

hace salir el mercurio de la ampolla, y el nivel baja un poco por enfriamiento. Calentando el extremo del tubo á la lámpara de esmaltar, se le adelgaza, se separa la ampolla limándola y se calienta de nuevo el tubo á 105° . El mercurio se escapa en finas gotitas, y cuando ya no sale más, se cierra la punta del tubo al soplete. En tales condiciones, queda éste absolutamente privado de aire, y cuando el mercurio baja por efecto del enfriamiento, el espacio que deja sobre su nivel es igual al vacío barométrico.

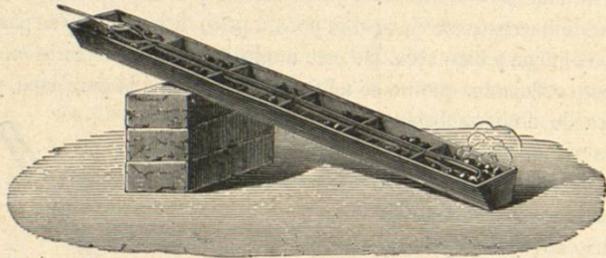


Fig. 515. — Modo de introducir el mercurio en el depósito

Los detalles un tanto minuciosos en que acabamos de entrar, no solamente se encaminan á dar las indicaciones convenientes á aquellos de nuestros lectores que quisieran construir por sí mismos un termómetro un poco exacto, sino que, al enumerarlos, nos ha guiado el objeto de hacer comprender la necesidad, impuesta por los progresos de la ciencia, de que no se descuide ninguna de las condiciones de la más rigurosa exactitud en las manipulaciones de física. En un principio, fuerza fué contentarse con

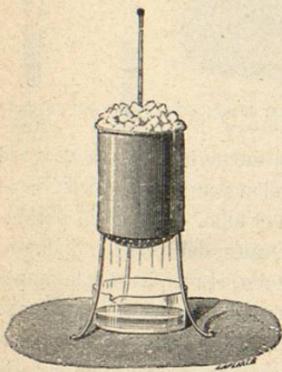


Fig. 516. — Determinación del cero del termómetro de mercurio: temperatura de la fusión del hielo.

aproximaciones á menudo groseras, lo cual bastaba para el estudio de los fenómenos más generales y para la determinación de sus leyes. Así como en astronomía el conocimiento de las más insignificantes perturbaciones de los movimientos de los cuerpos celestes hubiera podido ser causa de que se ignoraran las leyes á que obedecen estos movimientos en su conjunto, así también en física hubiera sido superfluo, perjudicial tal vez, empeñarse en conocer medidas de una exactitud que no se avenía con el estado de la ciencia. Hoy, por el contrario, es de rigor esta exactitud, porque es la condición y la prenda de futuros descubrimientos. Siendo el termómetro uno de los instrumentos más preciosos de los laboratorios de física ó de los observatorios de los fenómenos naturales, hemos aprovechado la ocasión de su descripción para dar una idea de la rigurosa precisión con que se construyen actualmente.

Digamos ahora algo acerca de la última operación que nos resta por describir, la de la graduación del instrumento.

Hemos dicho ya que esta graduación está basada enteramente en la constancia de dos fenómenos: uno, la fusión del hielo, que va á darnos el cero ó punto de partida de la escala termométrica; otro, la ebullición del agua pura al aire libre, ó mejor dicho, el vapor que se escapa de ella, á la presión exterior ó barométrica de 760 milímetros, la cual da una segunda temperatura fija que se ha convenido en designar en grados con

el número 100. Veamos cómo se obtienen prácticamente estos dos puntos fijos en el tubo del termómetro debidamente lleno de mercurio.

