

CAPÍTULO 6

SOBRE LA ELASTICIDAD DEL AIRE

Se suele utilizar el aire en muchas de nuestras actividades cotidianas, las ollas a presión, los compresores de aire para pintar paredes, el aire acondicionado de los carros incluso para refrescarnos con un abanico. Pero ¿cómo establecer una ley que dé cuenta del comportamiento del aire? Este fue un trabajo que culminó con la llamada Ley de Boyle.

EXPLORACIÓN DE IDEAS

1. Explique las razones por las cuales cree que el aire no escapa de la Tierra
2. ¿Será posible que una olla a presión pequeña sea más fácil de destapar que una grande cuando se encuentran hirviendo?
3. Explique como se genera el viento a través de un ventilador

PROBLEMÁTICA SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL AIRE

Los experimentos sobre el vacío en la Edad Media fueron tan relevantes como la problemática misma que los promovió. Las corrientes de pensamiento estaban divididas entre los plenistas y los vacuistas. El aire seguía siendo parte de la polémica, porque si bien se reconocía su existencia, los defensores del tradicionalismo aristotélico no justificaban de ninguna manera que éste pudiera actuar y menos en condiciones de reposo. La nueva impronta que le proporcionó Galileo al papel del experimento generó una dinámica en toda Europa por parte de quienes se dedicaron a diseñar experimentos y máquinas para realizarlos, algunos para defender las tesis plenistas y otros para atacarlas.

El comportamiento del aire resultó ser de interés para investigar en las nuevas máquinas que se estaban construyendo. Algunos investigadores como Boyle las aprovecharon para fabricar hechos y validar el conocimiento.

Boyle y los problemas del vacío

El interés por los experimentos en torno al vacío realizados por Torricelli, Guericke y Pascal (estudiado en capítulos anterior) motivaron a Rober Boyle (1627-1691) en Inglaterra a reproducir él mismo varios de ellos. El barómetro de Torricelli fue muy reconocido en toda Europa y fue objeto de discusión constante por parte tanto de los seguidores del horror al vacío como de los seguidores de su existencia e inactividad. El experimento de Pascal en el Puy de Dome parecía ser contundente a favor de la existencia e inactividad del vacío y de la acción del peso de la masa del aire, pero fueron los experimentos de Boyle los que finalmente permitieron la construcción de una ley matemática sobre el comportamiento del aire.

Es importante describir el funcionamiento de esta máquina porque de su diseño y construcción se desprenden los problemas que tendría que encarar Boyle y que le llevarían posteriormente a establecer la ley matemática.

Experimentos con la máquina de vacío



Robert Boyle
(1627 - 1691)

La afirmación de Pascal de que la acción del peso de la masa del aire disminuye a medida que se asciende por una montaña con el experimento de Torricelli, a tal punto que si se llega a la cima del monte más alto de la Tierra, a los límites donde ya no hay aire, entonces la columna de mercurio caería totalmente, llevó a Boyle a considerar lo que podría suceder si él mismo produjera las condiciones de vacío en una máquina y no tener que subir “al fin del mundo” para observarlo. Los diseños de las máquinas experimentales producidas por Guericke en Holanda, llegaron hasta sus oídos y junto con su acompañante Hooke decidieron diseñar una máquina neumática con una campana de vacío con la capacidad suficiente para reproducir muchos experimentos en su interior (fig. 33).

La importancia de esta máquina se propagó por Europa y se convirtió rápidamente en la forma de validar el conocimiento científico. Con Boyle se inicia otra forma de hacer ciencia y es la de controlar los experimentos y poner en evidencia el comportamiento de la naturaleza.

