imágenes se hayan cargado, se debe presionar el botón Play o avanzar al siguiente o previo cuadro usando las flechas de dirección del teclado. También es posible mover el ratón sobre los cuadros de navegación de la barra de navegación localizada bajo la imagen central para avanzar o retroceder. Este experimento fue grabado a 10 cuadros por segundo.
- 3 Lucio Russo en su libro *The Forgotten Revolution* describe los orígenes del moderno método científico hasta los Científicos Helénicos. Él cita, por ejemplo, una frase reveladora de Filón: “Que no todo puede ser conseguido a través del pensamiento puro y los métodos de la mecánica, pero mucho puede ser hallado también a través de la experimentación”

calor necesario para alcanzar la temperatura de ignición de la cera independientemente del calor producido por la combustión exotérmica. En experimentos típicos la vela permanece encendida cerca de 10 segundos y se extingue debido a la baja concentración de oxígeno que no puede mantener el calor necesario para mantener la temperatura de ignición, necesaria para mantener la reacción. En nuestros experimentos hemos hecho que la vela continúe encendida más de 30 segundos y tres fases pueden ser observadas fácilmente: La primera de ellas, de una combustión completa, luego una fase de combustión incompleta, caracterizada por la presencia de humo negro y finalmente una fase en que sólo un vapor de cera caliente, la cual se evapora debido a la mecha artificial. Hemos repetido nuestros experimentos deteniéndonos en alguna de las mencionadas fases, con algunos experimentos de duración mayor a los 60 segundos. En todos estos experimentos obtuvimos un volumen final del gas cercano a la magnitud del volumen inicial del aire. Debido a que las primeras dos fases requieren un balance diferente de elementos en la reacción química, nuestros resultados muestran que el cambio transitorio en el volumen es sólo una consecuencia de la expansión térmica y la contracción del volumen del gas. El despreciable cambio en el volumen final fue observado por Lavoisier en sus experimentos a volumen encerrado (Lavoisier 1777) y ha sido también reportado en un experimento en que una pieza de papel fue quemada dentro de una cámara rígida de combustión (Vitz 2000).

Después que fuesen obtenidos los resultados en los experimentos de volumen encerrado, es claro que en el típico experimento de la vela y el recipiente el cambio observado en el volumen del gas debe ser una consecuencia del aire caliente atrapado o del aire que burbujea fuera del sistema. Un análisis cromatográfico de gas (GC) para la atmósfera del experimento del papel que se quema (Vitz 2000), muestra un consumo de 56% de la cantidad inicial de oxígeno. Aunque la reacción química para el experimento de la vela es diferente, los resultados del GC previo muestran que la cantidad de oxígeno que reacciona en el experimento del papel que se quema no es una cantidad pequeña, entregándonos algunas evidencias indirectas del porcentaje de oxígeno reaccionando en el experimento de la vela. Tal como lo mostraremos más adelante, nuestros experimentos muestran que el volumen del gas no cambia, independientemente del porcentaje de oxígeno que participa de la reacción química.

II LOS EXPERIMENTOS DE LAVOISIER.

Joseph Priestley y Antoine Lavoisier jugaron un rol fundamental en el surgimiento de la química moderna. En series de experimentos en reacciones químicas y combustión, Lavoisier pudo medir propiedades de cosas invisibles a él (Gases), descubriendo la ley de conservación de la masa. Ésta ley es uno de los más importantes logros de la ciencia y es la base para el entendimiento de las reacciones químicas. Lavoisier sistemáticamente reprodujo el experimento de la vela de Filón (Lavoisier 1777, p. 195), concluyendo que cualquier cambio en el volumen es siempre menor al 1%. Lavoisier concluyó correctamente que el cambio en el volumen en el típico experimento de la vela fue debido a la expansión térmica del aire. En un experimento simple, él situó una campana invertida de vidrio parcialmente sumergida en mercurio, encendió la vela y rápidamente movió la vela por debajo de la campana. La campana fue rápidamente sumergida y la columna de mercurio impidió que el aire burbujease fuera, pero estrictamente no hablamos de éste como un sistema cerrado debido a que inicialmente el aire puede entrar o salir de la campana. En cambio, su contemporáneo y adversario científico, Joseph Priestley en sus experimentos de combustión usó luz del sol y lentes para quemar diversas sustancias dentro de un volumen encerrado. Lavoisier además diseñó una

variación en volumen encerrado del experimento de la vela: Él colocó fósforo cerca de la mecha de la vela y encerró el volumen con una pileta de mercurio, extrayendo parte del aire para conseguir una columna de mercurio que sellara el volumen y permitiese al gas expandirse sin burbujear fuera del frasco. Él introdujo entonces un fragmento de hierro caliente a través de la columna de mercurio para quemar el fósforo y encender la vela⁴.