Empiézase por determinar el cero. Para ello se introduce el recipiente ó depósito y una parte del tubo en una vasija llena de hielo machacado, y agujereada en su parte inferior á fin de que salga libremente el agua de fusión, que podría adquirir una temperatura más alta que la del hielo fundente (fig. 516). Cuando queda fijo el nivel del

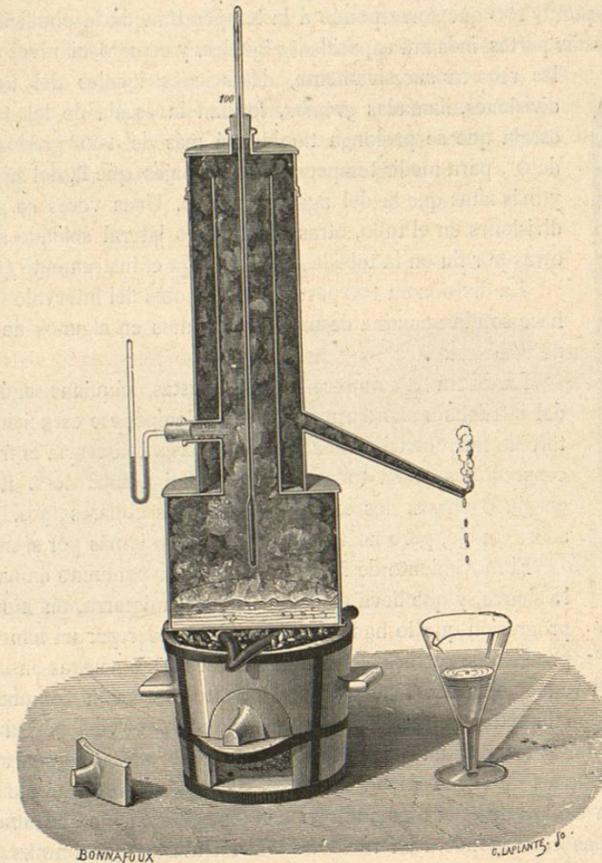


Fig. 517. — Determinación del punto 100, temperatura de la ebullición del agua á 760 milímetros de presión

mercurio en el tubo, se hace una señal en la parte exterior de éste á la misma altura de dicho nivel, y así se tiene el *cero* de la graduación.

En seguida se coloca el termómetro en la posición indicada en la figura 517, es decir, en un baño en el que se le sumerge enteramente en vapor de agua hirviendo; este baño se compone de una doble caja de palastro, por la cual circula el vapor antes de perderse en la atmósfera, de suerte que el enfriamiento exterior no modifica la temperatura de la capacidad interna. Espérase que el nivel del mercurio, observado fuera del baño, adquiera fijeza, y se hace otra señal en el tubo. En este punto se inscribe el número 100, si, como hemos dicho, la presión barométrica es de 760 milímetros en tal

momento (1). El manómetro de brazos corvos, que se ve á la derecha del aparato, indica por la igualdad de nivel del líquido si la presión es la misma dentro que fuera del baño, presión que se observa con el barómetro, y si es mayor ó menor que 760 milímetros, se hace la corrección de que hablamos en la nota que va al pie.

En el caso de que el interior del tubo sea perfectamente cilíndrico, de lo cual es fácil cerciorarse antes de soldar á él el recipiente del termómetro, es evidente que si se divide en 100 partes de igual longitud el espacio que media entre el cero del hielo fundente y el punto 100 que corresponde á la temperatura de la ebullición del agua, cada una de estas partes indicará capacidades iguales, y cuando el nivel del mercurio las recorra sucesivamente, dilataciones iguales del líquido. Estas divisiones, llamadas *grados*, forman la escala de las temperaturas, escala que se prolonga también á más de 100° grados y á menos de 0°, para medir temperaturas más bajas que la del hielo fundente y más altas que la del agua hirviendo. Unas veces se graban estas divisiones en el tubo, otras en un tubo lateral soldado al primero, y otras por fin en la tablilla en que se fija el instrumento (fig. 518).

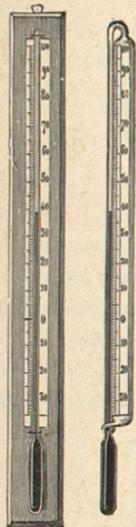


Fig. 518. — Termómetros centígrados con sus escalas graduadas.