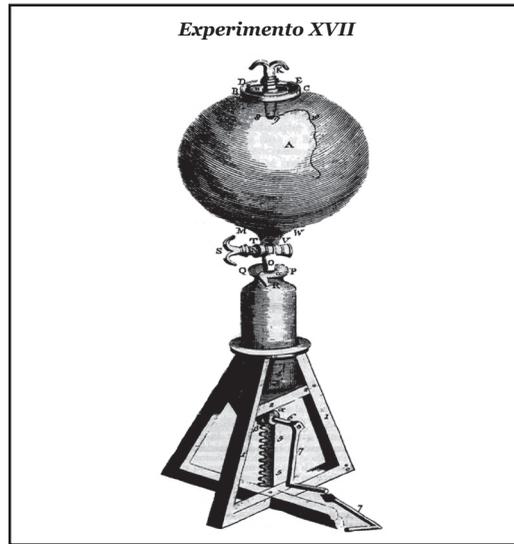


Fig. 33
La primera máquina neumática de Hooke y Boyle

El diagrama que se muestra en la figura consta de una campana de vidrio (con una tapa superior hermética) y controlada por una válvula que regula la entrada y salida del aire, conectada a ella está un pistón en forma de cremallera que sube y baja movido por una manivela. Al bajar el pistón se extrae aire de la campana, se cierra la válvula y luego se retira el tapón que esta en el pistón para que el aire extraído se mezcle con el aire circundante. Se sube nuevamente el pistón, se vuelve a colocar el tapón se abre de nuevo la válvula, luego se repite nuevamente el procedimiento y así sucesivamente.

Boyle creía que de esta manera era posible extraer todo el aire de la campana y por lo tanto observar y registrar efectos ¡lo que encontró es sorprendente!

Experimento 1

Su preocupación inicial era reproducir el experimento de Torricelli al interior de esta máquina y verificar la hipótesis de que “es el peso de la columna de aire exterior la causa de que la columna de mercurio no caiga del tubo”. Para ello introdujo el baroscopio de Torricelli con sumo cuidado en la máquina, aislándolo y verificando que el aire encerrado en la campana no pudiera entrar y salir por algún lado, incluso orificios o poros en los sellamientos (fig. 34).

El razonamiento de Boyle en torno a la postulación de Torricelli, es totalmente coherente: si el equilibrio del mercurio en el barómetro es a causa del peso de toda la columna de aire que subyace al sistema, entonces, si se coloca la campana sobre el barómetro, lo cual reduce la cantidad de aire atmosférico que actúa a una pequeña porción, el mercurio del tubo debería caer.

Lo que observó es que la columna de mercurio se mantenía en la misma posición que antes de ser aislada. ¿Por qué?

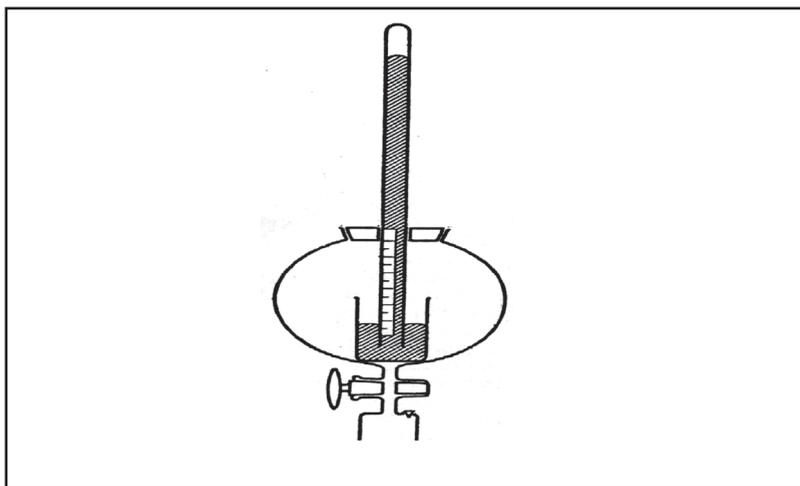


Fig. 34
Experimento de Torricelli en la bomba neumática de Boyle

Es desde aquí que él empieza a pensar que debe haber alguna característica del aire distinta a su peso que impide que el mercurio caiga.

Al respecto dice Boyle:

Tras dicho sellado no apareció 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 ambiente sobre el aire encerrado, por lo que este parece operar sobre el mercurio más en virtud de su resorte que por su peso, dado que no se puede pensar que éste alcance más allá de dos o tres onzas (unos 57 u 85 g), lo que resulta despreciable en comparación con ese cilindro de mercurio al que impediría descender.

Actividad: discutan con los compañeros si acaso con esta afirmación se esta cuestionando la explicación dada por Torricelli y Pascal al barómetro.

Experimento 2

La preocupación siguiente era verificar la hipótesis de Pascal con relación al Puy de Dome, a saber; a medida que se asciende por la montaña la columna de mercurio va descendiendo porque es menor la cantidad de aire que logra el equilibrio, entonces “en condiciones de vacío, esto es en ausencia total de aire, la columna de mercurio debe caer totalmente del tubo” por que no habría aire para equilibrar la columna de mercurio.