“Por lo tanto, he decidido tomar todas las precauciones necesarias para obtener un resultado más preciso, cuya validez no esté afectada por errores y la experiencia que pienso es la mejor para éste propósito es la siguiente: He colocado en un lugar una pequeña vela en el medio de un contenedor de vidrio; he colocado en la parte superior de la mecha una pequeña pieza de fósforo de Kunkel, de una masa aproximada de un sexto de grano (10,8 [mg]); después que he puesto en el contenedor de vidrio un baño de mercurio y cubierto éste con una campana de cristal. Finalmente, usando un sifón de vidrio, que conecta el interior de la campana con el exterior, he elevado el nivel de mercurio mediante succión a una cierta altura que he marcado muy precisamente usando una banda de papel adhesivo. Después de realizar toda esta preparación, he calentado un fragmento de hierro con la forma de una barra, que he doblado para este propósito, hasta el rojo vivo e introducido bajo la campana, pasándola a través del mercurio para tocar la parte superior de la vela y encender las pequeñas porciones de fósforo.

Después, tomando en cuenta el volumen conocido que reacciona con una cantidad conocida de fósforo, él concluyó que el cambio en el volumen producto de la combustión de la vela fue despreciable⁵.

“Que puede ser considerado como absolutamente nulo, especialmente si uno presta atención al hecho que esta diferencia podría ser producida por un muy pequeño cambio en la temperatura ambiente.”

Es interesante que la gente pretenda demostrar las ideas de Lavoisier acerca de las reacciones químicas, midiendo típicos

- 4 Lavoisier (1777): j'ai donc résolu de prendre toutes les précautions possibles pour obtenir un résultat plus certain, plus indépendant de toute erreur, et voici l'expérience qui m'a paru devoir être la plus décisive. J'ai assujetti, au milieu d'une capsule de verre, une petite bougie ; j'ai fixé à la partie supérieure de la mèche un petit morceau de phosphore de Kunckel, du poids d'un sixième de grain environ ; après quoi j'ai placé la capsule sur un bain de mercure, et je l'ai recouverte avec une cloche de cristal ; enfin, avec un siphon de verre qui communiquait de l'intérieur de la cloche à l'extérieur, j'ai élevé, en suçant, le mercure jusqu'à une certaine hauteur ; que j'ai marquée très-exactement avec une bande de papier collée. Lorsque tout a été ainsi disposé, j'ai fait rougir une petite tringle de fer que j'avais recourbée pour cet objet, puis je l'ai passée par-dessous la cloche à travers le mercure pour aller toucher le haut de la bougie et enflammer le petit morceau de phosphore.
- 5 Lavoisier (1777): ce qui peut être regardé comme absolument nul, surtout si l'on fait attention qu'un très-léger changement de la température du lieu où se faisait l'expérience a pu produire cette différence.

cambios de volumen cercanos al 21% en un experimento en que Lavoisier midió valores menores al 1%. El cambio insignificante de volumen en los experimentos de Lavoisier no se ha observado en las referencias típicas del experimento de la vela. Actualmente es bien sabido que después que la flama se apaga queda oxígeno residual en el volumen encerrado que permite a un ratón respirar sin dificultades (Birk 1999), un experimento también reportado en tiempos de Lavoisier y Priestley. El experimento de la vela no puede ser usado para demostrar que el contenido de oxígeno del aire es del 21%. Para demostrar el contenido de oxígeno en el aire, el usado típicamente el experimento del la viruta d hierro oxidado encerrada en una atmósfera cerrada (Gordon 2005, JCE staff 2001). En este experimento, el oxígeno se combina con hierro sólido para producir óxido sólido, desapareciendo de la atmósfera de gas. Dependiendo del montaje, el contenido de oxígeno de la atmósfera de gas puede ser obtenido midiendo cambios en el volumen del gas o cambios en la presión del gas. Lavoisier en 1779 también midió el contenido de oxígeno de la atmósfera en su clásico experimento de 20 días en que mercurio es calentado al interior de un volumen cerrado de aire, resultando en un polvo rojo sólido de óxido de mercurio y un 16% del aire usado (Lavoisier 1789, p.35).

III EL TÍPICO EXPERIMENTO DE LA VELA Y EL FRASCO.

La figura 2 muestra una demostración del experimento de la vela, en que un vaso de vidrio es puesto sobre una vela encendida, parcialmente inmersa en agua.

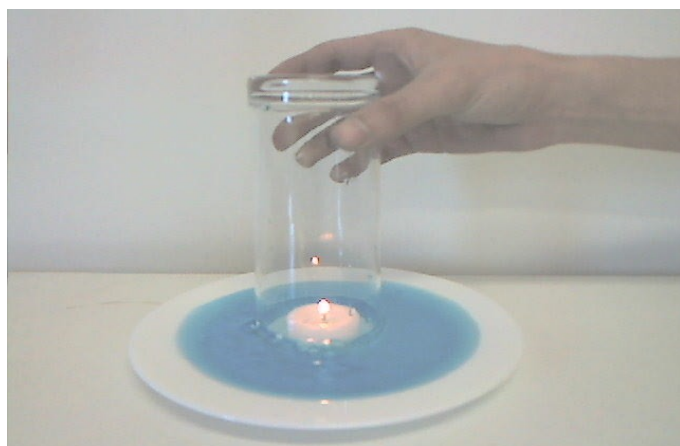


Fig. 2 Típico montaje para el experimento de la vela y el vaso.

