

CAPITULO II

DILATACIÓN DE LOS CUERPOS Y TERMOMETRÍA

I

FENÓMENOS GENERALES DE DILATACIÓN

Todos los cuerpos aumentan de volumen ó *se dilatan* cuando se calientan, cualquiera que sea su estado físico, exceptuándose unos pocos de los que nos ocuparemos más adelante. Por el contrario, cuando se enfrían *se contraen*. Describamos algunos experimentos con los cuales se demuestra fácilmente esta propiedad, que lo mismo poseen los sólidos que los líquidos ó los gases.

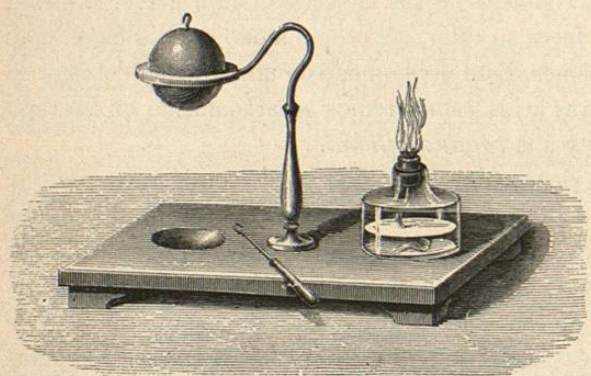


Fig. 507.—Anillo de 'S Gravesande. Dilatación de los sólidos por el calor

Supongamos una esfera metálica y una anilla de la misma materia y de dimensiones tales que, en condiciones térmicas semejantes, la esfera puede pasar á frotamiento suave por la abertura de la anilla. Si se calienta la bola aisladamente y se la pone sobre la anilla, no puede ya pasar por ella, lo que prueba que se ha dilatado de resultas del calor; pero si se la deja enfriar y volver á su estado primitivo, pasará de nuevo. Si, por el contrario, se calienta la anilla, la esfera metálica pasa con facilidad al través de la abertura, de lo cual se deduce que esta abertura se ha agrandado ó que la anilla se ha dilatado. Por último, si se calientan la anilla y la esfera al mismo tiempo, ambas aumentan de volumen á la vez y conservan las mismas relaciones de posición que en un principio. Conócese este pequeño aparato con el nombre de *anillo de 'S Gravesande*, del nombre del físico holandés que lo ideó.

Los académicos de Florencia habían demostrado, con un experimento análogo, la dilatación que los sólidos experimentan á causa de un aumento de calor. En vez de una esfera, empleaban al efecto un cono metálico que el anillo abarcaba á diferentes alturas, según que se los calentaba á uno ó á otro separadamente. Si el aumento de calor era el mismo para el anillo y para el cono, es decir, si á ambos se les calentaba á la vez y del mismo modo, aunque aisladamente, el anillo bajaba por el cono hasta una altura invariable. Este último hecho nos proporciona una primera indicación importante acerca del modo cómo se dilatan las vasijas de cualquier forma, cilíndrica, cónica, etc. Su cambio de volumen se efectúa como si la vasija estuviese llena de la misma



Fig. 508.—Dilatación de los sólidos.

substancia que la forma; su capacidad interior varía como variaría el volumen del núcleo sólido de que hablamos, estando en las mismas condiciones térmicas. Ya volveremos á ocuparnos de este asunto.

La dilatación de los cuerpos sólidos por el calor se efectúa en todos sentidos, de suerte que una barra de hierro que tenga la forma de un paralelepípedo aumenta en sus tres dimensiones, anchura, longitud y grueso. De aquí resultan tres clases de dilataciones: la cúbica, la superficial y la lineal, la última de las cuales se hace patente con el aparato representado en la figura 509, y el cual consiste en una barra metálica sujeta invariablemente por uno de sus extremos: calentada en toda su longitud, se dilata libremente por el extremo que se apoya en el brazo menor de una palanca acodada, de suerte que la aguja que forma el brazo mayor de la misma palanca describe en un cuadrante graduado un arco tanto mayor cuanto más considerable sea á su vez la relación entre las longitudes de ambos brazos. De este modo se hacen perceptibles hasta