La división en 100 partes equidistantes del intervalo 0° á 100° se hace con la máquina de dividir. Entremos en algunos detalles acerca de este punto.

La figura 519 representa una de estas máquinas según el modelo del inteligente constructor Duboscq. Compónese esencialmente de un tornillo micrométrico de acero, cuyo paso á distancia entre dos filetes consecutivos es en todas partes igual á 1 milímetro. Este tornillo, encajado en sus dos extremos entre dos collares fijos, puede girar sobre un eje, pero no avanza ni retrocede jamás por sí mismo.

El movimiento de rotación del tornillo comunica á una tuerca que lo abarca, y que lleva una placa metálica ó carro, un movimiento de progresión que lo hace avanzar ó retroceder por un banco de hierro provisto de carriles, según que el tornillo dé vueltas en un sentido ó en el opuesto. Este movimiento de progresión comprende tantos milímetros y fracciones de milímetro como vueltas ó fracciones de

ellas se hagan dar al tornillo; un manubrio sirve para este objeto, y con un índice se cuentan las fracciones de vuelta en un círculo dividido, centrado en el eje del tornillo y que forma la cabeza de éste. Siguiendo las divisiones del círculo en número de 400, cada una de ellas corresponde á un retroceso ó á un avance de la 400.^a parte de un milímetro. Colócase el tubo que se ha de dividir sobre el carro, sujetándolo á él. En una pieza fija hay un buril que consiste en un punzón de acero ó bien en una punta de diamante, según que se hayan de marcar las divisiones sobre algún barniz ó sobre el tubo de vidrio, de suerte que la punta de dicho buril conservará una posición invariable

(1) Si en el momento del experimento la presión barométrica no es de 760^{mm}, el nivel del mercurio no indicará el punto fijo en que se debe marcar 100°. Se ha reconocido que la diferencia era de un grado centígrado (ó sea la 100.^a parte de la dilatación total entre el punto de fusión del hielo y el de ebullición del agua) para una presión que difiere 27^{mm} en más ó en menos de 760^{mm}, de suerte que será preciso marcar 101° si la presión es de 787^{mm}, y 99° si por el contrario es tan sólo de 733^{mm}. Entre estos límites, se hace una corrección proporcional al exceso ó al defecto de presión. Por ejemplo, si la presión es de 768^{mm}, la temperatura correspondiente deberá ser $100^{\circ} - \frac{8}{27} = 99^{\circ},70$. Si de 795^{mm}, se deberá marcar una temperatura de $100^{\circ} + \frac{8}{27} = 100^{\circ},30$.

con relación á la longitud del tornillo, pero se mueve en el plano vertical que corresponde á esta posición, pudiéndosele subir ó bajar como se quiera.

Se empieza por hacer ocupar al carro dos posiciones sucesivas tales que la punta del buril coincida exactamente ante todo con el punto *cero* del tubo y luego con el punto 100. Esta maniobra da exactamente la longitud del intervalo comprendido entre los dos puntos, si se ha contado el número de vueltas y la fracción de vuelta dadas por el tornillo. Supongamos que hayan resultado 72 vueltas completas, más 100 divisiones; la distancia total entre los puntos fijos será en este caso igual á 172^{mm},25, que corresponden á 68,900 divisiones micrométricas. Cada grado deberá tener 1^{mm},7225, que corresponden á 689 divisiones, es decir, á una vuelta entera más 289 divisiones. Por consiguiente habrá que mover el carro de modo que se haga avanzar sucesivamente la longitud de un grado, dando al manubrio una vuelta entera y 289 divisiones. Cada vez que baje la punta, marcará en el tubo una división.

