

Compleja historia de la formulación de la Ley de Boyle.

Luis Miralles Conesa
Universidad de Valencia

Resumen:

Los historiadores de la ciencia, analizando los propios documentos de Boyle, han puesto de manifiesto como precedentes los trabajos de otros científicos, entre ellos: Evangelista Torricelli, Edmé Mariotte, Blaise Pascal, Henry Power, Richard Townley y Wiliam Croone-lli, que contribuyeron, e incluso predijeron, la formulación de la conocida ley de Boyle. Sin embargo, ninguno de ellos fue capaz de anticiparse a la publicación de la misma, menos aún con la precisión, meticulosidad experimental, detalle y exactitud que la conseguida por Boyle, quien adquirió desde entonces merecido prestigio como investigador científico y experimentador, constituyéndose en el más reputado “pneumático” de su época. Discípulo de Francis Bacon, aplicó con fidelidad la metodología inductiva de este filósofo. Por otra parte, los experimentos descritos por Boyle en sus obras encierran un elevado valor didáctico en cuanto a la formulación del conocimiento científico.

Palabras clave: historia de la ciencia, mecánica, filosofía mecánica-corpúscular, neu-mática y ley de Boyle.

Abstract:

While analyzing Boyle’s papers, science historians have found important preceding contributions made by other author: The works by Evangelista Torricelli, Edmé Mariotte, Blaise Pascal, Henry Power, Richard Townley, and Wiliam Croonelli contributed to, and even predicted, the physical formula known as Boyle’s Law. However, none of them were able, neither to anticipate Boyle’s publication, nor to achieve his experimental tidiness, accuracy and detail. Since then, he became a highly recognized researcher and was the most prestigious “pneumatic” in that time. As a disciple of Francis Bacon, he faithfully applied the principles of the inductive method. On the other hand, the experiments described in Boyle’s works have an elevated didactic value for the formulation of the scientific knowledge.

Key Words: Science History, Mechanics, philosophy mechanics-corpúscular, pneumatics and ley of Boyle.

(Fecha de recepción: julio, 2003, y de aceptación: septiembre, 2003).

Introducción

En un planteamiento inicial debemos considerar cinco cuestiones presentes en la Física Neumática de la primera mitad del siglo XVII:

1. El contenido científico filosófico del experimento de Torricelli.
2. La existencia del vacío.
3. La variación de la presión con la altura.
4. La reivindicación de la teoría corpuscular.
5. La formulación de la ley de Boyle.

La realidad es que, históricamente, no se pueden desligar unas de otras y desde un principio, quedan todas conectadas entre sí.

Francis Bacon (1561-1626), propugnaba que el método para llegar al conocimiento de la naturaleza, debe ser esencialmente inductivo: reunir material, hacer experiencias y deducir resultados. Su mérito consistió en enseñar y rehabilitar al científico de laboratorio, considerado, hasta entonces, más bien como un artesano. Boyle, que formuló una de las leyes más importantes de la Física, se consideró asimismo un “baconiano” completo. Boyle junto con su ayudante Hooke, son considerados como los dos experimentadores más importantes del siglo XVII.

La cuestión del vacío hasta el siglo XVII era de orden filosófico y no se había abordado de forma experimental. Hacia la primera mitad del siglo XVII Galileo consideraba que no era imposible. Produjo el primer vacío artificial del que se tiene noticia, sacando un

pistón de un cilindro cerrado y atribuyó la resistencia que encontró a la “fuerza del vuoto”, la fuerza del vacío. Además, se tenía conocimiento de que mediante bombas de succión una columna de agua subía poco más de 10 metros, hecho que conocían los mineros y perforadores. Pretendió explicarlo no porque la naturaleza tuviera “horror vacuo”, sino porque la fuerza de esta columna era el límite de la “fuerza del vuoto” (el vacío se manifestaba como una fuerza).

En 1644, Evangelista Torricelli (1608-1647) realizaba el denominado “experimento italiano”. En él la columna de mercurio, sustituía a la de agua de Galileo, y alcanzaba una altura de 76 cm. El espacio que quedaba encima del mercurio estaba vacío, este existe y la naturaleza no le tiene horror. La columna del mercurio sube para compensar el peso del aire de la atmósfera que le circunda. Continuó sus experimentos utilizando líquidos de distinta densidad, contraponiendo siempre al mismo peso de aire columnas de líquidos diferentes.

Torricelli se dirige por carta, el 11 de Junio de 1644 a Michelangelo Ricci (1619-1682) y le escribe “Ya os hice saber que estaba ocupado en un experimento físico sobre el vacío, no por el mero hecho de producirlo, sino por construir un instrumento que pudiera mostrar los cambios en el aire, que a veces es pesado y espeso y otras más liviano y sutil”

Continuaba Torricelli: “[...] Muchos han dicho que el vacío no existe. Otros que existe a pesar de la repugnancia de

la naturaleza por él, aunque con dificultad; no sé de ninguno que haya dicho que existe sin dificultad y sin resistencia de la naturaleza [...] y así haciendo algunos cálculos fáciles, encontré que la causa asignada por mí (esto es, el peso de la atmósfera) debe por sí sola ofrecer una resistencia más grande que la que ofrece cuando tratamos de producir el vacío [...].

R. Descartes (1596-1650) (Renatus Cartesius, nombre latinizado que él utilizaba frecuentemente) y otros filósofos de estas épocas, mantenían la imposibilidad del vacío, Postulaba la existencia del “plenum”, “una materia imperceptible, inaudita y desconocida para todos los sentidos, capaz de llenar el espacio en apariencia vacío”. Afirmaba que la existencia de esta hipotética materia no es incompatible con el peso del aire.

Las noticias del “experimento italiano” llegaron pronto a Francia. Se formulaba una nueva hipótesis, ¿qué sucedería si se cambiara el peso del aire?. ¿Cómo? Colocando el barómetro a diferentes alturas.

