

Los hemisferios de Magdeburgo

El día ocho de mayo de 1654 la ciudad alemana de Magdeburgo fue testigo de un acontecimiento memorable. Aquel día, los poderosos príncipes de Alemania, encabezados por el emperador Fernando III, aguardan expectantes el comienzo de un singular espectáculo. Frente a ellos se encuentran dos hemisferios de cobre, dispuestos uno contra otro para formar una esfera herméticamente cerrada de aproximadamente medio metro de diámetro. Cada hemisferio posee, además, cuatro argollas por las cuales pasa un conjunto de sogas unidas firmemente a dos grupos de ocho caballos cada uno, ubicados a ambos lados de la esfera. Repentinamente, y sin más preámbulos, se da inicio al espectáculo. Ambos grupos de caballos empiezan a tirar en sentidos opuestos, intentado separar los hemisferios. En un principio, los esfuerzos resultan en vano (ver figuras 1 y 2). La selecta audiencia se encuentra estupefacta. Difícilmente pueden dar crédito a lo que están presenciando. No es para menos, si pensamos que ambos hemisferios se encuentran unidos por... ¡simple contacto! Sólo después de mucho trabajo, los caballos consiguen su objetivo, provocando un gran estruendo que semeja al disparo de un cañón.

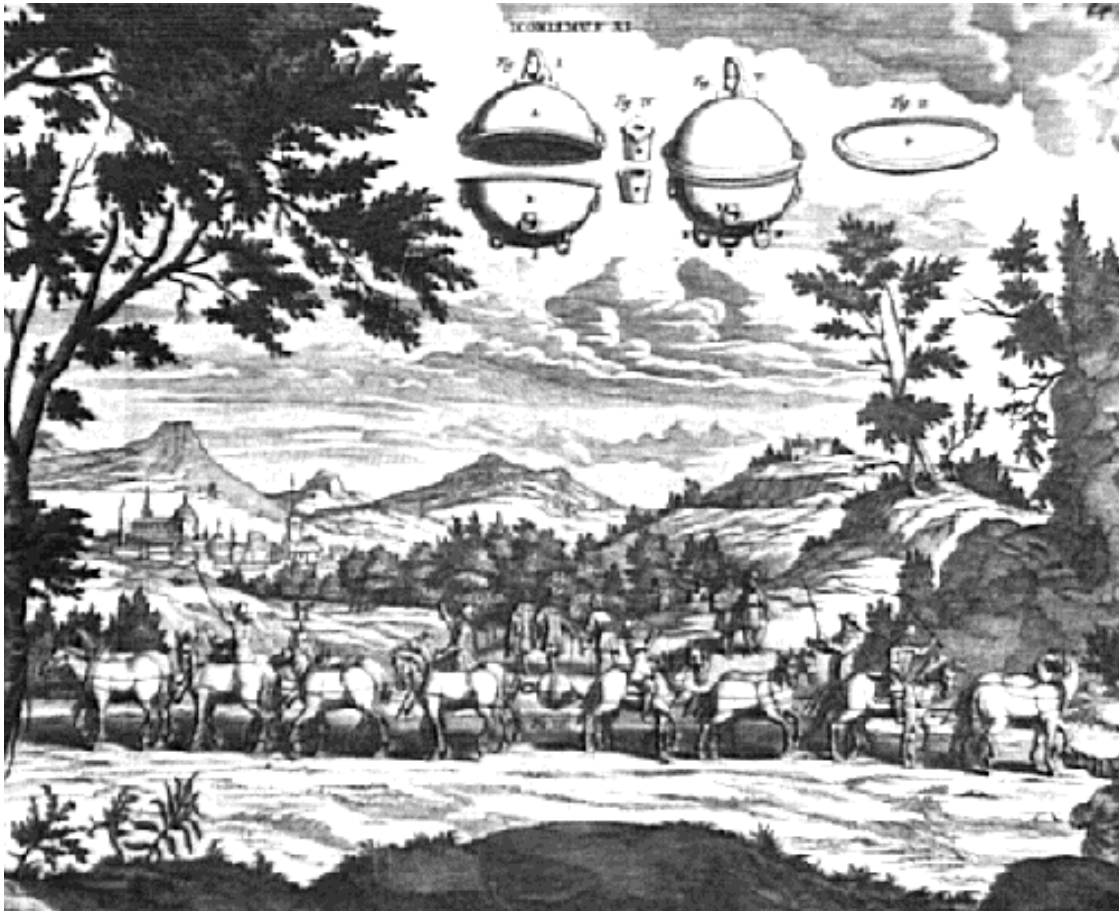


Figura 1. Ilustración del libro de Otto Von Guericke que muestra su célebre experimento. En la parte superior se aprecian algunos detalles de la unión de los hemisferios. En la parte inferior se logran distinguir los dos grupos de ocho caballos cada uno, tirando de los hemisferios en sentidos opuestos.

Otto Von Guericke no ha defraudado a sus espectadores. No podía ser de otro modo, tratándose del ilustre alcalde de Magdeburgo, creador de la bomba de vacío, explorador de los fenómenos electrostáticos, y sin duda alguna, el más grande exponente del renacimiento alemán junto a Johannes Képler.