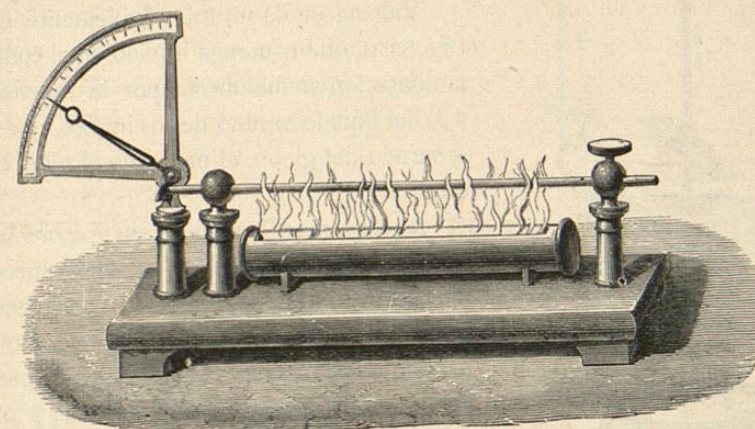


Fig. 509.—Dilatación lineal de una barra sólida

las menores prolongaciones de la barra, que con dificultad se podrían medir directamente. Por ejemplo, bastará trasladar semejante aparato de una habitación fría á otra caliente para que la aguja se ponga en marcha.

La variación del calor produce en los líquidos variaciones de volumen mucho más marcadas que en la mayoría de los cuerpos sólidos. He aquí uno de los medios de que se hace uso para poner en evidencia la dilatación de los líquidos.

Tómase un globo de vidrio al cual está soldado un tubo abierto de reducido diámetro; se le llena del líquido que se quiere someter á prueba, y se marca con una raya *a* el punto hasta donde sube en el tubo (fig. 510). Metiendo entonces el globo en agua más caliente que el líquido, se puede observar fácilmente el movimiento de éste en el tubo. Al principio se ve bajar el nivel de *a* á *b*, lo cual consiste en que la envoltura de vidrio es la primera que recibe la acción del calor. Su capacidad crece antes que el volumen del líquido interior haya podido compensar este aumento con su dilatación propia. Pero al poco tiempo la contracción aparente cesa, y el líquido sube poco á poco hasta un punto *a'* en el que se fija cuando se ha restablecido el equilibrio. Si el aparato se enfría, el nivel bajará poco á poco hasta recobrar por último su altura primitiva.

Los líquidos de diferente naturaleza no se dilatan con igualdad en las mismas circunstancias, es decir, siendo el mismo el aumento de calor. Pero todos, casi con una sola excepción de la que en breve nos ocuparemos (la del agua), aumentan ó disminuyen de volumen, según que se calienten ó se enfríen.

Por último, los gases son también más dilatables que los líquidos; así es que basta acercar al fuego una vejiga herméticamente cerrada y llena á medias de aire para ver cómo se infla poco á poco, y por consiguiente el aire que contiene aumenta de volumen con el calor. Demuéstrase también de otro modo la dilatibilidad del aire ó de cualquier otro gas por efecto de un aumento de calor, para lo cual se toma un globo de vidrio terminado en un largo tubo capilar abierto en su extremo. El globo está lleno del gas cuya dilatación se desea comprobar y que está separado del aire exterior por un índice de mercurio. Tan luego como se calienta el globo, aunque sea ligeramente,

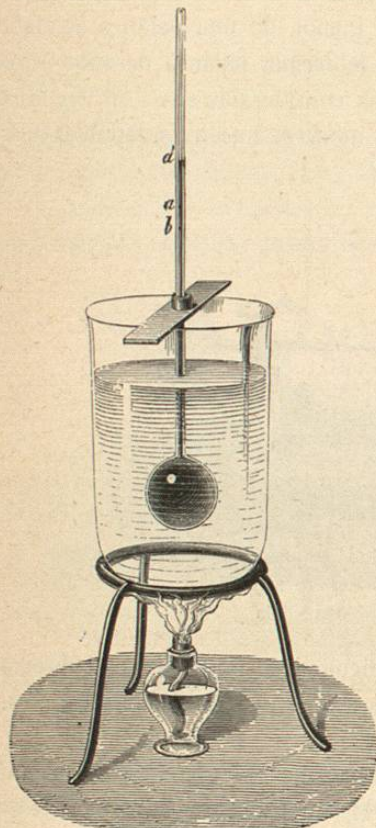


Fig. 510.—Dilatación de los líquidos por el calor

por ejemplo aplicando á él las manos (fig. 511), el gas interior se calienta también, se dilata y expulsa el índice fuera del recipiente. Al enfriarse el gas, su volumen disminuye y el índice recobra su posición primitiva.