Al respecto dice Boyle:

Si la verdadera y única causa por la cual la columna de mercurio no cae es que se equilibra con el peso del aire exterior, entonces si el experimento se puede realizar en nuestra máquina se debe inferir que el mercurio descenderá por debajo de los 27 dedos en proporción a la extracción de aire practicada en la campana.

Y luego afirma que:

Si la verdadera y única razón por la cual el mercurio no cae más abajo fuese que a esa altitud el cilindro de mercurio del tubo se halla en equilibrio con el cilindro de aire exterior que se supone va del mercurio adyacente a la parte superior de la atmósfera, entonces si no hay aire el mercurio del tubo habría de caer hasta el mismo nivel que el del recipiente, dado que en tal caso no habría ninguna presión sobre el mercurio subyacente capaz de resistir el peso del situado encima.

De un Problema básico a una ley fundamental

No sólo no logró lo que quería, sino que tubo que arreglar varias máquinas que se dañaron al intentar producir el vacío completamente. ¿Por qué? El problema para Boyle ahora era técnico, por qué no sale todo el aire de la campana? ¿por qué se rompen los pistones? Será acaso que la máquina usada es muy grande y por lo tanto la cantidad de aire que queda adentro es muy grande y ¿por eso no sale del todo? ¿qué pasa si se utiliza una máquina más pequeña para extraer el aire? así lo hizo. Con el objeto de ilustrar esta anomalía aún más, Boyle hace la misma experiencia pero en otras máquinas de menor tamaño que la anterior, para ver si con un menor volumen y con menor número de extracciones se sacaba todo el aire que estaba dentro de la campana, ¡el asombro fue grande!

El mismo dice que: “Encontrábamos tanta dificultad en hacer que ésta estuviese totalmente vacía como en la mayor”.

Pareciese que las partículas de aire que aún quedan dentro de las respectivas campanas se agarraran de las paredes de las campanas y entre ellas mismas para no poder salir y permitir un vacío total. Pero lo que sí se sabía es que aún esta pequeña cantidad de aire era capaz de ejercer una presión sobre el mercurio de la vasija para sostener la pequeña cantidad de mercurio que quedaba en el tubo.

La máquina de vacío de Boyle funcionaba mecánicamente (hoy en día funcionan con corriente eléctrica) a través de la manivela para mover el pistón, esta particularidad le permitió identificar una dificultad que posteriormente lo llevaría a la ley que lleva su nombre. Si se extrae aire de la campana con el pistón se puede entonces contar el número de vueltas que es necesario dar a la manivela para lograr extraer una cierta cantidad. Boyle encontró que en las primeras extracciones de aire el movimiento de la manivela era rápido y fácil, pero a medida que el aire al interior de la campana disminuía era necesario hacer más esfuerzo darle una vuelta a la manivela, hasta llegar al punto de tener que hacer un gran esfuerzo para lograr extraer las últimas cantidades de aire, finalmente se rompían las manivelas antes que moverlas un poco para extraer la última cantidad de aire. Al extraer aire de la campana llega un momento donde éste no se deja sacar más. ¿Por qué?

¿Será que la naturaleza le tiene horror al vacío? como dijo Aristóteles. Boyle describe este fenómeno así:

[...] tras las dos o tres primeras extracciones de aire, el mercurio descendente no caía en cada ocasión lo mismo que anteriormente, pues habiendo marcado en el tubo sus diversos niveles, hallamos que con la primera succión descendía una pulgada y $\frac{3}{8}$ (3.5 cm) y con la segunda, una pulgada y $\frac{3}{8}$, mientras que cuando el recipiente se halla casi vaciado, difícilmente se le podía hacer descender con una succión más allá del grueso de un grano de cebada.

¿Cómo es posible que una pequeña cantidad de aire ejerza tanta resistencia a dejarse sacar? si el aire estuviera constituido por partículas sueltas no sería difícil extraerlo, entonces debe ser otra la razón.

Este experimento muestra dos aspectos; el primero es la imposibilidad física de extraer totalmente el aire de la campana y el segundo que la pequeña cantidad de aire que se resiste a salir ejerce presión sobre el mercurio restante. El primero le lleva a considerar que una pequeña cantidad de aire encerrado puede ofrecer una fuerza de resistencia tan grande que responden a una relación inversa, menos aire encerrado más resistencia. El segundo lo lleva a considerar que no es el peso del aire sino la presión la causa que explica el barómetro de Torricelli.