El secreto del espectacular experimento de Von Guericke reside en un hecho al mismo tiempo simple y notable: el aire del interior de la esfera había sido parcialmente evacuado haciendo uso de una bomba de vacío. Por supuesto, comparada con los estándares actuales, aquella evacuación resulta bastante modesta. Sin embargo, para mediados del siglo XVII se trataba de un experimento único en su género, realizado con un instrumento también único. Sin la bomba de vacío, recién creada por el genio de Von Guericke, el experimento habría sido irrealizable.

Para comprender lo que presencié el emperador Fernando III, debemos recordar que nuestra vida transcurre en el interior de un gigantesco océano de aire, y este, como cualquier fluido, tiene masa, de modo que un determinado volumen de aire tiene un peso que es capaz de ejercer fuerza sobre los objetos que se encuentran sumergidos en él. Pero estas fuerzas no actúan simplemente como si se tratara de una pila de ladrillos depositada sobre nuestras cabezas. El asunto es un poco más complicado, puesto que todo cuerpo sumergido en este océano de aire, es sometido a la acción de un conjunto de fuerzas que tienden a comprimirlo, y que actúan sobre cada punto de su superficie. Además, dichas fuerzas se ejercen siempre en forma perpendicular a la superficie en cuestión. Del mismo modo, si el aire está encerrado en un recipiente, las paredes de este experimentan en cada punto una fuerza perpendicular a su superficie que tiende a expandirlo. Para comprender con más detalle este fenómeno, debemos recordar que el aire está compuesto por una enorme cantidad de moléculas, que bien puedes imaginar como microscópicas esferas que se mueven aleatoriamente en todas direcciones, chocando y rebotando contra cualquier objeto que se encuentre en su camino. Cada una de estas minúsculas colisiones genera una pequeña fuerza, que sumada al sinnúmero de impactos que se suceden ininterrumpidamente en cada segundo, puede llegar a generar una fuerza considerable. El efecto neto de este incesante golpeteo molecular es un conjunto de fuerzas puntuales que siempre están dirigidas en forma perpendicular a la superficie de impacto¹.