Hemos editado un video de este típico experimento de la vela y el vaso en que el cambio en el volumen de aire es claramente observado y el burbujeo de aire caliente puede ser fácilmente visto al comienzo 2 del experimento. Un análisis correcto de este simple experimento realizado para descubrir la relación entre el cambio de volumen del aire encerrado y la reacción química subyacente, puede ser una tarea difícil. Conclusiones erróneas son típicas para este experimento y en algunos experimentos que usan un volumen de gas, éste no está estrictamente cerrado. Los orígenes de las concepciones erróneas típicas y la correcta explicación para este experimento han sido reportados en muchos trabajos (Birk 1999, Peckham 1993, New Scientist 1998), aunque algunos de estos trabajos mencionan resultados que no aceptan el cambio despreciable en el volumen del gas reportado en los trabajos originales de Lavoisier.

La reacción química típica considerada en el análisis de este experimento es (Birk 1999):



Tomando en cuenta que inicialmente el O_2 constituye un 21% del volumen inicial del gas y asumiendo que todo el oxígeno toma parte en la combustión, 38 moléculas de O_2 corresponden al 21% de la atmósfera inicial. Si 38 moléculas corresponden al 21%, entonces 25 moléculas de CO_2 corresponden a un 13,8% y 26 moléculas de H_2O corresponden a un 14,4%. La reacción química muestra que el 21% inicial de oxígeno se transforma en un 13,8% en volumen de H_2O y un 14,4% en volumen de H_2O , resultando en un posible cambio de volumen del gas encerrado entre +7,2% y -21%, dependiendo en cuánto de estos productos de la reacción quedan en estado sólido, líquido o gaseoso o disueltos en el agua.

Por ejemplo, si O_2 , CO_2 y H_2O están en estado gaseoso, las 38 moléculas iniciales se transforman en 51 moléculas y el volumen final crece en un 7,2% (13,8% + 14,4% - 21%). Si el CO_2 no es considerado en el volumen final o suponemos que se disuelve en el agua que sella el volumen y si las moléculas de H_2O supuestamente se condensan en la fase líquida, entonces las iniciales 38 moléculas de O_2 desaparecen del volumen del gas produciendo un volumen de gas 21% menor que el inicial. Si no queda oxígeno para sostener la reacción, el cambio en el volumen podría ser menor que estos valores debido a que sólo una fracción del oxígeno resulta consumida.

Después que una serie de trabajos apareciese en la *Journal of Chemical Education* (Birk 1999, Glantz 1963, Krnel 2001, Peckham 1993), se demostró que la explicación del consumo del oxígeno por el experimento de la vela era errónea. Pero la errónea e ingenua explicación que un vacío parcial se produce a causa del consumo de todo el oxígeno en el aire encerrado continúa siendo diseminada.

Para un ejemplo reciente, buscar el "Lifting Lemon Physics Trick" en el sitio <http://www.einsteinyear.org>. Esta nueva versión del experimento de la vela consiste en una tajada circular de limón con algunos fósforos insertados formando una pirámide con sus cabezas puestas juntas y apuntando hacia arriba. El sistema es puesto a flotar en una superficie de agua, los fósforos son encendidos y el sistema es cubierto usando un frasco. Éste supuestamente es un truco de bar que es simple de hacer y el que la gente es impresionada por el limón que queda levitando mágicamente dentro del frasco. Este truco del limón es una de las actividades mostradas por el instituto de Física como parte de la celebración del año de Einstein en 2005. El instituto de Física en Europa y la Sociedad Americana de Física en los Estados Unidos son las más importantes instituciones con una base mundial de miembros que provee noticias científicas e información a físicos de universidades alrededor del mundo. El año de Einstein fue una celebración mundial de la comunidad física; éste fue una actividad grandiosa, seria y de gran calidad actividad. Pero el truco del limón que levita puso a no científicos a la acción, apareciendo explicado usando al mismo tiempo las correctas y equivocadas explicaciones. Nuestros experimentos claramente muestran que la reacción química no es responsable para el cambio de volumen observado en un típico experimento de la vela o en este truco físico del limón flotante.