Valiéndose de un tubo doblemente encorvado (fig. 512), que contenga líquido en el codo inferior, la dilatación se manifiesta por la ascensión, de *a* á *b*, del líquido en uno de los brazos, que es el más separado del globo, al paso que el nivel baja en el otro.

Al consignar Desains en sus *Lecciones de Física* que el holandés Drebbel fué quien hizo á principios del siglo xvii los primeros experimentos sobre la dilatación del aire por el calor, cita un curioso párrafo de Herón de Alejandría, que prueba que los antiguos conocían ya el fenómeno y aun que lo habían aprovechado para producir efectos bastante curiosos. He aquí dicho párrafo:

“Tratábase de hacer de modo que “las puertas „de un templo se abriesen por sí mismas en el „momento en que se encendiera el fuego sagrado „en un ara situada en el vestíbulo.” El ara era de bronce, hueca interiormente, y comunicaba por un conducto con un odre colocado en un sótano debajo de las puertas. El odre estaba distendido y estirado por un peso. Cuando se encendía el fuego

sagrado, el aire del ara, dilatado por el calor, pasaba al odre, que se hinchaba encogiéndose y levantando de este modo el peso, y este movimiento se transmitía por medio de cuerdas á un eje vertical á cuyo extremo estaba unida la puerta; y la rotación del eje la obligaba á abrirse. Cuando se apagaba el fuego, el enfriamiento del aire hacía que el peso motor bajase hasta volver á su primera posición, y la puerta se cerraba.”

Las variaciones de volumen por efecto de las de calor constituyen un fenómeno general que lo mismo se observa en los líquidos y en los gases que en los sólidos. Las excepciones de esta ley sólo son aparentes, ó se limitan á casos particulares, y más adelante veremos qué interpretación puede darse á éstos. La madera y la mayoría de los vegetales se contraen cuando se los calienta, lo cual proviene del agua que pierden por evaporación; pero cuando están enteramente secos, se dilatan como los demás sólidos. La arcilla, bien seca, se contrae tanto más cuanto más intenso es el calor á que

se la somete; pero resultando un estado químico en la substancia, un principio de vitrificación, pues cuando el pedazo de arcilla se enfría no recobra ya su volumen primitivo. Por último, cuando el agua está á punto de congelarse, se dilata al enfriarse, anomalía que dimana sin duda de una modificación en la forma y disposición de las moléculas (1).

Puesto que el volumen de cualquier cuerpo varía con su temperatura, sin que haya alteración en su peso, es evidente que su peso específico varía también; disminuye cuando el cuerpo se calienta, aumenta cuando se enfría, de suerte que este elemento exige, como lo hemos visto en nuestro primer volumen, ó que se opere á la temperatura fija de cero, ó que, si esto no es posible, se conozca la cantidad en que aumenta

