

La insoportable levedad del aire

Para quienes disfrutan devanándose los sesos con espinosos acertijos científicos, quisiera proponerles un problema que comenzó a inquietarme desde muy joven, y que seguramente le ha quitado el sueño a más de algún lector. Imagine que desea determinar el peso de una cierta cantidad de aire contenido en un recipiente herméticamente cerrado. La física afirma que las partículas que componen el aire se encuentran volando en todas direcciones. Entonces cabe preguntarse, ¿qué indicaría una pesa sobre la cual se deposite el recipiente? ¿Mostraría un valor intermitente debido al incesante movimiento de las partículas? ¿O quizá registraría únicamente el peso del recipiente, como si dentro de este se hubiese practicado un riguroso vacío?

Mientras su mente trabaja afanosamente intentando encontrar la solución al acertijo, quizá le interese saber que el camino que me condujo a la respuesta fue extenso y arduo. La primera persona que fustigué sin piedad con estas incómodas preguntas fue mi profesor de ciencias en la escuela. Pronto descubrí con decepción que los conocimientos de mi maestro no estaban a la altura de las circunstancias. Peor aun, nadie en mi entorno familiar tenía la más remota idea de cómo responder a mis cuestionamientos, y por más que buscaba, tampoco encontraba algún texto donde pudiese despejar mis dudas. Mi frustración continuó durante los inicios de mi formación universitaria, pues tampoco hallaba algún atisbo de explicación, y entre los incontables libros de texto que servían de guía a mis estudios de física, tampoco existía información que me fuese de utilidad, algo que hasta el día de hoy me sorprende sobremanera, pues se trata de un problema del mayor interés, y cuya ausencia en los textos y en los programas de estudio impide comprender a cabalidad algunos aspectos fundamentales acerca de la naturaleza de los gases. Enfrentado a tan penosas circunstancias, no tuve más alternativa que contener mi agobiante apetito científico hasta que mis conocimientos me permitieron abordar el problema por mis propios medios.

Después de tan extensa perorata, se habrá percatado de que el problema que nos ocupa dista mucho de ser trivial, aun cuando no resulta difícil captar intuitivamente la idea básica que está detrás de este acertijo. Antes de comenzar con las explicaciones, creo conveniente recordar que el aire, al igual que todos los gases, está compuesto por miríadas de microscópicas partículas, denominadas moléculas, que flotan y se desplazan al azar en todas direcciones. Además, dichas moléculas mantienen una distancia promedio bastante grande entre ellas en comparación con lo que sucede en los sólidos y líquidos, lo cual explica la transparencia de nuestro preciado aire.

El movimiento de las moléculas tiene dos causas. Por una parte, es el resultado de la temperatura a la que se encuentra el aire (movimiento térmico). Cuanto mayor es la velocidad de las moléculas de aire, tanto mayor será su temperatura. Por otra parte, las moléculas tienen masa, y por ende poseen un peso, el cual no es otra cosa que la fuerza con que nuestro planeta las atrae (fuerza de gravedad), de manera que experimentan un movimiento vertical y descendente que en primera aproximación podemos considerar como una caída libre. En otras palabras, las moléculas de aire caen hacia la Tierra del mismo modo que lo hace cualquier objeto que es soltado desde cierta altura. Debemos advertir, eso sí, que estos dos movimientos son muy diferentes, pues el movimiento térmico se caracteriza por ser desordenado e impredecible, mientras que el movimiento debido a la fuerza de gravedad (el peso de las moléculas) es vertical hacia abajo, siempre y cuando no exista nada que perturbe la caída.

Como es fácil advertir, estos dos movimientos se combinan de un modo complejo. Por fortuna, el movimiento térmico puede ser obviado de nuestro análisis, ya que no guarda ninguna relación con el peso del aire. Es fácil convencerse de que esto último es razonable puesto que si