Hoy, éstos son casos particulares del uso de explicaciones erróneas en el experimento de la vela que llegan a una gran audiencia que puede no está consciente del estatus actual del experimento de la vela. El truco del limón que levita pertenece a esta clase pero puede

ser usado como argumento que este no fue publicado debido a que fue diseminado por la comunidad física. Para mencionar otro ejemplo que ha sido diseminado por una compañía que provee equipamiento para laboratorio para la enseñanza de la química, buscar por “Dalton’s Law of Partial Pressure” en www.pasco.com. Esta compañía vende una interfase y un sensor de presión incluido en una actividad para medir el oxígeno contenido en el aire, usando la Ley de Dalton y el experimento de la vela. Esto es un montaje experimental moderno que es para eliminar el CO₂ de la atmósfera de gas y está claro que tienen la intención de medir el contenido de oxígeno en el aire como un 21%.

Junto a estos dramáticos ejemplos, muchas publicaciones (ya sea con la correcta o errónea explicación) comparten el error de no usar un sistema estrictamente cerrado y posteriormente reportan resultados experimentales que no pueden ser verificados. Por ejemplo, (Caplan 1994) reconoce la importancia de no dejar que el aire caliente escape en forma de burbujas, pero para resolver este problema, un vaso precipitado parcialmente sumergido es colocado sobre la vela flotante después que ésta ha sido encendida. Este montaje está capturando así el aire caliente y éste es un sistema no cerrado.

Una discusión clásica acerca del experimento de la vela es entregada en el libro de Fowles (Fowles 1960), un libro clásico que incluso hoy es una gran fuente de demostraciones para enseñar química básica. En la página 62 (Experimento 64. “A Candle burn under a Bell-jar” Una vela ardiendo bajo un frasco campana), una versión cerrada del experimento de la vela, se explica y se observa que un ambiente cerrado es mejor para llevar a cabo este experimento que el típico de la demostración. Es también mencionado que el experimento de la vela aparece para mostrar que sólo una pequeña fracción del aire es necesaria para mantener la combustión. A pesar de que muchos trabajos en la literatura a lo largo del siglo XX continúan usando sistemas no cerrados, ayudando así a propagar la errónea explicación para el experimento de la vela.

IV NUESTRO EXPERIMENTO DE VOLUMEN CERRADO UTILIZANDO UNA MECHA ARTIFICIAL

Para ayudar a nuestros estudiantes a entender los orígenes de las explicaciones erróneas de este experimento, hemos grabado nuestros propios experimentos a volumen cerrado, los cuales han sido desplegados en páginas web de material multimedia acompañando este trabajo y pudiendo descargarse desde nuestra página web (<http://laplace.ucv.cl/TrackMovingObjects/Gallery/Candle/>). El lector puede fácilmente visualizar y analizar imágenes de cada experimento, obteniendo valores para tiempo y volumen (Nivel de agua) directamente desde la página web por medio de clicar en un punto de la imagen (Vera 2009).

La figura 3 muestra nuestro montaje para un experimento de la vela a volumen cerrado en que la mecha de la vela ha sido sustituida por un delgado cilindro metálico calentado por medio de corriente eléctrica. Lavoisier usó mercurio para sellar el volumen de aire pero en las simples típicas versiones modernas del experimento éste es reemplazado por un sello de agua. Esto también es posible usando un contenedor rígido para realizar los experimentos de combustión a volumen cerrado (Vitz 2000) y medir cambios en la presión del gas para obtener usando la ley de Dalton el equivalente cambio en el volumen de la presión atmosférica. Según lo mencionado por Vitz (2000), grandes presiones aparecen en el experimento de combustión y algunos cuidados deben ser tomados para mantener el sello perfecto en estos experimentos. Debido a que buscamos grabar un

experimento en que el cambio en el volumen del gas es claramente observado, hemos diseñado un montaje que usa agua como sello para mantener un volumen de gas encerrado para la combustión. Hemos usado un contenedor de acrílico para mantener el sello de agua y un cilindro graduado invertido de 500 [ml] fue posicionado dejando una pequeña apertura entre su extremo sumergido y la parte inferior del recipiente para permitir que el agua fluya. Dos cables eléctricos fueron instalados pasando entre dos agujeros en la parte inferior del contenedor. El aislamiento plástico exterior de los cables fue removido dentro de los agujeros, cuando éstos fueron sellados usando una pistola de silicona caliente. El revestimiento aislante también fue retirado para la porción de cable sobresaliendo por la parte inferior del sello, siendo reemplazado por una delgada capa de nicromo sobre los cables de cobre. Usamos una fuente de poder regulable de 30 [V] para pasar corriente eléctrica a través del cable de nicromo y el voltaje fue ajustado para calentar el filamento hasta que un brillante color rojo fue obtenido. Un soporte fue ajustado a la parte superior de los cables eléctricos para mantener la pequeña vela en su lugar. La mecha de algodón fue reemplazada por un delgado cilindro hueco de acero inoxidable. Que fue obtenido de una aguja de jeringa de 0,5 [mm] de diámetro. Un cilindro de 1 [cm] fue cortado usando una lima para marcar una figura circular para luego ser rota usando alicates. El cilindro fue parcialmente insertado en la vela y fue mantenido en su lugar envolviendo el cable de nicromo alrededor. Para preparar el experimento una manguera es usada para succionar algo de aire y producir que el agua ascienda por dentro del vaso precipitado invertido.