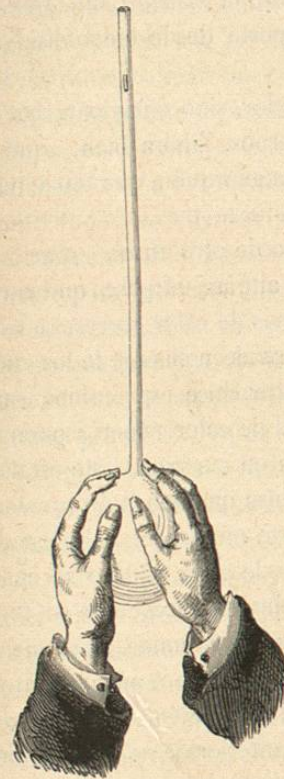


Fig. 511.—Dilatación de los gases por el calor

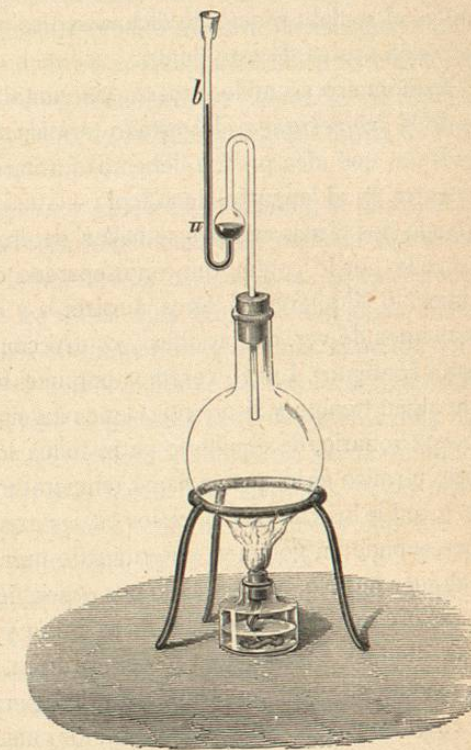


Fig. 512.—Dilatación de los gases

el volumen por cada aumento de su grado de calor. En semejante caso, también es necesaria la medida de la temperatura. Merced á estos datos y á una corrección conveniente, se obtiene el peso específico ó la densidad del cuerpo á cero.

En todo cuanto precede, lo propio que en todas nuestras descripciones anteriores de los fenómenos físicos, luminosos, eléctricos ó sonoros, hemos supuesto que se conocía el uso del termómetro y la definición de su graduación. De este modo nos hemos encerrado, por decirlo así, en un círculo vicioso; pero esto es inevitable en las ciencias físicas, en que los fenómenos de distinta naturaleza dependen con frecuencia unos de otros. Ha llegado, sin embargo, el momento de detenernos en tan importante punto y de describir con algunos detalles el precioso instrumento que acabamos de nombrar:

(1) Sin embargo, más adelante veremos que M. Fizeau ha echado de ver una excepción en la ley general de la dilatación de los sólidos por el calor: el yoduro de plata se contrae y recobra su volumen cuando se le vuelve á su primera temperatura. Esta excepción singular no parece susceptible de las explicaciones que acabamos de dar relativamente á la madera, á la arcilla y al agua.

pues en efecto, su construcción está basada precisamente en los fenómenos de dilatación. Cuando hayamos terminado esta descripción, completaremos lo que nos queda por decir acerca de estos últimos.

II

DEFINICIÓN DE LA TEMPERATURA. — SU MEDICIÓN CON EL TERMÓMETRO

Las palabras *termometría* y *termómetro* significan, refiriéndonos á su etimología literal, *medida del calor*, instrumento que tiene por objeto la *medida del calor*. Pero este no es el sentido exacto de dichas expresiones, é importa desde luego disipar toda idea errónea acerca de este punto.

El termómetro no mide ó marca las cantidades de calor, sino solamente las variaciones de la *temperatura*, del estado térmico de los cuerpos. Ahora bien, ¿qué es la temperatura, qué idea precisa debemos formarnos de esta expresión, que tan á menudo se encuentra en el lenguaje científico?