En 1647 Blaise Pascal (1623-1662) publicó un opúsculo que tituló *Nuevos experimentos sobre el vacío*, cuyo único objetivo era demostrar su existencia. “Parece ser que, en septiembre 1647, Pascal se entrevistó con Descartes, quien le había sugerido la idea de realizar la experiencia a diferentes alturas.

Pascal, con una salud muy merma-da, solicita a su cuñado, señor Florin Pèrier, que vivía cerca del Puy-Dome, de 1460 metros de altura, próximo a la ciudad de Clermont: que realice la expe-

riencia.: “[...]. Trato ahora de examinar [...] así como buscar experimentos que permitan apreciar si los efectos que se atribuyen al horror al vacío han de atribuirse realmente a este o si por el contrario deberían serlo al peso y presión del aire [...] es preciso escoger una montaña que esté además cerca de una gran ciudad en la que se pueda hallar una persona capaz de garantizar la necesaria exactitud de la prueba [...] la ciudad de Clermont está situada al pie una montaña como es la de Puy-de-Dome”, continuaba: “[...] solicito y espero de vuestra bondad que tengáis la amabilidad de realizar vos mismo este experimento; [...]”.

La contestación tenía lugar en carta de fecha, 22 de septiembre de 1648. El experimento diseñado por Pascal había sido realizado tres días antes.

“Por fin he hecho el experimento que durante tiempo habéis deseado [...]. Así pues, [...] resulta que una elevación de unas 7 toesas arroja una diferencia de media línea en la altura del mercurio.

Unas 27 toesas: 2 líneas y media.

Unas 150 toesas: 15 líneas y media, que equivalen a una pulgada y 3 líneas y media.

Y unas 500 toesas: 37 líneas y media, que equivalen a 3 pulgas y una línea y media.(A. Elena, 1984).

(1 toesa = 1,949 m. = 6 pies; 1 pulgada (francesa) = 2,7 cm.; 1 línea = 2,2588 mm.).

Pascal declaraba que el relato de Pèrier le ha disipado todas sus dudas El experimento fue repetido en la torre

de Saint Jaques, confirmándose los resultados de Puy-de-Dome.

Edmé Mariotte (1620-1684), clérigo francés, vivió 64 años, los mismos que Boyle. Ambos son considerados, en sus respectivos países, como los primeros filósofos experimentales. Pertenecieron a dos entidades científicas del máximo prestigio: Boyle a la Real Sociedad de Londres y Mariotte a la Academia de las Ciencias de París. Mariotte en su *Discurso sobre la naturaleza del aire*, enunció la misma ley que Boyle, pero quince años después. Su formulación era más clara y tuvo una difusión más rápida. Observó que el aire al expandirse se enfriaba y al comprimirse se calentaba. La relación inversa entre la presión a la que estaba sometido un gas confinado y el volumen que ocupaba sólo, se cumplía si la temperatura permanecía constante. Además, creía en la existencia de otro límite. imposibilidad de lograr la rarefacción de un gas por debajo de la 1/4000 partes de la concentración normal. Posteriormente se demostró la inexactitud de este límite y que la ley sólo era aplicable a gases ideales y a temperatura constante.

Henry Power (1623-1668) y Richard Townley (1628-1707), habían comenzado a experimentar sobre la elasticidad del aire en 1653.

Un notable avance en los estudios de la presión atmosférica se debió a Otto de Guericke (1602-1686), alcalde de la ciudad de Magdeburgo e ingeniero de profesión, quien preocupado por las discusiones controvertidas que había en su época sobre la existencia del vacío,

construyó la primera máquina capaz de conseguirlo.

A partir de 1660, Robert Boyle (1627-1691) dispuso de este nuevo instrumento que había perfeccionado su ayudante Robert Hooke (1635-1702) al sustituir la palanca que llevaba la máquina de Guericke por una cremallera que se movía en ambos sentidos mediante una rueda dentada. Este artilugio les permitió disponer, dentro de un recinto cerrado, de diferentes presiones, realizando y publicando una serie de trabajos experimentales relacionadas con la neumática.

Hooke, trabajó desde 1658 a 1662 con Boyle, por entonces ya acreditado investigador. A partir de 1662 Boyle no realizó trabajos específicos relacionados con ninguna ley funcional, mientras que Hooke, dedicado al estudio de la acción de los muelles, publicaba años después, en 1678, la ley que se conocía con su nombre.

Por otra parte, los numerosos trabajos posteriores que se conocen de Boyle tanto de Física como de Química y la Filosofía Mecánica, le confirman como el más fidedigno discípulo de Francis Bacon y el más estricto cumplidor de la metodología inductiva. Todos los trabajos de Boyle se caracterizaban por estar realizados con mucha minuciosidad hasta el extremo de que resultaban fáciles de repetir por otra persona, debido a la detallada información. Particularmente, resultan muy recomendables los traducidos por Solis, C. (1985) y citados en este trabajo.

Los libros de Boyle.

Las obras completas de Boyle fueron publicadas en varias ocasiones. Por primera vez, Shaw la realizó, en forma abreviada, en 1738. En Ginebra se editó otra en 1676. En Venecia su *Opera Omnia* se publicaba en 1696, y después lo hicieron Dird y Birch en 1744 y 1772 y otra también en 1772 elaborada por Shaw-. En la Biblioteca del Seminario Conciliar de Segorbe (Castellón) se encuentran, perfectamente conservadas y encuadernadas, en cuatro volúmenes, 27 de sus obras. Editadas entre 1677 y 1696, son pues reediciones, algunas de ellas realizadas después de su fallecimiento, hecho que acaeció en 1691.



En uno de estos volúmenes encontramos: *Opera varia* [...], donde están seis de sus trabajos más importantes, tres de ellos dedicados a la Neumática. Los cuatro volúmenes, citados anteriormente, suman un total de 3700 páginas, de ellas sólo unas treinta (1%) están relacionadas con la compresión y dilatación del aire, que conducían a la formulación de la ley de Boyle, y que harían a su autor, mundialmente conocido. Todas ellas están redactadas en latín, como lógicamente corresponde, por ser escritos del siglo XVII.