Actividad: discutan en grupos la afirmación “Pareciese que las partículas de aire que aún quedan dentro de las respectivas campanas se agarraran de las paredes de las campanas y entre ellas mismas para no poder salir y permitir un vacío total” y expliquen qué significado tiene dentro de la teoría de partículas.

Experimento 3

Boyle seguramente consideró que si se dejaba entrar el aire nuevamente a la campana, al abrir la válvula, la columna de mercurio regresaría a su posición inicial. Observó dos cosas: una, el aire entraba violentamente a la campana y, dos el nivel de mercurio no llegaba a su posición inicial. Por qué?

Boyle lo describe así:

[...] otra circunstancia de nuestro experimento fue la siguiente, que (una vez que el mercurio hubiera caído hasta abajo) si en la abertura de la válvula se permitiese bruscamente una excesiva entrada al aire exterior, este se precipitaría al interior con tal violencia y presionado con tanta fuerza sobre la superficie del mercurio subyacente, que habría de impulsarlo hacia el tubo con rudeza bastante para amenazar con romper el vidrio.

Cómo explicar la acción violenta del aire? Las teorías sobre el comportamiento del aire no existían, lo único que se podía considerar era la validez de las ideas de Baliani sobre la existencia de un mar de aire que nos rodea y las ideas de Torricelli en torno a que el peso del aire equilibra la columna de mercurio. Sin embargo el estudio sobre el comportamiento de los resortes estaba más elaborado, ya Hooke había propuesto una ley para los resortes. Boyle consideró una buena analogía asociar el comportamiento violento del aire a la tendencia de un resorte a recuperar su posición inicial cuando es estirado y lo contrario la resistencia del resorte a ser estirado con la resistencia del aire a dejarse sacar completamente de la campana. Sugiere que tal vez el aire no son partículas discretas sueltas sino unidas entre si, formando un resorte.

Por qué la columna de mercurio no llega a la posición inicial si es lo que debería suceder? Boyle no logra desprenderse de las ideas plenistas de que hay algo que lo llena todo, y si bien no entra en la discusión con sus contemporáneos, si llega a creer que nunca será posible un vacío perfecto, ya que siempre habrá algo al interior de la campana, vapores de aire, éter o algo corpóreo. En ese sentido Boyle cree que al entrar el aire violentamente se filtran burbujas de aire con el mercurio, u otra materia corpórea desconocida que hace que el mercurio no llegue al mismo nivel del estado inicial.

Actividad: averigua que papel desempeñan las analogías en el conocimiento científico y en el conocimiento escolar.

La hipótesis de la elasticidad del aire

Al comparar el aire con un resorte, Boyle está modelizando o comparando algo desconocido (el comportamiento del aire) con algo que ya se conoce: el comportamiento de los resortes; es por esto que cuando se habla de la elasticidad del aire se hace la analogía con la elasticidad del resorte. Parte de dos premisas fundamentales a saber:

- A) el equilibrio no se debe a causas internas en el tubo, sino causas externas, puesto que al disminuir la cantidad de aire (causa externa) la altura del mercurio desciende, y
- B) que el equilibrio no está en función del peso del aire, sino de su fuerza de resorte o elasticidad.

Los estudios con resortes ya identificaban tres elementos conectados entre sí; uno, la fuerza del resorte, esto es la resistencia a dejarse estirar o comprimir, dos, la constante de elasticidad del resorte, determinada por la densidad del material de que está hecho y tres, la expansión lineal del resorte producto del estiramiento.

$$F = -Kx$$

El signo menos da cuenta de la dirección de la fuerza, negativo si es fuerza recuperadora.

La analogía con el resorte le permite a Boyle establecer que a medida que se rarifica el aire mediante la extracción disminuye su densidad, esto es su resorte se hará más débil y soportará una columna menor de mercurio; y a medida que se aumenta su densidad se hará más fuerte y por lo tanto soportará una columna mayor de mercurio. Un resorte puede realizar determinada fuerza dependiendo de su constante o de su grado de elasticidad, así mismo, el aire puede realizar determinada fuerza, en este caso sostener una columna de mercurio, dependiendo de su elasticidad.

¿Qué es elasticidad? ¿de qué depende esta fuerza de resorte del aire comprimido? Es claro que la acción que el aire realiza más que por su peso depende de la elasticidad del aire y que la elasticidad depende de la variación de la cantidad del aire dentro de un mismo espacio, en otras palabras de su grado de rarefacción.