Cuando dos ó más cuerpos se hallan en presencia uno de otro en un espacio limitado, sucede por lo común que unos pierden calor ó se enfrían, al paso que otros se calientan ó lo adquieren. A estos aumentos y disminuciones de calor corresponden, según acabamos de ver, dilataciones y contracciones, cambios de volumen de los cuerpos que están contiguos. Luego veremos por qué manera se produce este cambio que, al cabo de algún tiempo y si no interviene ningún manantial de calor, viene á parar á un estado estacionario, de equilibrio entre todos los cuerpos en cuestión. Este estado de equilibrio térmico es lo que se llama temperatura, diciéndose que tienen *la misma temperatura* todos los cuerpos entre los cuales existe, en cierto momento, dicho estado al cual corresponde un volumen determinado para cada uno de ellos. Si uno se calienta por cualquier motivo, aumentando por consiguiente de volumen, dícese que su temperatura *sube*; y que *baja* si el cuerpo se enfría y disminuye de volumen. Pero siempre que, tras algunas variaciones de temperatura, de calentamientos ó enfriamientos, el cuerpo recobra su volumen primitivo, su temperatura vuelve también á ser la misma, y puesto en presencia de los sistemas con los cuales estaba anteriormente en equilibrio y que, por hipótesis, no han cambiado, resultará otra vez equilibrado con ellos. La experiencia demuestra en definitiva que á una cantidad de materia dada é invariable de cierta substancia corresponde, respecto á un estado térmico particular, un volumen determinado del cuerpo; de lo cual se desprende que las variaciones de la temperatura se pueden medir por las variaciones de volumen ó las dilataciones. Y en efecto, supongamos que se toma un cuerpo sólido, líquido ó gaseoso y que se haga de modo que la cantidad de materia de que se compone subsista invariable, ó, si se quiere, que su peso sea siempre el mismo. Concíbese la posibilidad de medir, cuando se calienta ó se enfría, ya su volumen mismo ó bien las variaciones de este volumen. Pues estas variaciones ó grados son precisamente los que servirán de medida del calentamiento ó enfriamiento del cuerpo, de suerte que siempre que tenga el mismo volumen determinado, será fácil cerciorarse de que se halla en el mismo estado térmico, que está á la misma temperatura.

Pero si estas variaciones de volumen pueden servir para indicar los cambios que sobrevienen en la temperatura de los cuerpos, hay que guardarse de creer que medirían también las cantidades de calor que han servido para producirlos. Después vere-

mos que, en efecto, para hacer subir un mismo número de grados la temperatura de cuerpos diferentes, por ejemplo un kilogramo de agua y otro de hierro, oro ó mercurio, no puede ser, ni con mucho, la misma la cantidad de calor que para ello se emplee.

Vese, pues, según las precedentes consideraciones, que un termómetro no es otra cosa sino un cuerpo cuyas variaciones de volumen, determinadas por las de su propia temperatura, se saben medir. Acercándolo, ó mejor aún, poniéndolo en contacto con cualquier otro cuerpo, se pondrá en equilibrio térmico con él, y por esto mismo indicará la temperatura de este cuerpo; pero no la anterior al contacto, sino la de equilibrio. Convendrá, pues, hacer que la diferencia entre estas dos temperaturas sea la menor posible, para lo cual será preciso que la masa y la naturaleza de la substancia que forman el instrumento sean tales que el contacto no modifique sensiblemente la temperatura del cuerpo puesto á prueba. Por esto se han de tener en cuenta ciertas condiciones particulares en cuanto se refiere á la elección de la substancia que se ha de emplear para la construcción del termómetro.

Como todos los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos se dilatan, se podrían tomar unos ú otros indiferentemente por cuerpos termométricos, y en realidad se los emplea igualmente para este uso. Mas para las temperaturas usuales y las observaciones corrientes se prescinde de los sólidos y de los gases. Los primeros son poco dilatables, cuando no son muy grandes las variaciones de temperatura; además, la acción del calor modifica su estructura molecular, de suerte que al enfriarse no recobran rigurosamente su volumen primitivo. Así es que sólo se les usa para medir temperaturas muy altas, y para distinguir á estos aparatos de los termómetros comunes se les da el nombre de *pirómetros*. Con todo, describiremos algunos aparatos muy sensibles, cuyas indicaciones están basadas en las desigualdades de dilatación de los metales, y que son muy á propósito para marcar tenues y rápidas variaciones de temperatura.

Si los sólidos se dilatan demasiado poco, no sucede lo mismo con los gases, cuyas notables variaciones de volumen los hacen eminentemente propios para indicar diferencias de temperatura apenas perceptibles. Por desgracia, junto á esta ventaja adolecen de un grave inconveniente: sus cambios de volumen no dependen de su sola temperatura, sino que sufren la acción de las variaciones de presión, de suerte que el uso del termómetro de gas, que por otra parte es un aparato molesto y no portátil, se complica con la observación del barómetro y con los cálculos necesarios para las reducciones á una presión constante.