Sus trascendentales trabajos sobre neumática, se realizaron fundamentalmente en Oxford, donde residió desde 1654 hasta 1668, año en que se trasladó a Londres.

De las varias versiones que existen de sus obras completas en inglés, citamos: *The Works, of the Honourable Robert Boyle*, que consta de 6 volúmenes. Algunas de estas han sido traducidos al castellano por Solís Santos, en la publicación *Robert Boyle: Física, Química y Filosofía Mecánica*, (Alianza, 1985), Los trabajos seleccionados en este libro, con excelente traducción e introducción, notas a pie de página, complementarias y aclaratorias, corresponden a una acertada particular clasificación temática: Neumática, Química corpuscular y Filosofía mecánico-corpuscular. Si bien, quizás deberían incluirse algunas otras obras de Boyle, en un apartado temático sobre estudios de teología, en los que también destacó.

La ley de Boyle se había sido formulado en base a dos trabajos, cuya traducción realizó Solis (1985) y que están redactados dentro de la parte Pneumática del citado libro El primero es el **Experimento XVII**, de: *Nuevos Experimentos físico-mecánicos relativos al resorte del aire y sus efectos, realizados en su mayor parte en una nueva máquina pneumática, escrita bajo forma de carta al recto honorable Carlos Lord Vizconde de Durngarvan, hijo primogénito del Conde de Corke, por el Honorable Robert Boyle*, Oxford, 1660, El segundo, **Dos nuevos experimentos relativos a la medida de la fuerza del resorte de aire comprimido y dilatado**, publicados en un apéndice en *Nuevos experimentos físico-mecánicos, relativos al aire. Segunda edición. Donde se hace una defensa de los autores de los experimentos contra las objeciones de Franciscus Linus y Tomas Hobbes*, Oxford, 1662.

Como la compresibilidad y expansibilidad del aire, tenía cierta similitud con la de los muelles, que estudiaba Hooke, Boyle relacionaba tal comportamiento como “muelle de aire”. o “resorte de aire”.

Experimento XVII

La novedad del Experimento XVII fue la utilización de la máquina neumática, que permitía variar manualmente la presión en el interior de la campana. En este nuevo planteamiento, no era la atmósfera libre el agente que hacía subir o bajar la columna de mercurio

sino el aire que quedaba encerrado dentro de la campana donde se efectuaba el vacío.

La descripción que hace Boyle en este trabajo, sus datos y detalles dejan fuera de toda duda su categoría de experimentador. Algunos de los allí expuestos (incluidas manipulaciones) quedan resumidos a continuación:

Utilizaba un tubo de casi tres pies de longitud (91,5 cm), cerrado herméticamente por un extremo, por el otro agregaba el mercurio. Para superar las dificultades que encerraban las burbujas de aire aprisionadas dentro del mercurio, golpeaba y sacudía el tubo por su parte exterior. Los bordes del extremo abierto del tubo estaban lo más lisos posibles, con todas las partes dobladas hacia dentro y su diámetro no superaba un cuarto de pulgada (0,63 cm), para poder taparse lo más exactamente con el dedo del experimentador; siendo preciso llenar el tubo con mercurio de tal forma que sobresalga un poco, aún a riesgo de derramar algo, para evitar la formación de una burbuja con aire externo. Era aún más detallista. Aconsejaba no llenar, al principio, el tubo totalmente de mercurio, dejándolo vacío por la parte superior como un cuarto de pulgada. Se taponaba con el dedo el extremo abierto del tubo y se invertía, este cuarto de pulgada de aire, ascendía como una gran burbuja a la parte superior y de pasada recogía todas las pequeñas burbujas uniéndolas consigo en una grande. De este modo, invirtiendo de nuevo el tubo, se dejaba que dicha burbuja vuelva otra vez al extremo abierto, con

lo que se tenía un cilindro de mercurio mucho más denso que antes, precisándose agregar una pequeña cantidad de mercurio para llenar totalmente el tubo. Introducía el tubo de mercurio en una caja que contenía también el metal líquido, dejaba que éste descendiese, colocaba una tira de pape, previamente graduada en pulgadas, al nivel de la superficie superior. Dejaba mediante cuerdas, todo ello dentro de la campana. El espacio que quedaba entre la parte que sobresalía del tubo y los límites del orificio de entrada a la campana y los de la tapadera se cerraban con diaquilón (un ungüento empleado en medicina). Tras dicho sellado no aparecía cambio alguno en la altura del cilindro de mercurio, tal como si el recipiente de vidrio interpuesto no interrumpiese la presión inmediata de la atmósfera.

Estando así dispuesto todo el artificio, hacía descender el émbolo. Tras la salida de una cilindrada de aire, se observaba, como se esperaba, una bajada de la columna de mercurio. Hicieron una segunda embolada con nueva bajada del líquido metal. Prosiguieron hasta un cuarto de hora, con la imposibilidad de que el mercurio del tubo descendiese del todo, debido a la cantidad de aire que, aunque exigua, irrumpía del exterior. Dejaban penetrar algo de aire, el mercurio comenzaba ascender por el tubo. En el momento de cerrar la llave de entrada del aire, el ascenso se paralizaba. Abriendo y cerrando la llave, impulsaban la columna de mercurio y anotaban sus ascensos. Finalmente dando vía libre a la llave que regulaba

la entrada de aire, el mercurio del tubo ascendía hasta casi la altura primitiva. “Digo (Boyle) casi porque se detuvo cerca de un cuarto de pulgada (6,3 mm) por debajo de la marca de papel arriba mencionada; cosa que atribuimos a esto, a que había (como es usual en este experimento) algunas pequeñas partículas de aire atrapadas entre el mercurio, las cuales partículas, con el descenso del mercurio, ascendían visiblemente en forma de burbujas hasta la parte superior del tubo [...]”