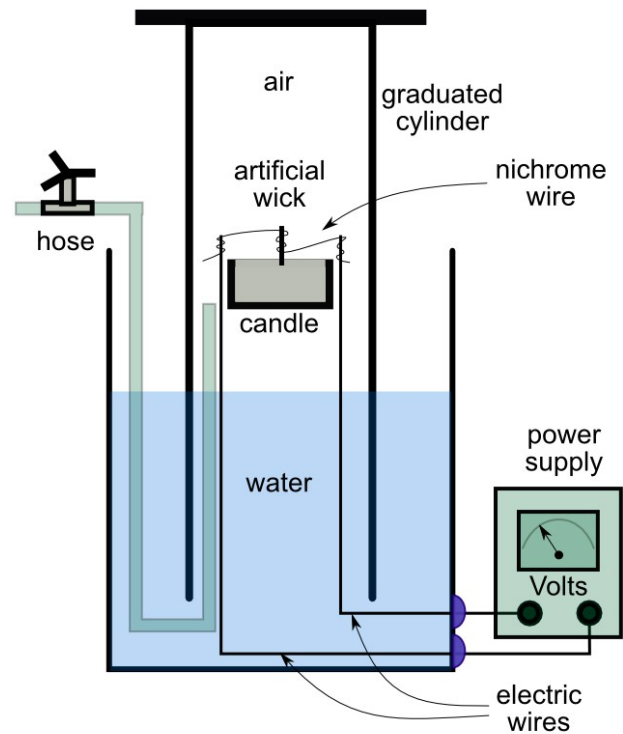


Fig. 3 Montaje experimental usado en nuestros experimentos de mecha artificial a volumen cerrado.

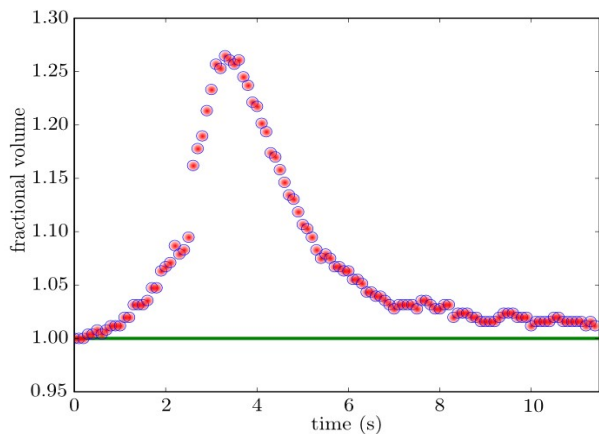


Fig. 4 Gráfico volumen fraccional v/s tiempo para un experimento de vela encerrada.

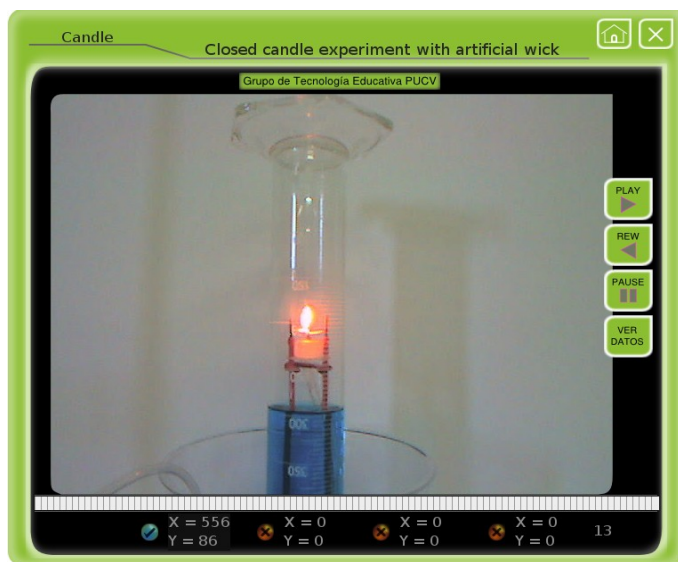


Fig. 5. Experimento de vela insertado en una página web para su visualización y análisis.