Para describir este golpeteo molecular, resulta muy conveniente introducir una cantidad denominada *presión*, definida como la magnitud de la fuerza dividida entre el área sobre la que actúa. En otras palabras, la presión puede entenderse como la fuerza que se ejerce en cada unidad de área sobre la superficie de un objeto. De esta forma, si consideramos una superficie plana A , y hemos determinado la presión P sobre ella, es decir, conocemos la fuerza por unidad de superficie, entonces la fuerza total que actúa sobre A se obtiene del siguiente modo:

$$Fuerza = P \times A$$

Una consecuencia inmediata de nuestra descripción microscópica del aire es que la presión ejercida por éste es proporcional a su densidad, es decir, depende en forma directa del número de moléculas de aire por unidad de volumen. Desde luego, este resultado tiene un rango de validez mucho más amplio del que aquí se sugiere, pues se trata de una propiedad general de los fluidos, vale decir, es aplicable tanto a líquidos como a gases. Para poner un ejemplo sencillo, consideremos un recipiente cúbico herméticamente cerrado, de paredes muy delgadas, y de un

¹ Cabe señalar que la descripción molecular introducida aquí, llamada *teoría cinética de los gases*, era desconocida en la época en que Von Guericke desarrolló sus investigaciones sobre el vacío. De hecho, la teoría cinética fue desarrollada por el matemático suizo Daniel Bernoulli medio siglo después de la muerte de Von Guericke.

centímetro de arista, de modo que su volumen sea de un centímetro cúbico. Supongamos, además, que en su interior se encuentra un gas muy rarificado, cuya densidad es de mil moléculas por centímetro cúbico. De acuerdo a nuestros supuestos se concluye que existen mil moléculas que están permanentemente impactando y rebotando sobre cada una de las caras interiores del recipiente. Si ahora reducimos la densidad del gas a la mitad, utilizando el mismo recipiente, entonces habrá sólo quinientas moléculas rebotando sobre la misma superficie de antes, de manera que la presión sobre cada una de las caras también se habrá reducido a la mitad.

¿Cuánto vale la presión atmosférica? En números redondos, tiene un valor aproximado de 100.000 pascuales (Pa). Esto significa que un metro cuadrado de superficie plana experimenta una fuerza de 100.000 newtons (N); una cantidad nada despreciable tomando en cuenta que equivale al peso de un objeto de 10.000 kilogramos (kg). Para expresarlo en términos más familiares, si consideramos que el tórax de una persona promedio posee una superficie plana de 0,13 metros cuadrados (m^2), entonces la fuerza total ejercida por la atmósfera sobre el tórax tiene un valor de $100.000 Pa \times 0,13 m^2 = 13.000 N$. Esta fuerza es comparable al peso de un objeto de 1.300 kg, vale decir, ¡más de una tonelada! ¿Porqué no colapsamos bajo esta enorme fuerza? Pues bien, sucede que nuestro organismo se ha evolucionado en un ambiente dominado por estas presiones, y se encuentra perfectamente adaptado a su entorno físico. Dicha adaptación se traduce en un perfecto equilibrio de fuerzas. En otras palabras, la presión en el interior de nuestro cuerpo es la misma que en el exterior, de manera que la fuerza resultante es nula. Para poner un ejemplo un tanto macabro, si ahora fueses transportado instantáneamente al espacio interplanetario, tu cuerpo explotaría, porque la presión en tu interior sobrepasa con mucho a las minúsculas presiones que imperan en el espacio exterior. Lo contrario ocurriría si fueses transportado a una gran profundidad bajo el océano, porque terminarías aplastado y comprimido hasta el tamaño de un embutido de sardinas, debido a las enormes presiones que allí existen.

Ahora podemos comprender fácilmente el experimento de Von Guericke, recordando que el interior de la esfera había sido sometido a un vacío parcial. En efecto, dado que en el interior de los hemisferios la densidad del aire era muchísimo menor que en el exterior, tenemos que la presión ejercida desde fuera superaba ampliamente a la presión dentro de la esfera. Por lo tanto, la misteriosa fuerza que impedía separar los hemisferios provenía, nada más y nada menos, que del mismo aire que en aquel momento respiraba el emperador y su comitiva, un hecho que seguramente Fernando III desconocía. Para tener una idea de la extraordinaria hazaña realizada por Von Guericke, basta señalar que cualquier filtración, por pequeña que fuera, habría sido suficiente para equiparar rápidamente las presiones interior y exterior, dando como resultado que los hemisferios se separaran por si solos, puesto que se encontraban unidos por simple contacto. De acuerdo a los datos de que disponemos, parece razonable suponer que la presión en el interior de la esfera halla sido un diez por ciento de la presión atmosférica. Usando este valor, después de un calculo bastante simple (ver apéndice) se encuentra que la fuerza necesaria para separar los hemisferios es de aproximadamente 18.000 newtons (N), lo que equivale al peso de un objeto de 1.800 kg, es decir, un poco menos de dos toneladas. Se trata sin duda de una fuerza considerable, que explica las enormes dificultades que tuvieron los caballos para separar los hemisferios.