Al principio sospechaban que al bombear el aire y el recipiente se hallaba casi vacío, algunas partes del aire podían penetrar dentro de él a través del sellado, forzadas por la mayor presión del aire exterior.

Resultaban curiosas otras advertencias que hacía Boyle. Detectaban que por la presión del aire atmosférico se mantenía casi siempre alrededor de unos 75 cm. Considerando poco probable que las diferencias observadas entre las determinaciones que se hacían en Inglaterra y otros países, principalmente Francia e Italia, fuesen debidas a diferencias climáticas, decidía abordar la cuestión. El resultado fue muy sencillo: “las pulgadas que usan los comerciantes y matemáticos ingleses son un tanto inferiores a las utilizadas en otras regiones extranjeras “. (Las pulgadas francesas eran de 2,7 cm., las inglesas de 2,54 cm.)

Otra observación hacía referencia de las burbujas que irrumpían a la parte superior del tubo de mercurio cuando este se invertía. Advierte que: “[...]”

cuando se aplican cuerpos calientes a la parte vacía del tubo, el mercurio subyacente desciende un poco más abajo, es algo que no determinaremos si bien parece muy probable, especialmente dado que hallamos que tras la aplicación de paños de lienzos empapados en agua a esa misma parte del tubo, el mercurio ascendía, como si el frío hubiese condensado el aire aprisionado”.

No abordaba el problema de la influencia de la temperatura del aire en la experiencia que realizaba. Se inclinaba por aceptar que la disminución de la altura del mercurio se debía a la presencia de alguna cantidad de aire que se habría retirado a la parte superior del mercurio.

También se conocía el volumen de la campana utilizada, no llegaba a un cuarto (1,136 l), y el aire que contenía estaba a la presión atmosférica ya que el mercurio del tubo conservaba su altura. La variación de presión se obtenía restando de la altura de mercurio inicial la que queda después de la primera succión. Si el experimento se repitiera utilizando campanas de diversos tamaños, comparando entre sí los diversos descensos del mercurio, **“no es improbable que pudiesen descubrirse así algunas de esas cosas que buscamos”**; afirmaba Boyle, siendo aquí donde manifiestan sus sospechas de alguna posible relación presión volumen.

Escribía Boyle: (se refiere al Vizconde de Dungarvan, según consta en el título de la obra): “[...] no considero impropio comunicar a su Señoría

que, por medio del descenso del mercurio en el tubo tras la primera succión, esperaba obtener la siguiente ventaja, cual es poder hacer una estimación mejor que la hasta ahora conseguida, **de proporción de la fuerza entre la presión del aire... y la gravedad del mercurio**, pues en nuestros experimentos están dadas varias cosas que se pueden aprovechar [...] (implícitamente se está refiriendo a la posible relación entre la presión del aire y el volumen)”. Más adelante, continúa: “[...] Debido a éstas (digo) y algunas otras dificultades que exigen más habilidad, así como mucho más tiempo del que mis presentes circunstancias me permitirían disponer, **desearía transferir la más sutil consideración del problema a algunos de nuestros doctos y exactos matemáticos**, considerando haber dado la pista ya sugerida”

Boyle adelantaba la necesidad de más experiencias, razonando que: “[...] desvelando algunas cosas relativas al aire de la atmósfera que hasta ahora rara vez se han tomado en cuenta, podrá daros algunas pistas conducentes a ulteriores descubrimientos del tema de esta epístola”.

Deducía que el experimento XVII, confirmaba que: 1º) la subida de mercurio en el tubo es consecuencia del peso del aire circundante que compensa la columna de mercurio; 2º) cambiando el peso de la columna de aire, bien sea con la máquina neumática o subiéndola en altura dentro de la atmósfera externa, se modificaba la altura de la columna de mercurio, y 3º) que es posible encon-

trar una relación entre la resistencia del resorte del aire y la densidad del aire. No entra en discutir el problema del vacío y solamente insinúa una posible relación entre el volumen de aire confinado con las variaciones la temperatura.

La ley de Boyle quedará formulada en el trabajo que sigue.

Dos nuevos experimentos relativos a la medida de la fuerza del resorte del aire comprimido y dilatado

Los experimentos realizados por Boyle con la nueva máquina neumática, publicados en 1660, fueron criticados y puestos en duda por científicos y filósofos de aquella época.

Francis Linus (Francisco Line) (1595-1675) jesuita, científico inglés, profesor de matemáticas y Thomas Hobbes, (1588-1679) filósofo político y moral, en sendas publicaciones suyas de 1661 criticaban los Nuevos Experimentos físico-mecánicos relativos a la elasticidad del aire, de 1660,

Los comentarios que Linus hacía en su obra *Tratado de la inseparabilidad de los cuerpos* (Londres, 1661) resultaban muy peregrinos. Contemplaba la presencia de una cuerda invisible que llamaba **funiculus** (del latín, cuerda pequeña) que tira de la columna de mercurio del experimento de Torricelli, cuando el aire se comprime o impide que este caiga cuando se expansiona. Negaba así que tuviera nada que ver

la elevación del metal líquido con la presión de la atmósfera. El **funiculus**, decía, se pone de manifiesto. por ejemplo, al poner la yema de un dedo en el extremo de un tubo, y extraer el aire con una bomba neumática por el otro extremo.. Escribía Holton (1993): “La teoría del **funiculus** parecía una idea fantástica que ningún científico tomaría hoy en serio. Pero este tipo de explicación pseudomecánica era muy popular en los primeros tiempos de la ciencia moderna”.

T. Hobbes, prestigioso pensador inglés, que durante su juventud fue secretario de F. Bacon, participó de las preocupaciones de éste y fue considerado como filósofo experimentalista precartesiano. Aplicó a los objetos humanos el método naturalista de la física moderna. En su escrito *Diallogos físicos sobre la naturaleza del aire*, publicado en 1661, hace una impulsiva crítica a la existencia del vacío.