cada molécula tiene un peso, y este se pone de manifiesto en el movimiento descendente debido a la fuerza de gravedad, entonces podemos concluir que el peso del aire en su conjunto será consecuencia únicamente del movimiento vertical debido a la atracción de la Tierra sobre la totalidad de las moléculas. Esto significa que para efectos de resolver el acertijo, podemos reemplazar nuestro recipiente real, por otro cuyas moléculas sólo experimentan un movimiento vertical en caída libre. Sin embargo, no conformes con lo anterior, vamos a introducir tres supuestos que nos permitirán simplificar aun más el problema; primero, que el aire está muy diluido, vale decir, que en promedio sus moléculas se encuentran a una enorme distancia unas de otras (baja densidad); segundo, que cada molécula comienza su descenso desde la parte superior del recipiente con rapidez igual a cero; y tercero, que cuando llegan a la parte inferior, las moléculas rebotan como si se tratara de minúsculas esferas de goma, ascendiendo hasta la misma altura desde la cual iniciaron su caída. Usando un lenguaje técnico, este último supuesto equivale a afirmar que las moléculas chocan elásticamente contra la parte inferior del recipiente. ¿Qué sucede con los choques que puedan experimentar las moléculas entre si? Bueno, al suponer que el aire se encuentra muy diluido, cosa bastante razonable pues se trata de un gas de baja densidad, las colisiones entre moléculas serán muy poco frecuentes, de modo que podemos omitirlas de nuestra discusión. En este punto conviene hacer notar que en la medida que nuestra descripción del aire se vuelve más simple –merced a los supuestos que hemos introducido paulatinamente– también se encuentra cada vez más alejada de la realidad. Sin embargo, esta forma de proceder es bastante habitual en física, cuando nos vemos enfrentados a un problema cuya complejidad supera nuestra capacidad de análisis. Naturalmente, parte de la astucia consiste en distinguir lo relevante de lo accesorio, a fin de eliminar del camino solo aquellos obstáculos que no pongan en cuestión la validez de nuestras conclusiones.

Continuando con nuestro empeño por simplificar al máximo el problema, un último paso que debemos dar consiste en centrar nuestra atención en el momento en que una sola molécula choca contra la parte inferior del recipiente. Desde luego, cualquier colisión implica la existencia de una fuerza que es ejercida entre los objetos que chocan. Si usted ha tenido la mala fortuna de recibir el impacto de un objeto contundente, comprenderá perfectamente a que me refiero. Por lo tanto, pese a que las moléculas de aire distan mucho de ser objetos contundentes, la colisión de cualquiera de ellas contra el fondo del recipiente se traduce en una fuerza que actúa sobre éste. Por otra parte, recurriendo a los tres supuestos simplificadores introducidos más arriba, es posible demostrar (ver el apartado) que dicha fuerza es igual al peso de la molécula, cosa que puede captarse de forma intuitiva tomando en cuenta que la caída y el posterior choque se deben a la acción de la gravedad sobre la molécula. En conclusión, si la fuerza de choque de cada molécula es igual a su peso, y todas las partículas colisionan contra al fondo del recipiente, este recibirá una fuerza equivalente al peso de todas las moléculas de aire, vale decir, el peso del aire será igual a la suma de los pesos de cada una de las moléculas que lo conforman. Además, estos impactos se sucederán una y otra vez con el transcurso del tiempo, pues si pudiésemos observar lo que ocurre a nivel microscópico dentro de nuestro recipiente altamente simplificado, veríamos una enorme cantidad de bolitas cayendo, rebotando y regresando a la parte superior, para luego volver a descender, describiendo un incesante movimiento de vaivén.

Ahora bien, dado que las moléculas solo están en contacto con el fondo del recipiente en el instante de la colisión, parece natural preguntarse, ¿qué ocurre durante el tiempo que transcurre entre cada impacto? Si nuestro aire estuviese compuesto por una sola partícula, sólo se registraría el peso del aire cuando se produzca el choque contra el fondo, de manera que la pesa indicaría un valor intermitente. Sin embargo, como existe una enorme cantidad de moléculas dentro del recipiente (aproximadamente un 1 seguido de 23 ceros) la pesa sólo registrará el efecto colectivo

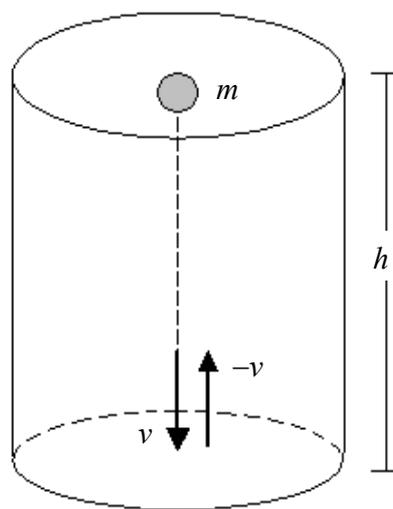
y continuo de los innumerables impactos recibidos sobre el fondo. Por lo tanto, para los efectos de pesar el aire, cada una de las moléculas se comporta como si se tratara de un grano de arena, de modo que podemos visualizar la situación como si en reemplazo de nuestro recipiente real, tuviésemos un balde repleto con arena.