La figura 4 muestra un gráfico de volumen en función del tiempo para nuestro experimento, visualizado en una página web en la figura 5. Para mantener el control del proceso de combustión, la mecha de la vela ha sido reemplazada por la mecha artificial mostrada en la figura 6. Después de aplicar el voltaje, el filamento arde calentando la mecha. El fondo de la mecha de metal calentada derrite la cera de la vela, que asciende por dentro del cilindro por acción de las fuerzas de capilaridad. En el extremo superior del cilindro, la cera líquida se quema produciendo una flama. Cuando la corriente eléctrica es detenida, la flama no se mantiene encendida por sí misma debido a que el calor es disipado a través del cableado eléctrico. En este experimento, usamos un cilindro graduado de 500 [ml] y un volumen inicial de aire de 250 [ml]. Durante el proceso de calentamiento, el volumen de aire aumenta; después de apagar el voltaje, la flama se extingue y el volumen del aire disminuye a un volumen final muy

cercano al inicial. Los datos recolectados para este experimento usando el software de la página web⁶ (Vera 2009), nos permitieron obtener los datos mostrados en el gráfico de la figura 4, donde el volumen final es aproximadamente un 1% mayor que el inicial.



Fig. 6. Una vela con mecha metálica artificialmente calentada usando corriente eléctrica.

Es bien sabido que en el experimento de la vela sólo una fracción del oxígeno reacciona antes que la luz de la vela se extinga. Esto fue demostrado en tiempos de Lavoisier colocando un ratón vivo en la atmósfera remanente, después que la combustión había cesado (Un video de este experimento es mencionado por Birk (1999)). En una variación del experimento previo⁷, apagamos la corriente eléctrica en el filamento justo después de que no hubiese signos de flama observable.

El cambio final en el volumen de gas para este experimento fue similar al incremento de 1% sobre el volumen inicial en el experimento previo de combustión parcial. Nosotros tenemos la certeza de que después de la combustión, no quedó oxígeno dentro del volumen encerrado, debido a que en este experimento es posible distinguir una fase inicial de completa combustión, seguida de una fase de combustión incompleta con carbón elemental u hollín que aparece en la parte superior del cilindro y finalmente una fase final en que el calor artificial de la mecha sólo consigue evaporar la cera, dando origen a un vapor blanquecino. La presencia de corrientes convectivas que pasan cerca de la mecha artificial caliente y el hecho de que nuestra mecha artificial puede sostener la combustión por un período largo de tiempo manteniendo la temperatura cerca de la

- 6 Cliqueando en un punto en la imagen (Por ejemplo, a nivel del agua) las coordenadas de este punto son almacenadas por el software de la página web y la próxima imagen es mostrada a continuación, para seguir recolectando datos. Posteriormente cliqueando en el botón “VER DATOS” una nueva ventana es desplegada, mostrando los datos recolectados.
- 7 Cliquear en la página web “movimiento.html” en http://laplace.ucv.cl/TrackMovingObjects/Gallery/Candle/Candle_artificial_wick_total_combustion_1/. Este experimento está grabado a 5 cuadros por segundo.

temperatura de ignición, nos confirma que el oxígeno ha sido consumido.

Nosotros también realizamos otra variación de este experimento donde la corriente eléctrica fue encendida y apagada muchas veces⁸, el tiempo total de este experimento fue mayor que antes. Las distintas fases son claramente visibles y el resultado final para el cambio de volumen fue similar a los resultados para nuestros otros experimentos antes discutidos. En este experimento es fácil observar el movimiento del vapor de cera caliente. La evaporación de la cera observado en esta versión del experimento es similar a lo que sucede en una máquina de Crecimiento Epitaxial por Haces Moleculares (MBE, por sus siglas en inglés), cuando diferentes clases de moléculas se evaporan y dejan su depósito en la muestra. Este vapor blanco no debería ser confundido con el vapor visto después de soplar una vela, debido a que en el último caso, el vapor no tiene la temperatura necesaria para soportar la combustión en presencia de oxígeno y en nuestro experimento el calor provisto por la mecha artificial siempre mantiene la temperatura del vapor cercana a la temperatura de ignición de la cera. Lo discutido por Faraday en su *Chemical History of a Candle* del año 1861 (Faraday 1978, ver Fig. 2, p.15), después de soplar suavemente una vela es posible encender nuevamente la vela, aproximando un fósforo al vapor lejos de la vela. El vapor se enciende y propaga la combustión hasta la mecha de la vela. Recordemos que para la combustión de una pieza de papel en un volumen encerrado el porcentaje de oxígeno que químicamente reacciona con el papel es alrededor del 56% y en nuestro experimento nosotros mantenemos la combustión por sobre 3 veces la cantidad habitual de tiempo de 10 segundos para una combustión en un típico experimento a volumen cerrado de una vela o una pieza de papel, que otorga un sólido argumento a favor de nuestra hipótesis de que no queda oxígeno en el gas encerrado.