Escribía Boyle: “[...] puesto que nos niega (F. Linus) que el aire tenga cierto peso y resorte, [...], habremos de esforzarnos ahora por poner de manifiesto mediante experimentos hechos expresamente al efecto...”

En 1662, Boyle escribía: *Nuevos experimentos físico-mecánicos relativos al aire, Segunda edición. Donde se hace una explicación de los autores contra las objeciones de Franciscus Linus, y, Thomas Hobbes*: En su apéndice se incluían los experimentos que describimos a continuación.

Primer experimento realizado por Boyle relativo a la compresión.

Con un tubo de vidrio doblado en U, que denominaba sifón, encontró Boyle el dispositivo adecuado para medir directamente la presión del aire y el volumen (densidad) mediante la altura de los cilindros de mercurio y aire, respectivamente, llegando a establecer la denominada, inicialmente, 1ª ley de Boyle.

El tubo de vidrio doblado en U tenía el extremo de su brazo más corto sellado herméticamente. La longitud, de éste se dividía en pulgadas, cada una de las cuales se subdividía en ocho partes iguales. Echaban mercurio para llenar la parte curva del tubo, y que quedase en el otro brazo a la misma altura. Así, se lograba que el aire del tubo corto estuviese a la presión de la atmósfera. Por el largo agregaban mercurio, cuyo peso comprimía gradualmente el aire confinado. Procedían de esta manera hasta que el volumen de aire del brazo corto se reducía a su mitad. El brazo largo del tubo también llevaba adherido una tira de papel dividida en pulgadas y cada una de ellas subdividida en ocho partes. Escribía. Boyle: “[...] observando no sin satisfacción que el mercurio de esta parte más larga del tubo se hallaba 29 pulgadas más alto que en la otra”. El volumen de aire de la rama corta se reducía a la mitad, lo que equivalía a doblar su densidad, al soportar, dos veces las 29 pulgadas, una la de la atmósfera libre y otra la que correspon-

día a la columna de mercurio alcanzada en la rama larga.

Boyle consciente de la importancia de estas conclusiones decidió, realizar otros ensayos, tomando cuidadosas notas sobre el volumen comprimido y las respectivas lecturas de la columna de mercurio. Los datos recogidos suministraron la tabla siguiente (Tabla 1)

LECTURAS

A, Volumen 1- (Experiencia 1). Compresión desde 48 hasta 12 (unidades).

A. Volumen 2. (Experiencia 2). Compresión desde 12 hasta 3 (unidades).

B. Medida de la presión experimental, altura de mercurio.

C. Presión atmosférica.

D. Suma de la presión experimental y la atmosférica, presión total experimental.

E. Presión total teórica.

F. (PV). Producto de los valores de la columna A (volumen 2) multiplicado por los valores de la columna D (presión total experimental).

ADVERTENCIAS

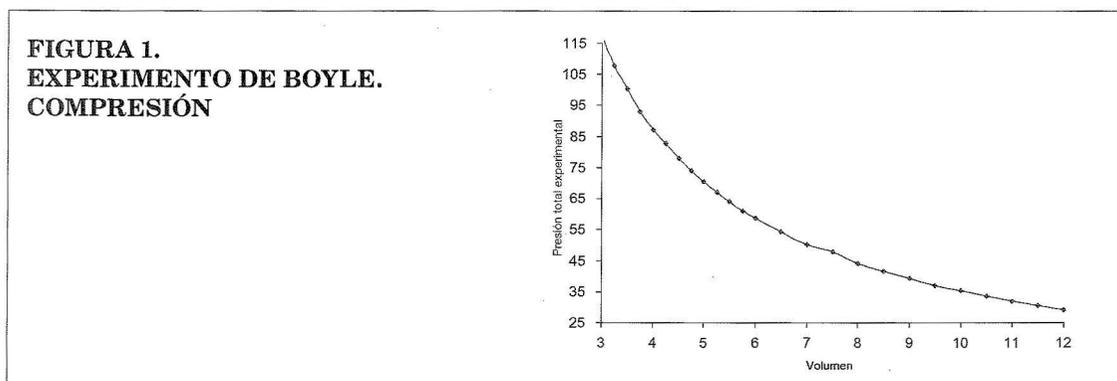
Boyle utilizaba escalas en pulgadas, subdividida en 1/8. Las columnas A, B, C, D, y E, contienen los datos y resultados originales de Boyle. La columna F es agregada en este trabajo. En la tabla original utilizaba, como veremos en otra posterior, números fraccionarios, que se han transformado en decimales. Ejemplo: al valor 41,56 de la columna B, corresponde a 41 9/16, en la notación original. Los valores reflejados en la columna F han sido agregados, para observar la constancia del producto PV, a cuyos valores nos referimos en epílogo.

TABLA I. DATOS ORIGINALES DEL EXPERIMENTO DE BOYLE SOBRE LA COMPRESIÓN DEL AIRE.

A	A	B	C	D	E	F
Volumen 1	Volumen 2	Presión Exp.	Presión atm.	Presión total exp.	Presión total teor.	(PV)exp.
48	12.00	0.00	29.13	29.13	29.13	349.50
46	11.50	1.44	"	30.56	30.38	351.46
44	11.00	2.75	"	31.88	31.75	350.63
42	10.50	4.38	"	33.50	33.14	351.75
40	10.00	6.19	"	35.31	35.00	351.31
38	9.50	7.88	"	37.00	36.79	351.50
36	9.00	10.13	"	39.25	38.88	353.25
34	8.50	12.50	"	41.63	41.47	353.81
32	8.00	15.06	"	44.19	43.69	353.50
30	7.50	17.94	"	47.86	46.60	352.18
28	7.00	21.19	"	50.31	50.00	349.18
26	6.50	25.19	"	54.31	53.77	353.03
24	6.00	29.69	"	58.81	58.25	352.87
23	5.75	32.06	"	61.19	60.78	351.63
22	5.50	34.94	"	64.06	63.50	352.34
21	5.25	37.94	"	67.06	66.57	352.08
20	5.00	41.56	"	70.69	70.00	353.44
19	4.75	45.00	"	74.13	73.59	352.09
18	4.50	48.75	"	77.88	77.67	350.44
17	4.25	53.69	"	82.81	82.24	351.95
16	4.00	58.13	"	87.25	87.38	348.00
15	3.75	63.94	"	93.06	93.20	348.98
14	3.50	71.31	"	100.44	99.86	351.53
13	3.25	78.69	"	107.81	107.36	350.39
12	3.00	88.44	"	117.56	116.50	352.69

La gráfica siguiente ha sido realizada con los datos de Boyle, columnas A, volumen 2 (abscisas) y columna D, presión total experimental (ordenadas).