Por consiguiente, se ha dado á los líquidos la preferencia, y entre éstos al mercurio y al alcohol, que son los más comúnmente usados. Al primero se le obtiene puro fácilmente; subsiste líquido á una temperatura muy elevada y no se solidifica sino á temperaturas muy bajas; su dilatación es regular, y su conductibilidad, es decir, la rapidez con que se calienta ó enfría, es mayor que la de todos los demás líquidos. En cuanto al alcohol, si se reduce á vapor á una temperatura poco elevada, en cambio no se le ha podido congelar, sea cualquiera el grado de frío á que se le haya expuesto, lo que le hace sumamente á propósito para medir temperaturas bajas. Así pues, con un termómetro de mercurio y otro de alcohol se pueden medir todas las temperaturas comprendidas entre las más bajas que se conocen y la de la ebullición del mercurio. Pero como el primero de estos aparatos es el que sirve para graduar el segundo, su descripción habrá de preceder naturalmente á la del otro. Digamos, pues, qué operaciones requiere la construcción de un termómetro de mercurio.

III

TERMÓMETRO DE MERCURIO. — CONSTRUCCIÓN Y GRADUACIÓN

El termómetro de mercurio se compone de un tubo de vidrio de diámetro interior muy reducido ó capilar, cerrado por un extremo y terminado por el otro en un recipiente esférico ó cilíndrico (fig. 513). El recipiente y una parte del tubo contienen mercurio perfectamente puro, y la otra parte está enteramente purgada de aire y de cualquier otro gas. Como la capacidad interior del tubo no es más que una pequeñísima

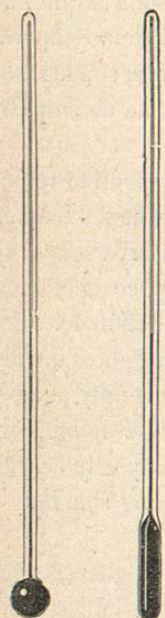


Fig. 513.—Depósito y tubo del termómetro de mercurio.

fracción de la capacidad del recipiente, la menor variación de volumen de éste se conocerá por un cambio notable del nivel del mercurio en el tubo. Para medir estas variaciones, se ha convenido en marcar en el tubo del termómetro dos puntos que corresponden á dos temperaturas desiguales, pero una y otra fijas é invariables, y en dividir en cierto número de capacidades iguales el aumento total de volumen que experimenta el instrumento al pasar de la temperatura más baja á la más alta. Habiendo demostrado la experiencia que el hielo se funde siempre á la misma temperatura, y que la del agua hirviendo es también constante cuando la presión barométrica es de 760 milímetros, se ha convenido en adoptar estas dos temperaturas fijas como puntos de partida para la graduación del termómetro de mercurio. Antes de decir cómo se procede para esta graduación, ocupémonos de algunos puntos importantes de la manipulación que tiene por objeto la elección del tubo, y el modo de llenarlo de mercurio bien purificado y purgado de aire.

La pureza del mercurio es una de las principales condiciones que se deben llenar para tener un buen termómetro. He aquí cómo se expresa Buignet acerca de este punto en sus excelentes *Manipulaciones de física*:

“El mercurio que se encuentra en el comercio y que ha permanecido algún tiempo en las cubetas de nuestros laboratorios contiene

siempre óxido de mercurio, y aun con frecuencia metales extraños, como zinc, cobre y plomo. La presencia de estos metales modifica profundamente sus propiedades físicas, y entre otros caracteres le da el de adherirse al vidrio, dejando en él una huella de su paso y siendo por tanto impropio para los usos termométricos.

„La destilación es un medio de purificación muy incompleto. En el momento en que el mercurio entra en ebullición, los metales que le acompañan emiten vapores cuya tensión es muy sensible, y que el vapor mercurial arrastra consigo fácilmente. Hay, pues, que recurrir á otro procedimiento: el que, según se considera hoy, da mejores resultados es el tratamiento por el ácido nítrico.

„Este procedimiento consiste en introducir en un frasco de vidrio el mercurio que se quiere purificar, y en añadir 0,01 en peso de ácido nítrico á 1,42 previamente diluido en dos veces su volumen de agua. Pónese la vasija en un baño de María á 50° ó 60°, y se la tiene en él veinticuatro horas, agitando con frecuencia la mezcla. Al cabo de este tiempo, se quita por decantación la solución que sobrenada, la cual se lleva los metales extraños, y en seguida se lava el mercurio así purificado y se le seca cuidadosamente.