V DISCUSIÓN

Además de nuestros experimentos con una mecha artificial, hemos grabado la demostración típica del experimento típico de la vela y el vaso mostrado en la figura 2 donde el aire burbujeando fuera del sistema puede ser visto fácilmente². Debemos recordar además el experimento a volumen cerrado que usa una vela normal encendida poniendo la cabeza de un fósforo cerca de la mecha y enfocar la luz en ella⁹. El volumen final del aire encerrado obtenido en este experimento fue alrededor de un 1% ó 2% mayor que el volumen inicial. Este resultado es consistente con los obtenidos mediante nuestro experimento con una mecha artificial. Sin embargo, la reacción química para la oxidación de la cabeza del fósforo debería ser tomada en cuenta para un análisis cuantitativo de este experimento.

En nuestros experimentos usamos un volumen encerrado de aire para prevenir el burbujeo y desde que usamos una mecha artificial de acero inoxidable, la reacción química sólo involucra oxígeno y la cera de la vela. Preferimos nuestra mecha artificial y la ignición eléctrica de la vela en lugar del método de enfocar la luz debido a que nuestro montaje permite quemar todo el oxígeno en el volumen inicial de

aire. Por ejemplo, usando un rayo de luz enfocada para encender la vela es necesario incluir la cabeza de un fósforo (O fósforo como dijo Lavoisier) cerca de la mecha, entonces el rayo enciende la cabeza del fósforo y la llama resultante enciende la luz de la vela. Un rayo de luz enfocado desde el sol o una lámpara de alta intensidad puede encender con fuerza la cabeza del fósforo dentro del contenedor de vidrio sin encender (Usando lentes normales) directamente la vela o sostener la reacción química. Esto es muy diferente a nuestra mecha artificial, donde el calor producido usando una corriente eléctrica externa puede encender la vela y sostener la reacción química en la presencia de cantidades muy bajas de oxígeno o simplemente provocar la emisión de un vapor caliente de la cera blanca de la vela. Este vapor blanco caliente está cercano a la temperatura de ignición y puede sostener una reacción incompleta que produce monóxido de carbono y hollín como fue mostrado en nuestros experimentos. La alta temperatura del vapor es suficiente para iniciar la combustión y la combustión observada del gas dentro del volumen encerrado asegura que todo el oxígeno que se aproxima a la sección inicial de la nube de vapor de cera puede eventualmente reaccionar.

En resumen, después de todos nuestros experimentos sistemáticos, podemos concluir que el cambio en el volumen en la típica demostración del experimento de la vela puede ser explicado por el burbujeo y el encierro de aire caliente, el mismo principio detrás de la ventosaterapia, en la medicina tradicional. Nuestros resultados confirman los resultados de Lavoisier para una combustión incompleta y muestran que tanto para una combustión completa como para una parcial menor al 21% del volumen inicial de aire, correspondiente a oxígeno, el volumen final del gas es muy similar al inicial. Es además claro desde nuestros experimentos que cuando la atmósfera es pobre en oxígeno, se produce hollín (C, Carbono puro), acompañado de monóxido de carbono (CO). Estos dos tipos de moléculas deberían ser incorporados en la reacción química para una explicación correcta de este experimento.

Nuestras versiones modernas de los experimentos de Lavoisier fueron diseñadas para ayudar a nuestros estudiantes de ciencias para entender algo de los principios básicos de la Química mediante el uso de material multimedia para medir directamente algunas variables físicas. Adicionalmente, ellos pueden aprender lo básico acerca de combustión y reacciones químicas usando nuestro particular set de experimentos como modelo para construir sus propias versiones de estos simples experimentos. Entendiendo las razones por las que el volumen final es similar al volumen inicial, independientemente de la completa o incompleta combustión del oxígeno, es una tarea compleja más allá del nivel de un curso introductoria y debería ser estudiada usando cromatografía de gases (Vitz 2000, MacNeil 2003) u otra técnica avanzada como espectroscopia láser (Wulfrum 2001). Dentro de los errores experimentales para nuestro sencillo montaje, nuestros resultados son consistentes con los experimentos de Lavoisier para volúmenes encerrados y con otros experimentos a volumen cerrado reportados. Estos resultados también coinciden con los resultados de Vitz para la incineración de una pieza de papel en una cámara de combustión cerrada donde el cambio nulo en la presión es reportado y un 56% del oxígeno es consumido, siendo medido usando un GC. Las explicaciones erróneas para el experimento de la vela sólo aparecen cuando se intenta explicar los resultados del experimento de la vela usando un montaje sin un sistema estrictamente cerrado.

8 Clickar en la página web “movimiento.html”, en http://laplace.ucv.cl/TrackMovingObjects/Gallery/Candle/Candle_artificial_wick_total_combustion_2/. Este experimento está grabado a 5 cuadros por segundo.

9 Click on the movimiento.html web page in http://laplace.ucv.cl/TrackMovingObjects/Gallery/Candle/Candle_closed_volume_focused_light/

AGRADECIMIENTOS

Nos complacemos en agradecer el aporte financiero del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto FONDEF TE10I012), Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto FONDECYT 1110713) y de la Dirección General de Investigación y Postgrado de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. También nos gustaría agradecer los usuales comentarios hechos por seis revisores, que hicieron posible mejorar en gran medida el manuscrito.