Las escalas utilizadas en ambos ejes hacen referencia a las pulgadas medidas en ambas.



Sobre el modo de realizar la experiencia que pone de manifiesto la relación entre la presión y la compresión del aire, Boyle proporcionaba algunos detalles que resumimos:

1. Al ser el tubo muy alto tuvieron que utilizar dos escaleras de poco peso.
2. La parte inferior del tubo, doblado en U, estaba apoyada en una caja de tamaño y forma suficiente para que si se derramaba mercurio este fuera recogido y no se perdiese.
3. La experiencia se realizaba con dos personas. Una observaba y anotaba cuanto el mercurio subía en la rama más corta. El otro agregaba cuidadosamente el mercurio por la parte superior de la rama larga del tubo.
4. Un pequeño espejo colocado adecuadamente les permitía observar cuando el mercurio se detenía.
5. Probaban como la acción del agua de un paño, aplicado como foco frío en el tubo que contenía el aire comprimido, éste disminuía su volumen, y que al aplicar la llama de una vela el volumen de aire confinado se dilataba.

El éxito de este resultado, era la confirmación de la hipótesis ya sospechada en el Experimento XVII.

1ª Ley de Boyle.

Existe una proporcionalidad entre el resorte de aire (resistencia a la compresión) y su densidad.

Esta experiencia realizada con la colaboración de William Croone, fue comunicada a la Real Sociedad de Londres, en Septiembre 1661.

Holton (1993) escribe: “Parece ser que la ley fue propuesta primeramente por otros dos científicos británicos (Henry Power y Richard Townley) tomando como base unas experiencias realizadas por ellos en 1653”. Estos resultados no fueron publicados hasta 1662, después de conocer, los resultados de las experiencias de Boyle de 1660. El recorrido, probablemente fue el siguiente: Power envió un artículo titulado *Experimentos adicionales realizados en Towneley Hall* entre los años 1660 y 1661 con la ayuda y consejo de Richard Townekey” a Willian Croone (1633-1684), físico británico, quien a su vez lo remitió a Boyle. (En la E.U.I.E.A, (Espasa, 1928)..se escribe: “Townley (Ricardo), físico inglés que vivió en Townley (Lancashire) y de cuya vida se carece de datos. Sábese, sin embargo, que fue el que de los ensayos de Boyle, sobre la compresión del aire, dedujo la ley que injustamente se llama de Mariotte”

Escribía Boyle: “Por otro lado, y hasta tanto ulteriores ensayos me informen con más claridad, no me atreveré a determinar si la teoría expuesta regirá o no universal y exactamente, sea en la condensación, o en la rarefacción del aire”.

Aclara Solis, C .,(1985) que: “Boyle no extiende inmediatamente la hipótesis sobre la compresión del aire al caso de la expansión, quizá porque tomase

en consideración la idea escolástica de que la compresión y expansión son dos fenómenos cualitativamente distintos”.

Segundo experimento realizado por Boyle referido a la rarefacción.

El objetivo de éste experimento consiste en extender a la expansibilidad las conclusiones obtenidas para la compresibilidad.

En Abril de 1661, Townley y Power, realizaban experiencias con el aire expandido, utilizando un tubo que contenía la mitad de mercurio y la otra mitad de aire. La expansión la obtenían realizando las medidas a distintas alturas ya que su lugar de residencia, disponía de montes de diversa altitudes. La expansión del aire, ligada a la disminución de la columna de mercurio (presión), era prácticamente de observación directa. En una reunión entre Boyle y Townley que tuvo lugar en el otoño de 1661 en la Sociedad Real de Londres, es muy posible que éste sugiriera a Boyle la interpretación matemática que encontraba en sus series de datos.

Escribía Boyle: “Más antes de entrar en este tema, reconoceré de buena gana que aún no había transformado en una hipótesis cierta estos ensayos míos relativos a la expansión del aire, cuando ese ingenioso caballero Sr. Richard Townley tuvo a bien informarme que, habiéndose convencido por la atenta lectura de mis experimentos físico mecánicos de que el resorte era la causa de ello, intentó

[...] aportar lo que yo había omitido en cuanto a someter a estimación exacta de qué manera el aire dilatado por sí mismo pierde su fuerza elástica según la medida de la dilatación”.

La experiencia que realizó Boyle, para estudiar la relación que existía entre el volumen de aire expandido y la presión, se encuentra detallada en la traducción de Solis, C. (1985) de *Dos nuevos experimentos relativos a la medida de la fuerza del resorte del aire comprimido y dilatado*, algunos de cuyos datos citamos a continuación.

Empleaba un tubo de vidrio de unos 182,8 cm de largo, sellado por uno de sus extremos.

y un segundo tubo estrecho, abierto por ambos extremos y graduados en pulgadas. Introducía el tubo delgado en el mayor casi lleno de mercurio, de tal forma hasta que el mercurio del tubo estrecho estuviese al mismo nivel que la superficie del mercurio exterior del tubo mayor. Procuraba que quedara poco más de una pulgada (2,54 cm) del tubo delgado por encima del mercurio envasado. Ajustaba la medida de una pulgada de aire encerrado. Levantaba gradualmente el tubo delgado hasta que lograba dilatar el aire hasta una pulgada, pulgada y media, dos pulgadas, etc., observando en pulgadas y octavos. la longitud del cilindro de mercurio que a cada grado de expansión del aire se veía impelido sobre la superficie del mercurio envasado. Realizaba una medida de la presión atmosférica a la que se trabajaba, mediante el experimento de Torricelli, aprovechando

como dispositivo el tubo grande, donde se alcanzó una altura de 29 3/4 pulgadas (75,5 cm.).