De lo que se había hecho hasta acá se puede inferir una relación entre dos cosas, la primera era el estado de rarefacción del aire, es decir, cuando el aire estaba expandido en el interior de la campana por la extracción que se realizaba, ya que al sacar más y más aire, el que aún quedaba dentro debía expandirse a todo el espacio de la campana, luego, entre más expandido mayor su estado de rarefacción; y la segunda su elasticidad, es decir, el estado del aire con el cual podía sostener diversas columnas de líquidos mediante la presión que ejercían sobre aquellos. La densidad representa el estado de rarefacción y la fuerza de resorte representa su elasticidad.

El descenso de la columna mediante la extracción se debe a que la fuerza de resorte del aire disminuye. La relación entre densidad y resorte es directamente proporcional: a mayor densidad mayor fuerza de resorte (o constante de elasticidad) y a menor densidad menor fuerza de resorte:

$$d \propto k$$

Después de hallar una relación cualitativa entre las dos variables, era necesario establecer una relación cuantitativa a partir de estos fenómenos, pero el experimento XVII (fig. 34) no es útil para tal tarea, debido a que, como anteriormente se dijo, no se pudo medir con exactitud la altura de cilindro mercurial cuando descendió por debajo de la parte superior de la campana y además no se conocía con exactitud la cantidad de aire que actuaba sobre el mercurio del baroscopio. A partir de esto, Boyle idea una experiencia con el objeto de encontrar la proporción cuantitativa de las dos variables, experiencia que al mismo tiempo nos ayudará a responder dos preguntas que se dejaron atrás: ¿qué es elasticidad? ¿De qué depende esta fuerza de resorte del aire comprimido?

Experimento 4

Se tiene un tubo de vidrio doblado en dos ramas formando una J, cerrado en el extremo corto y abierto en el largo. Se inyecta mercurio por el extremo abierto hasta que quede nivelado en ambas ramas del tubo como lo muestra la figura (fig. 35).

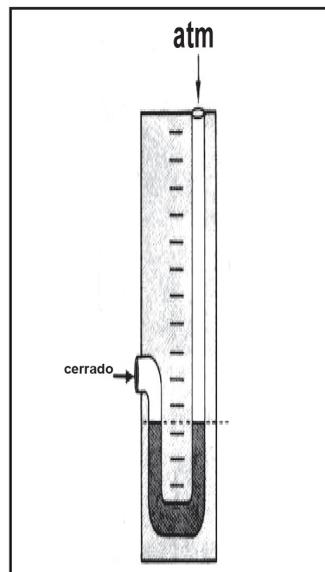


Fig. 35
Experimento de Boyle sobre la elasticidad del aire

Altura de columna de mercurio	Altura de la columna de aire	Presión atmosférica	Presión de la columna de aire
00"	12"	29 ¹ / ₈	29 ² / ₁₆
29 ¹¹ / ₁₆ "	6"	29 ¹ / ₈	58 ² / ₈
88 ⁷ / ₁₆ "	3"	29 ¹ / ₈	116 ⁴ / ₈

El extremo cerrado del tubo contiene una columna de aire que quedo atrapado después de la inyección del mercurio.

Luego, se agrega una nueva cantidad de mercurio equivalente a 1 atmósfera (76 cm. aprox) y se observa que la columna de aire encerrado se reduce a la mitad, nuevamente se agrega mercurio y se observa la columna de aire encerrado se reduce a la mitad de la mitad anterior, o sea un cuarto. La tabla muestra los datos que encontró Boyle, medidos en pulgadas (").

La relación matemática que se expresa en la tabla muestra lo siguiente: entre mayor es la altura de la columna de mercurio, menor es la altura de la columna de aire. La presión que soporta el aire encerrado es equivalente (por equilibrio) a la presión ejercida por el peso de la columna de mercurio más la presión del aire exterior (presión atmosférica), así pues, en la situación inicial cuando la columna de mercurio en ambos ramas del tubo se encuentran al mismo nivel quiere decir que el aire encerrado ejerce una presión igual a la presión atmosférica, cuando la columna de aire se reduce a la mitad, entonces ejerce una presión igual al doble de la presión atmosférica y, cuando la columna de aire se reduce a la cuarta parte de la altura inicial, entonces ejerce una presión que es cuatro veces la presión atmosférica. La presión resulta ser inversamente proporcional al volumen del aire encerrado.

$$P = 1/V$$

Sin embargo le queda a Boyle un problema por resolver, la constante de elasticidad (k): para el caso de los resortes la constante de elasticidad del resorte depende del material y no de su longitud, si tenemos un mismo resorte y lo cortamos por la mitad, la constante de elasticidad de los 2 nuevos resortes siguen siendo la misma que la del resorte original, y por lo tanto las fuerzas recuperadoras son las mismas para todos.