Antes de terminar, quisiera llamar tu atención sobre un pequeño y delicioso detalle del experimento de Von Guericke que no puedo pasar por alto. El gran sabio alemán podría haber efectuado su demostración utilizando tan solo la mitad de los caballos. De hecho, le hubiese bastado con amarrar uno de los hemisferios a un árbol robusto, manteniendo el otro hemisferio unido a los 8 caballos restantes, para generar exactamente la misma fuerza que valiéndose de 16 caballos, lo cual habría resultado mucho más simple y económico. ¿Era consciente Von Guericke de esta sutileza? Por desgracia, nunca lo sabremos.

¿Quieres saber más?

Sean F_0 y F las magnitudes de las fuerzas que actúan sobre cada hemisferio debidas, respectivamente, a la presión atmosférica P_0 y a la presión interna P (ver figura 2), y sea R el radio de la esfera, cuyo espesor supondremos despreciable.

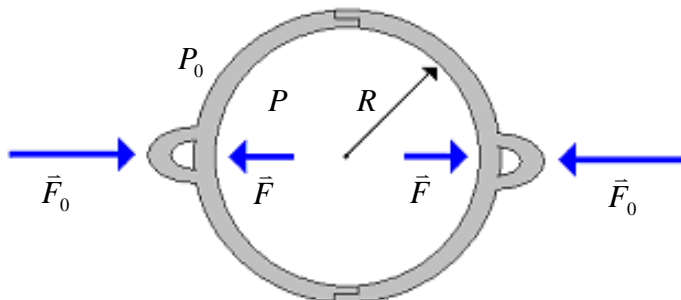


Figura 2. Cada hemisferio se encuentra sometido a una fuerza externa de magnitud F_0 debida a la presión atmosférica P_0 , y a una fuerza interna de magnitud F debida a la presión P dentro de la esfera. Por tanto, la magnitud de la fuerza neta sobre cada hemisferio apuntará hacia el interior de la esfera y vendrá dada por: $F_{neta} = F_0 - F$.

Antes de que los caballos comiencen a tirar, la magnitud de la fuerza neta sobre cada hemisferio será igual a la diferencia entre la fuerza debida a la presión exterior y la presión interior,

$$F_{neta} = F_0 - F$$

La superficie efectiva sobre la que actúan ambas presiones será aquella comprendida por un círculo de radio R . Por lo tanto, la fuerza neta ejercida sobre un hemisferio cualquiera será:

$$F_{neta} = \pi R^2 P_0 - \pi R^2 P = \pi R^2 (P_0 - P)$$

donde πR^2 corresponde al área, de modo que $\pi R^2 P_0$ es la fuerza exterior que tiende a unir los hemisferios, y $\pi R^2 P$ es la fuerza interior, que tiende a separarlos. Tomando $R = 0,25m$, $P_0 = 100.000Pa$ y $P = 0,1P_0$ se obtiene

$$F_{neta} = \pi \times (0,5m)^2 \times 0,9 \times 10^5 Pa \approx 18.000N$$

Un cuerpo cuyo peso sea de $1800N$ tendrá una masa de,

$$m = \frac{18.000}{g} \approx 1.800kg = 1,8 \text{ toneladas}$$

donde hemos tomado $g = 10m/s^2$.

Jorge Pinochet I.

Licenciado en Física, Universidad Católica de Chile