Las observaciones realizadas fueron debidamente anotadas, suministrando el siguiente cuadro (Tabla II)

TABLA II. DATOS ORIGINALES DEL EXPERIMENTO DE BOYLE SOBRE LA DILATACIÓN DEL AIRE

(En esta tabla se han conservado las anotaciones en números fraccionarios, tal como se encuentran en la tabla original de Boyle)

A	B	C	D	E
Volumen	Presión exp.	Presión at.	Presión total exp.	Presión total teor.
1	00 0/0	29,13	29 3/4	29 1/4
1 1/2	10 5/8	"	19 1/8	19 5/6
2	15 3/8	"	14 3/8	14 7/8
3	20 1/4	"	9 1/2	10 1/12
4	22 5/8	"	7 1/8	7 7/16
5	24 1/8	"	5 5/8	5 19/20
6	24 7/8	"	4 7/8	5 1/26
7	25 1/2	"	4 1/4	4 1/4
8	26 0/0	"	3 3/4	3 23/32
9	26 1/8	"	3 3/8	3 11/36
10	26 5/8	"	3	2 39/40
12	27 1/8	"	2 5/8	2 23/45
14	27 1/2	"	2 1/4	2 1/8
16	27 3/4	"	2	1 55/64
18	27 7/8	"	1 7/8	1 47/72
20	28 0/0	"	1 3/4	1 9/20
24	28 1/4	"	1 1/2	1 23/96
28	28 3/8	"	1 3/8	1 11/16
32	28 1/2	"	1 1/4	66/73

LECTURAS:

A. Volumen. Número de espacios iguales que ocupa en la parte superior del tubo la misma porción de aire confinado.

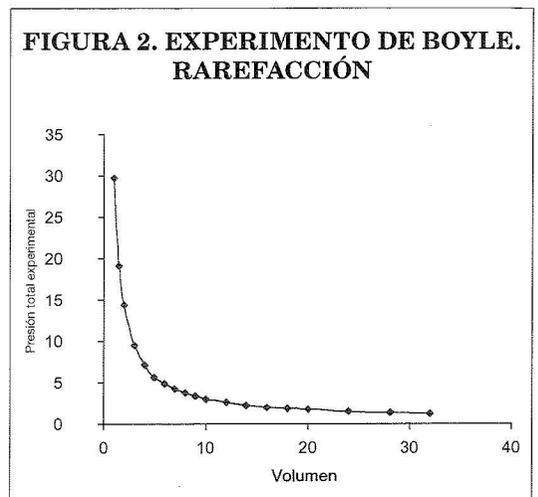
B. Lecturas de la columna de mercurio bajo la porción del aire confinado.

C. Lectura de la presión atmosférica externa al tubo del aire confinado.

D. Lecturas que resultan de restar a la presión atmosférica del aire exterior al tubo las lecturas de la columna de mercurio equivalente a la presión a la que está el aire confinado.

E. Lecturas que corresponderían a la presión del aire confinado calculada teóricamente, es decir, admitiendo que se cumple exactamente la ley de Boyle.

A partir de estos datos se ha construido la gráfica siguiente: columna A volumen medido (abscisas) y columna D, presión total experimental (ordenadas).



Boyle justificaba las pequeñas discrepancias entre los valores experimentales y teóricos por la dificultad de realizar con precisión experimentos de esta naturaleza. Citaba la posible desigualdad en la cavidad del tubo y también al grosor del cristal. Los resultados obtenidos, le permitía hacer ciertas reflexiones.

La pulgada de aire que inicialmente contenía el tubo estaba confinado a la presión de la atmósfera, unos 76 cm.. Cuando se expandió al doble, la columna de mercurio descendía unas 15 pulgadas (38,1 cm.), Dicho de otra forma, el aire de fuera estaba equilibrado con una columna de mercurio de 38 cm que había descendido la columna de mercurio del tubo estrecho más la presión del aire confiando que debía ser de otros 38 cm de mercurio. Por tanto, el aire confinado se encuentra a una presión mitad si se ha dilatado hasta el doble.

Con los resultados de esta experiencia se formula él:

2ª Ley de Boyle

Existe una proporcionalidad entre el resorte de aire (resistencia a la dilatación) y su densidad.

F. Linus pretendía rechazar las conclusiones de Boyle con dos argumentos muy poco convincentes: a) la naturaleza aborrece el vacío; b) aunque el aire posea cierto peso y elasticidad son hechos insuficientes para justificar fenómenos conocidos teniendo que recurrir para ello a su funiculus.

Escribía Boyle: “No ha refutado satisfactoriamente el vacío sino que lo ha rechazado, mientras que nosotros hemos puesto ahora de manifiesto que la elasticidad del aire puede bastar para realizar cosas mayores que las que nuestra explicación de los experimentos torricellianos y los de nuestra máquina nos obligan a atribuirle”. Y continúa: “[...] nos atrevemos a esperar que aquellos lectores que no se hallen llenos de prejuicios por su reverencia hacia

Aristóteles o las escuelas peripatéticas, difícilmente rechazarán una hipótesis (que aparte de resultar muy inteligible se ha demostrado que es suficiente) tan sólo por abrazar una doctrina que supone una rarefacción y condensación como la que muchos famosos naturalistas rechazaron por no ser comprensible, aun cuando no conocían otra manera (probable) de resolver los fenómenos a explicar con ella”

Boyle y la filosofía mecánico corpuscular.