Antes de dar por resuelto el acertijo cabe preguntarse si no hemos actuado en forma arbitraria al omitir de nuestro análisis el movimiento térmico, considerando que este también es responsable de innumerables choques contra el fondo del recipiente, los cuales ejercen una fuerza sobre éste que debería incrementar el registro de la pesa. La repuesta se hace evidente al recordar que el movimiento térmico se produce sin cesar en todas direcciones, de modo que en promedio, por cada molécula que choca contra el fondo, existirá otra que colisiona contra la parte superior, y en consecuencia la fuerza ejercida hacia abajo será compensada por aquella que actúa hacia arriba, lo cual anula el efecto que podría causar el movimiento térmico sobre el peso. También es importante señalar que aun cuando la discusión ha estado centrada en el caso del aire, las conclusiones obtenidas son aplicables a cualquier gas.

Si usted imparte clases, y dentro de sus obligaciones académicas se encuentra explicar el comportamiento de los gases, no olvide discutir el problema del peso del aire con sus alumnos. Y para aquellos que han padecido noches de insomnio devanándose los sesos con este espinoso acertijo, espero que en adelante disfruten de un sueño grato y reparador.

¿Quiere saber más?

Deseamos determinar la fuerza promedio que el impacto de una molécula de aire ejerce sobre el fondo del recipiente. Para ello, imaginemos que dentro de este último existe una sola molécula, representada por una minúscula bolita de masa m . Supongamos que dicha bolita es soltada con rapidez nula desde la parte superior, y que llega al fondo del recipiente con velocidad v , para luego rebotar elásticamente con velocidad $-v$, de modo que la bolita regresa hasta su posición inicial a una altura h , continuando indefinidamente con un movimiento de vaivén, tal como se ilustra en la siguiente figura,



Desde la parte superior de un recipiente de altura h , una molécula de masa m es soltada con rapidez inicial nula. Luego de transcurrido un tiempo $\Delta t/2$, llega al fondo con velocidad v y rebota elásticamente con rapidez $-v$.

De acuerdo a la segunda ley de Newton, la fuerza promedio F ejercida por la base del recipiente sobre la bolita vendrá dada por su cambio de momentum Δp dividido por el intervalo de tiempo Δt que demora en ir y regresar al punto de partida (recorriendo una distancia $2h$),

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{mv - (-mv)}{\Delta t} = \frac{2mv}{\Delta t} \quad (1)$$

Notemos que debido al principio de acción y reacción, la ecuación (1) también equivale a la fuerza promedio que la bolita ejerce sobre el fondo del recipiente. Por otra parte, al llegar al fondo, una molécula en caída libre adquiere una velocidad v que viene dada por,

$$v = g \frac{\Delta t}{2} \quad (2)$$

donde g es la aceleración de la gravedad ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$), y $\Delta t / 2$ es el tiempo que la bolita demora en ir desde la parte superior del recipiente hasta su base (recorriendo una distancia h). Introduciendo (2) en (1) resulta,

$$F = \frac{2m}{\Delta t} \times \frac{g\Delta t}{2} = mg$$

Hemos demostrado que la fuerza promedio ejercida por la molécula contra el fondo es igual a su peso mg . Ahora bien, si suponemos que existen N moléculas dentro del recipiente, donde N es del orden del número de Avogadro (10^{23}), entonces el peso P del aire será igual a la suma de los pesos de cada una de las moléculas que lo constituyen, vale decir,

$$P = N \times mg$$

Enfaticemos que aun cuando el aire no está en contacto con el fondo del recipiente en todo momento, los pequeños impactos le transmiten una fuerza cuyo valor promedio a través del tiempo vendrá dado por esta última ecuación.

Jorge Pinochet I.
Licenciado en Física, Universidad Católica de Chile