Para el caso del aire encerrado, Boyle sabe que la cantidad de aire siempre va a ser la misma, pero su fuerza de resistencia cambia con el volumen, por lo tanto no se comporta como los resortes. Encuentra que al variar el volumen, la densidad del aire cambia y por lo tanto su constante de elasticidad cambia, la fuerza de resistencia depende de la densidad de tal forma que para cada nueva densidad es como si tuviera el aire una nueva constante de elasticidad.

$$F_1 = k_1/d_1; F_2 = k_2/d_2 \dots\dots$$

Cada vez que disminuye el volumen se tiene un nuevo resorte del aire (no es el mismo del anterior), la fuerza de resistencia aumenta a medida que aumenta la constante de elasticidad porque disminuye la densidad del aire.

Pero entonces por qué se le llama constante de elasticidad si realmente varía?

Lo que es constante es precisamente la forma como varía la elasticidad, si la fuerza de resistencia aumenta al doble, fue por que la elasticidad aumentó al doble y así sucesivamente. El factor de proporcionalidad es el que es constante.

Observemos finalmente que la relación matemática que Boyle construye inicialmente es entre la fuerza de resistencia del aire y su densidad, pero que puede asumirse para el caso del aire y de los gases en general que la fuerza de resistencia se expresa a través de la presión ejercida y la densidad del aire se expresa en términos del volumen ocupado.

$$P_1/p_2 = V_2/v_1$$

Actividades adicionales

Con una máquina neumática se pueden recontextualizar otros de los experimentos e ideas propuestas por los científicos en el siglo XVII, por ejemplo:

a) con globos inflados y desinflados comparar el comportamiento del aire con otros gases como helio u oxígeno al interior de la máquina y fuera de ella

b) con distintos líquidos como agua, mercurio, aceite, alcohol... se pueden realizar experiencias como esta; un vaso se llena con agua y se introduce en la campana de vacío, luego se empieza a extraer el aire. Se observa que el agua comienza el proceso de ebullición sin calentarse. ¿Cómo explicar este hecho? También se observan pequeñas gotas de agua que se cristalizan... ¿qué otros hechos puedes “construir” con la máquina? ¿qué pasa con el aceite al vacío?

c) otro tipo de preguntas que se pueden orientar en torno al funcionamiento de la máquina son: ¿cómo es la forma por la que se aspira el aire con una aspiradora comercial o un compresor?

LECTURA COMPLEMENTARIA
CÓMO SE CONSTRUYE UN HECHO EXPERIMENTAL
S. SHAPIN

Así como la metáfora mecánica ocupaba una posición central en las nuevas tendencias de la filosofía natural, los medios mecánicos adquirieron una importancia nueva en la construcción del conocimiento. En ningún sitio es más patente este énfasis en los experimentos diseñados artificialmente que en los programas de investigación asociados con la Royal Society de Londres (que fue fundada en 1660) y, especialmente, con Robert Boyle, su miembro más influyente. La máquina neumática que había inventado para Boyle su asistente Robert Hooke, a finales de la década de 1650, se convirtió rápidamente en el emblema de la práctica de la filosofía natural. Es la máquina de construcción de hechos más importante de la Revolución científica ¿Cómo funcionaba la máquina neumática? ¿Cómo producía conocimiento científico factual? ¿y de qué manera se ofrecía el conocimiento resultante como remedio de los males intelectuales existentes y como ejemplo del procedimiento que había que seguir para producir el conocimiento científico? Las páginas siguientes ofrecen una descripción breve de un conjunto específico y muy influyente de prácticas para la construcción del conocimiento, mientras que en las secciones posteriores se previene contra el supuesto de que dichas prácticas fueran universalmente aprobadas, incluso por los filósofos mecanicistas modernos.