„El mercurio, expuesto al aire, absorbe el oxígeno de éste, sobre todo durante los calores del verano, y forma óxido de mercurio, que, desde el punto de vista que nos ocupa, adolece de los mismos inconvenientes que los metales extraños de que acabamos de ocuparnos. Cuando se agita el mercurio así alterado, el óxido que contiene se disemina en la masa; pero dejándolo reposar, sube á la superficie y forma en ella una película gris. En los laboratorios de física se acostumbra introducir en un embudo de vidrio provisto de una llave el mercurio ya purificado y seco como acabamos de decir. En el momento de hacer uso de él, se abre poco á poco dicha llave, y se pasa el líquido á una vasija muy limpia y bien seca. De este modo se obtiene mercurio exento de óxido, perfectamente reflejante, que no se adhiere al vidrio ni á la porcelana, y que rueda sobre cualquiera de ambas sustancias sin dejar la menor huella.

Cuando se han observado las minuciosas precauciones necesarias para obtener mercurio de perfecta pureza, se comprende que no sea menos importante introducirlo en un tubo que á su vez esté perfectamente seco y sin polvo alguno. Este es asunto del constructor que proporciona el tubo provisto de su recipiente y de la ampolla terminada en delgada punta por la cual se ha de introducir el mercurio. He aquí cómo se efectúa esta operación.

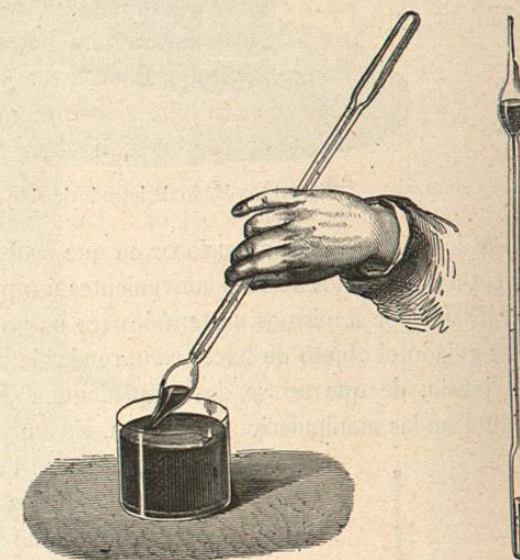


Fig. 514.—Modo de llenar de mercurio el tubo barométrico

Se rompe la punta de la ampolla y se calienta ésta ligeramente sobre una lámpara de alcohol; el aire interior se dilata, y en seguida se mete la punta abierta en el mercurio como se ve en la figura 514. El enfriamiento disminuye la presión interior y el mercurio sube poco á poco por la ampolla llenándola parcialmente. Si se enderezara el tubo, el mercurio permanecería en la ampolla sin poder penetrar en el recipiente, á causa del reducido diámetro del tubo. Pero si se tiene cuidado de calentar á la vez el tubo, el recipiente y la ampolla, poniéndolos sobre una parrilla inclinada llena de brasas (fig. 515), el aire interior se dilata y se escapa formando burbujas. Si se levanta entonces el tubo y se le deja enfriar, el aire interior se contrae y la presión hace entrar una parte del mercurio en el recipiente. Repítense muchas veces esta operación, hasta que por fin se hace hervir el mercurio, y el recipiente y el tubo se llenan enteramente, no conservando ya rastro de humedad ni burbuja alguna de aire.

Si se han calculado de antemano la capacidad del recipiente y la del tubo (1) para que las indicaciones del termómetro comprendan un número de grados determinado, por ejemplo 120°, entre 105° y —15°, se hace de modo que el nivel del mercurio ocupe la parte superior del tubo cuando éste está sometido á una temperatura de 105°. Se

(1) La dilatación aparente del mercurio en el vidrio es de $\frac{1}{6180}$ por 1 grado centígrado. Para 120 grados, la capacidad interior del tubo deberá ser por lo menos $\frac{120}{6,180} = \frac{1}{51,5}$ de la del recipiente. Se adopta un número algo mayor, $\frac{1}{50}$ por ejemplo, que comprende 129°,6.