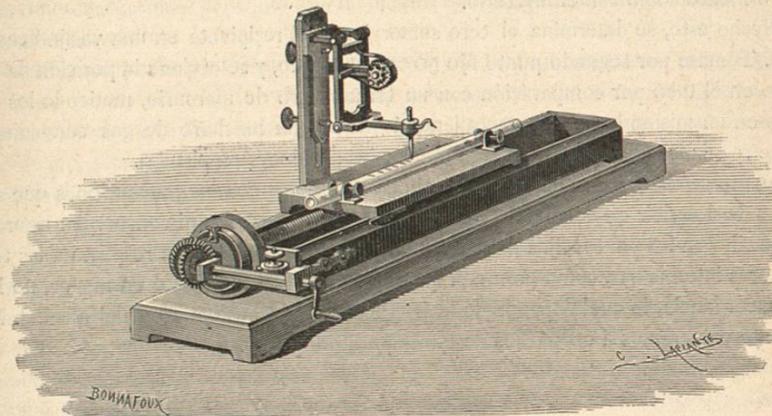


Fig. 519. — Máquina de dividir de Duboscq

En caso de que el calibre del tubo del termómetro no sea perfectamente regular, antes de llenarlo como hemos dicho, habrá que dividirlo en partes de capacidad igual, lo cual se consigue introduciendo una corta cantidad de azogue á la que se hace ocupar sucesivamente, y unas á continuación de otras, partes del tubo cuyos extremos se marcan. Las longitudes de estas partes son desiguales, pero sus volúmenes iguales. Una vez lleno el tubo y determinados los puntos fijos, se podrá calcular fácilmente el valor en grados de una de dichas partes, y por consiguiente la longitud del grado en cada una de ellas. Hechos estos cálculos, la máquina de dividir servirá para completar la graduación, como más arriba queda dicho.

Es obvio que cuanto precede se aplica á la prolongación de las divisiones del tubo termométrico bajo cero y más allá del punto fijo 100. Por último, habrá que hacer las mismas operaciones para la división del termómetro de alcohol, con la única diferencia de que en este caso el número de divisiones sobre 0° no pasa por lo común de 75, por cuanto el alcohol hierve á la temperatura de 78° centígrados (1).

(1) Es la temperatura de la ebullición al aire libre. En el interior del tubo barométrico, el alcohol puede pasar de 78° sin hervir, porque la atmósfera de vapor que se desprende del líquido se opondría á la ebullición. Esto explica cómo ha podido graduar Deluc un termómetro de alcohol, tomando por segundo punto fijo el agua hirviendo ó los 80° Réaumur.

La construcción y graduación de este último termómetro exigen ciertas precauciones especiales de las que diremos algo. El tubo se elige del mismo modo que para el termómetro de mercurio; sólo que como el alcohol, entre 0° y 100°, se dilata unas siete veces más que el mercurio, el tubo, á igualdad de volumen del depósito, debe tener un diámetro mucho mayor que el del destinado á aquel termómetro. La precaución que se debe tomar para elegir el líquido se refiere principalmente á la pureza y homogeneidad del alcohol, que debe ser absolutamente anhidro. Para hacer más visibles las indicaciones de nivel, se acostumbra colorar el alcohol con orchilla; pero, según observa Mr. Buignet, "esta es una adición que debe efectuarse con parsimonia, y hasta prescindir de ella en los termómetros de precisión. La materia colorante, introducida así en el alcohol, sufre siempre al cabo de más ó menos tiempo una descomposición particular cuyo efecto inmediato es depositar un producto insoluble en el vidrio, y perjudicar el movimiento regular del líquido., Para introducir el alcohol en el tubo se procede poco más ó menos como con el mercurio.

Hecho esto, se determina el cero sumergiendo el recipiente en una vasija llena de hielo. Tómase por segundo punto fijo 50° por ejemplo, y se obtiene la posición de este punto en el tubo por comparación con un termómetro de mercurio, metiendo los dos tubos en un mismo baño que se calienta á 50° con un mechero de gas convenientemente regulado, no restando ya sino marcar las divisiones en el tubo.

Los termómetros de mercurio y alcohol, construídos con las precauciones que acabamos de describir en detalle, no son en realidad comparables ni concuerdan rigurosamente sino en los puntos fijos del hielo fundente y en los 50°. Con respecto á las temperaturas intermedias, como para con las que las exceden en más ó en menos, no hay ya concordancia, lo cual depende de la irregularidad de la dilatación del alcohol. Más adelante volveremos á ocuparnos de tan importante punto.