La máquina neumática tuvo un carácter emblemático en dos sentidos: primero, el aparato y las prácticas a que su uso da lugar se convirtieron en modelos de la forma correcta de proceder en la filosofía natural experimental. La Royal Society llevó a cabo una propaganda masiva de su programa experimental en toda Europa y la experimentación con la máquina neumática fue reiteradamente propuesta como paradigma de la filosofía experimental. El uso de instrumentos en filosofía natural, que se reconocía como algo nuevo en el siglo XVII, atraía un extenso apoyo y se imitaba ampliamente, pero también despertaba oposición. Muchas historias de los orígenes de la experimentación en la ciencia natural se retrotraen a la máquina neumática de Boyle.

En segundo lugar, las manipulaciones llevadas a cabo con instrumentos, como la máquina neumática, pueden producir un conocimiento general relevante para la filosofía natural sólo en la medida en que se considere que los efectos que se producen artificialmente en dichos instrumentos, y los que son producidos por ellos, reflejan el modo en que se comportan las cosas en la naturaleza. En el capítulo 1 se discutió el rechazo general que la distinción aristotélica entre “naturaleza” y “arte” suscitaba en los modernos. A menos que se acepte que hay una semejanza básica entre los productos de la naturaleza y los del artificio humano, las manipulaciones experimentales con máquinas no pueden representar el comportamiento de los objetos naturales, y la diseminación de la metáfora que compara la naturaleza con un reloj, así como la credibilidad concedida a las observaciones telescópicas de los cielos, manifiesta esa aceptación. La experimentación con este tipo de instrumentos creó enormes posibilidades de controlar y de presentar los fenómenos experimentales. En principio, es posible producir los fenómenos experimentales a voluntad, en cualquier momento y en presencia de observadores cualesquiera, sin necesidad de esperar a que dichos fenómenos ocurran naturalmente; incluso se pueden producir efectos que no son accesibles en absoluto a la experiencia humana normal. En el caso de la máquina neumática, gran parte del

interés que tenían para el filósofo natural los fenómenos que producía artificialmente procedía de la aceptación de la idea de que el vacío producido podía representar el que se observaría si fuera posible viajar a la parte superior de la atmósfera. Con la máquina se puede conseguir que los efectos del aire, que en condiciones normales son invisibles e imperceptibles, sean accesibles y manifiestos. Sin embargo, estas ventajas prácticas de la experimentación artificial dependen completamente de que se acepte el principio que afirma que los productos del artificio humano pueden representar, y efectivamente representan, el orden de la naturaleza. Sin este acuerdo básico, no puede existir una inferencia segura que permita pasar de lo que el aparato experimental manifiesta al orden natural de las cosas.

La máquina neumática estaba diseñada para producir un vacío operacional en su gran campana de vidrio. Subiendo y bajando repetidamente el émbolo (o “pistón”) de la máquina y ajustando la válvula y la llave de paso que conecta la campana con el aparato de bombeo, que está hecho de latón, se pueden extraer cantidades de aire de la campana. El esfuerzo necesario para bajar el émbolo es cada vez mayor, hasta que termina por superar todo esfuerzo humano. Llegado este momento, Boyle juzgaba que se había extraído casi todo el aire atmosférico que estaba inicialmente presente en la campana. Esta misma operación contaba ya como un experimento y constituye el primero en la serie de cuarenta y tres que Boyle publicó en los Nuevos experimentos físico-mecánicos relativos al resorte del aire (1660). Este vacío operacional es el que representa la tarea imposible de viajar a la parte superior de la atmósfera. Boyle ofrece una explicación mecánica de la experiencia táctil de mover el émbolo.