REFERENCIAS

- Benedict, F. G. (2010) *The Composition of the Atmosphere with Special Reference to Its Oxygen Content*. Nabu Press. Ver también <http://www.archive.org/details/compositionofatm00benerich>, consultado el 30 de Julio de 2010.
- Birk J.P., Lawson A.E. (1999) The Persistence of the Candle-and-Cylinder Misconception. *J. Chem. Educ.* 76 (9), 914-916.
- Browne C.A. (1927) Three Centuries of Chemistry. *Science*, 65 (1682, 25 de Marzo de 1927) 303-304.
- Caplan J.B., Gerritsen H.J., LeDell J.S. (1994) The hidden complexities of a "simple" experiment. *Phys. Teach.* 32 (5) 310-314.
- Faraday M. (1978) *The Chemical History of a Candle*. Atlanta, Georgia: Cherokee Pub. Co.
- Fowles G. (1960) *Lecture experiments in chemistry*. New York: Basic Books.
- Glantz J. (1963) Demonstration notes: Oxygen in air. *J. Chem. Educ.*, 40, A477
- Gordon J., Chancey K (2005) The Determination of the Percent of Oxygen in Air Using a Gas Pressure Sensor. *J. Chem. Educ.* 82 (2) 286-287.
- Jastrow J. (Ed.) (1936) *The story of human error*. London: D. Appleton-Century Company. (Una revisión está disponible en <http://books.google.cl/books?id=tRUQ45YfCHwC>, consultado el 30 de Julio de 2010)
- JCE staff (2001) Just Breathe: The Oxygen Content of Air. *J. Chem. Educ.*, 78, 512A.
- [Knowles W. E. \(1966\) A History of the Thermometer and its Use in Meteorology. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins Press, p. 8. \(Traducido desde "Le opere di Galileo Galilei", vol XVII, p. 377. Ver también: "El proyecto Galileo" \(The Galileo Project\), http://galileo.rice.edu/sci/instruments/thermometer.html\)](http://www.galileo.rice.edu/sci/instruments/thermometer.html)
- [Krnel D., Glžar S. \(2001\) Experiment with a Candle without a Candle. J. Chem. Educ. 78 \(7\) 914.](http://www.galileo.rice.edu/sci/instruments/thermometer.html)
- Lavoisier, A. (1777) Mémoire sur la combustion des chandelles dans l'air atmosphérique, et dans l'air éminemment respirable. *Mémoires de l'Académie des sciences*, année 1777, 195. Disponible en Internet en <http://www.lavoisier.cnrs.fr/memoires2.html>, consultado el 30 de Julio de 2010.
- Lavoisier, A. (1789) *Traité élémentaire de chimie*. Paris: Cuchet. Disponible en Internet en <http://www.lavoisier.cnrs.fr/livres.html>, consultado el 29 de Diciembre de 2010.
- MacNeil J., Volaric L. (2003) Incomplete Combustion with Candle Flames: A Guided-Inquiry Experiment in the First-Year Chemistry Lab. *J. Chem. Educ.* 80 (3), 302-304.
- New Scientist (1998) The last word, *New Scientist* (2136, May 30 1998) 105.
- Peckham G. D. (1993) A new use for the candle and tumbler myth. *J. Chem. Educ.* 70 (12), 1008-1009.
- Russo L. (2004) *The forgotten revolution: how science was born in 300 BC and why it had to be reborn*. Berlin: Springer.
- Vera F., Romanque C. (2009) Another Way of Tracking Moving Objects Using Short Video Clips. *Phys. Teach.* 47 (6) 370-373.
- Vitz E. (2000) Paradoxes, Puzzles, and Pitfalls of Incomplete Combustion Demonstrations, *J. Chem. Educ.* 77 (8) 1011-1013.
- Woodcroft B. (Translator) (1851) *The Pneumatics of Hero of Alexandria*. London: Taylor Walton and Maberly. Disponible en Internet en <http://www.history.rochester.edu/steam/hero/>, consultado el 30 de Julio de 2010.
- Wolfrum J. (2001) Introductory Lecture: Advanced laser spectroscopy in combustion chemistry: From elementary steps to practical devices. *Faraday Discuss.* 119 (1) 1-26.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Fig. 1. Termoscopio de Galileo (a la izquierda), experimento de la vela de Filón de Bizancio (A la derecha)

Fig. 2. Típico montaje para el experimento de la vela y el vaso.

Fig. 3. Montaje experimental usado en nuestros experimentos a volumen cerrado con mecha artificial.

Fig. 4. Gráfico de Volumen fraccional en función del tiempo para un experimento de vela encerrada.

Fig. 5. Experimento de la vela inserto en una página web para su visualización y análisis.

Fig. 6. Una vela con mecha metálica artificial calentada mediante el uso de corriente eléctrica.