En el siglo XVII predominaban dos filosofías de la Ciencia. Una inspirada en Galileo y Bacon, empírica y experimental, denominada filosofía mecánica-corpúscular, que había hecho renacer la teoría atómica, incorporándola gradualmente, Otra inspirada en el racionalismo de Descartes, que simplificaba el estudio del mundo físico y todo aquello que en él acontecía mediante la aplicación de principios universales. Negaba la existencia del vacío y rechazaba la teoría atómica. La primera fue la que siguió la mayoría de los ingleses. La segunda fue defendida principalmente en Francia y Holanda. No obstante, los filósofos de los siglos XVI y XVII, participaron de la influencia de ambas.

Boyle, uno de los primeros en dedicarse a la experimentación cuantitativa de los gases, fue un destacado defensor de la filosofía mecánico-corpúscular, que se había convertido en el “motor”

de la revolución científica. Al observar la facilidad con la que el aire se comprime o se dilataba y encontrar la relación de proporcionalidad que existía entre la compresibilidad y rarefacción del aire y la densidad, admitió que todo ello se podía explicar considerando las partículas que constituyen el aire como pequeños resortes estacionarios o diminutas esferas en movimiento. Años después, en 1738 Bernouille, D. (1700-1782) mostró que, para interpretar la presión y que esta aumentaba a medida que se reducía el volumen (o se elevaba la temperatura), como exigían los experimentos, resultaba más apropiado, admitir que los gases estaban formados por pequeñas esferas en movimiento

Epílogo

El concepto de gas en aquella época, se expresaba con la denominación de aire, ya que era el único gas al que se había prestado atención.

Boyle confirmó mediante la máquina neumática la existencia del vacío y que el aire era una sustancia susceptible de ser pesada.

Reafirmó como causa del ascenso del mercurio en el experimento de Torricelli el peso del aire circundante.

Con resorte o muelle de aire, se estaba refiriendo a la elasticidad (compresibilidad o dilatación), que a su vez se puede interpretar como la presión que se ejerce sobre las paredes del recipiente.

La expansibilidad y compresibilidad del aire fue experimentada separadamente.

Formuló dos leyes una relativa a la compresión del aire y otra a la dilatación.

Boyle no hizo formulación matemática alguna.

No llegó a establecer la necesidad de la constancia de la temperatura para que la proporcionalidad inversa entre presión y volumen en un gas confinado se cumpliera.

Aplicando la relación entre volumen y densidad, establecía que el resorte del aire (resistencia a la compresión o dilatación) es inversamente proporcional al volumen.

La redacción de la ley de Boyle contenida en los textos actuales es más clara y está completada con investigaciones posteriores. Destacamos dos enunciados, uno de ellos: por referirla a la densidad de acuerdo con su formulación primitiva y otra por considerarla más completa. **A temperatura constante la presión de una masa dada de gas es directamente proporcional a su densidad e inversamente proporcional a su volumen.** Si la presión de un gas confinado a temperatura constante se duplica la densidad se duplica y el volumen se reduce a su mitad, Si la presión se triplica la densidad se triplica y el volumen se reduce a 1/3. (Blackwood, O.H. et al.,1967)

2. Si se mantiene constante la temperatura de una masa determinada de gas mientras su volumen varía entre amplios límites, la pre-

sión ejercida por el gas varia también de tal modo que el producto de la presión por el volumen (muy aproximadamente) se mantiene constante. En términos matemáticos:

$$PV = Cte$$

(masa constante)

(temperatura constante)

(Obsérvense los resultados de la columna F de la tabla 1, realizada con los datos originales del experimento de Boyle)

Aunque el producto PV permanece aproximadamente constante a una temperatura determinada, varía algo con la presión. Por ello es conveniente postular una sustancia imaginaria llamada GAS PERFECTO, el cual, por definición, obedece exactamente a la ley de Boyle. (Sears, F.W. y Zemansky, M.W.;1957)

Bibliografía

- BACON, F. (1984) *Novum Organum* (Traducción de Cristobal Libran). Edit. Orbi Barcelona.
- BIRCH, T. (1965-1966) *The works; Edited for. Thomas Birch; with an introduction by Douglas Mckie*. Olms 1965-1966. Facsimil, London 1972 .
- BLACKWORD, O.H.; KEWLLY, W.C, y BELL, R.M. (1967) *Física General*. Edit. C.E.C.S.A. México.
- BOYLE, ROBERT (1696) *Opera Omnia*. Sumotibus Jo: Jacobi Herz. Venecia.
- BOYEL ROBERT (1680) *Opera varii* [...]apud Samvelem de Tournes. Genevae
- BOYLLE, ROBERT (1985) *Física, Química y Filosofía Mecánica*. (Introducción, traducción de obras de Boyle, y notas a pie de página de C. Solis Santos) Edit. Alianza. Madrid.
- BYNUM, W. F.; BROWNE, E.J. y PORTER, R. (1986) *Diccionario de Historia de la Ciencia*. Edit. Herder. Barcelona.
- CID, F. (dir.) 1979. *Historia de las Ciencias. Edad Moderna*. Edit. Planeta. Barcelona..
- E.U.I.E.A.(ENCICLOPEDIA UNIVERSAL ILUSTRADA EUROPEOAMERICANA). (1928). Edit. Espasa. Barcelona.
- HOLTON, G y BRUSH S. G. (1993) *Introducción a los conceptos y teorías de las Ciencias Físicas*. Edit. Reverté. Barcelona.
- MASON, S.F. (1990) *Historia de las Ciencias /2. La revolución científica de los siglos XV y XVII*. (Traducción de Solis Santos, Carlos). Edit. Alianza. Madrid.
- PASCAL, B. (1984) *Tratados de pneumática*. (Prefacio, introducción y notas de A.Elena) Edit. Alianza. Madrid.
- SEARS, F.W. y ZEMANSKY, M. W. (1957). *Física General*. Edit. Aguilar. Madrid.