Sin embargo, el proceso de extracción del aire de la campana de la máquina neumática es, por sí mismo, menos significativo como experimento que como medio de conseguir un espacio en el que se pueden realizar experimentos. La campana tenía una cubierta de latón en su parte superior, que al retirarse dejaba al descubierto un orificio lo suficientemente grande como para que se pudieran insertar instrumentos en ella; el resto de la serie de experimentos de Boyle consistía en la observación de objetos y aparatos situados en la campana. Consideremos el experimento decimoséptimo de esta serie, que Boyle caracterizó como “el principal fruto que esperaba de nuestra máquina”. Este experimento consiste simplemente en situar el aparato torricelliano en la campana y luego extraer el aire gradualmente. Boyle anunció una expectativa respecto de este experimento que pone de manifiesto, a la vez, su carácter emblemático y su papel como elemento confirmador de una concepción de la naturaleza que se puede considerar mecánica a grandes rasgos. Esperaba que el nivel de mercurio en el barómetro iría descendiendo a medida que se eliminaba el aire de la campana. y cuando se hubiera extraído totalmente, o casi totalmente, el aire de la campana, el mercurio contenido en el largo tubo descendería completamente, o casi completamente, hasta juntarse con el que contiene el recipiente que está situado debajo del tubo. Si el cuñado de Pascal hubiera transportado su barómetro no simplemente a la cima del Puy-de-Dôme, sino hasta la misma cima del océano de aire que rodea la Tierra, esto es lo que habría observado. Y en realidad, aunque no variaba la altura del mercurio cuando se colocaba el barómetro en la campana y ésta se sellaba, Boyle observó que el nivel de mercurio descendía con cada “extracción” de la máquina hasta que, por último, cuando resultaba imposible extraer más aire de la campana, dicho nivel quedaba un poco por encima del nivel de mercurio que había en el recipiente (1). Si giraba la llave de paso con el fin de permitir que penetrara un poco de aire en la campana, el nivel del mercurio subía ligeramente.

Además, el descenso progresivo del nivel de mercurio situado dentro de la campana no se podía explicar como un simple efecto del peso del aire, si bien, tal y como Pascal y otros habían establecido, el aire tenía peso. Mientras que el mercurio que contiene el recipiente que está situado debajo del tubo de Pascal está expuesto al aire, no ocurre lo mismo con el que está en el recipiente colocado en el interior de la campana de la máquina de Boyle. No se puede decir que el peso de una columna de aire atmosférico actúa sobre el mercurio del recipiente, ya que el vidrio de la campana se interpone entre el mercurio y la columna de aire atmosférico. El peso del aire que está encerrado en la campana no puede ser muy grande, ciertamente no lo suficiente como para soportar una columna de mercurio de setenta y seis centímetros. Por consiguiente, parece que para explicar los fenómenos experimentales desde un punto de vista mecanicista se requiere otra noción. Boyle llamó a esta nueva noción la presión o el resorte del aire. A partir de estos y otros fenómenos puestos de manifiesto con la ayuda de la máquina, Boyle infirió que los corpúsculos del aire tienen probablemente un carácter elástico –se parecen a resortes– que les permite resistir las fuerzas que actúan sobre ellos y expandirse cuando dichas fuerzas disminuyen. Cuanto mayor es la fuerza que se ejerce sobre una cantidad de aire encerrado en un recipiente, mayor es la fuerza con que responde el aire. Cuando se elimina una cantidad de aire de la campana, se reduce la fuerza expansiva del aire restante. El mercurio del barómetro que está encerrado en la campana desciende porque, como indicaba Boyle, la presión es entonces insuficiente para resistir el peso del mercurio (2).

Preguntas de seguimiento y valoración

1. ¿Por qué no funciona el experimento de Torricelli en la máquina neumática?
2. ¿Qué diferencia encuentra entre el peso del aire y la presión atmosférica?
3. ¿Qué restricciones se deben tener en cuenta para que la relación inversa entre la presión y el volumen funcione correctamente?
4. Explique físicamente cómo funciona una aspiradora en la casa
5. ¿Qué papel desempeñó el experimento en Boyle?
6. Explique el concepto de presión en líquidos y en gases desde el modelo de elasticidad de Boyle
7. ¿Qué papel jugó Inglaterra en el desarrollo y divulgación del conocimiento científico?
8. ¿En qué consiste la rarefacción del aire?
9. ¿Qué equivalencia existe entre la presión medida en atmósferas, pascales y torr?

(1) Los filósofos discutieron -violentamente a veces- si era posible eliminar toda la materia en la campana o si la máquina conseguía únicamente extraer casi todo el aire atmosférico. El mismo Boyle prefería la segunda posibilidad, porque no deseaba verse mezclado en viejos debates “metafísicos” acerca de la existencia de un vacío total. Según su interpretación, el hecho de que fuera imposible conseguir que el mercurio descendiera totalmente significaba que algo de aire residual permanecía en la campana que había sido “vacuada”.

(2) Nótese que se puede considerar que la presión y el peso son nociones independientes pero causalmente relacionadas. Boyle no distingue entre ambas con la suficiente claridad. Posteriormente, se emprendió una investigación experimental, que desembocó en la conocida “ley” de Boyle (que afirma la proporcionalidad inversa entre la presión y el volumen del aire). Con el fin de cuantificar la presión.