IV

DIFERENTES ESCALAS TERMOMÉTRICAS

La escala centesimal no ha sido la única empleada para graduar los termómetros; pero es la más generalmente admitida, y la única adoptada hoy en Francia y en otros muchos países. Discúrríola el sabio sueco Celsius, quien propuso su adopción en 1741. La escala de Réaumur, casi desechada ya, dividía en 80 grados el intervalo entre los dos mismos puntos fijos, esto es, el de la temperatura del hielo fundente y el de la ebullición del agua. Mediante un cálculo sencillísimo se puede convertir en *grados centígrados* una temperatura expresada en *grados Réaumur*; basta añadir al número dado su *cuarta parte*: por ejemplo, 28° R valen $28 + 7 = 35$ ° C. Si de una temperatura centígrada se resta el quinto, se tendrá la misma temperatura expresada en grados Réaumur: verbigracia, 35° C equivalen á $35 - 7 = 28$ ° R; 32° C equivalen á 25,6 R.

En la escala Fahrenheit, usada en Inglaterra, Alemania y Estados Unidos, uno de los puntos fijos es el de la ebullición del agua, así como en las escalas anteriores; pero el otro corresponde á una temperatura más baja que la del hielo fundente y que resulta de una mezcla de hielo y de sal amoníaco (1). El cero es, pues, más bajo; en el punto

(1) Fahrenheit había tomado para cero de su escala ó para punto de partida de su graduación esta temperatura que no corresponde á un fenómeno físico fijo, porque era la del frío más intenso observado en Dantzic antes de 1714.

de ebullición del agua Fahrenheit marcó 212°. Como se ha visto que la temperatura del hielo fundente correspondía al grado 32° de esta escala, resulta que los 100° de la centígrada corresponden á 180° Fahrenheit; siendo por consiguiente fácil transformar un número cualquiera de grados de una de estas escalas en el otro. Si se desea averiguar, por ejemplo, cuál es en grados centígrados el equivalente de 120° F, se empieza por restar 32, lo cual da 88, y de esta cantidad se toman los $\frac{5}{9}$, resultando 46,66 C. Por el contrario, supongamos que se quiere convertir en grados Fahrenheit la temperatura 45° C; para esto se la multiplica por $\frac{9}{5}$, lo cual da 81° sobre el hielo fundente, ó sea sobre 32° según antes hemos dicho: $81 + 32 = 113$ ° F será, pues, el resultado de la transformación.

También se usa, especialmente en Rusia, la escala Delisle, que marca 0° en el punto de ebullición, y 150° en el del hielo fundente. Es muy sencillo transformar una temperatura de esta escala en alguna de las otras tres. Por ejemplo, 45 grados Delisle equivalen á 30 centígrados, pero hay que deducirlos de 100, puesto que la lectura se hace en sentido inverso.

Tendremos, pues: $45^{\circ} D = 70^{\circ} C = 56^{\circ} R = 158^{\circ} F$. Para ahorrarse estas transformaciones, que no por lo fáciles dejan de ser muy enojosas cuando se multiplican, sería muy conveniente que los físicos y meteorologistas de todos los países conviniesen en adoptar una sola escala termométrica.

Cuando se anuncia una temperatura refiriéndose á cualquiera de estas graduaciones, hay que tener cuidado de expresar si es mayor ó menor que la marcada por el cero. Así lo hacen los físicos considerando las temperaturas más altas que 0° como *positivas* y poniendo delante de ellas el signo +. Las inferiores á 0° son *negativas* y se les antepone el signo —. De la adopción de estos signos resultan para las operaciones que se han de efectuar con los números que expresan las temperaturas, cuando se los combina sumándolos ó restándolos, reglas parecidas á las de las cantidades algebraicas positivas ó negativas. Pero conviene dar á todos estos números su verdadera significación, y no atribuirles un valor absoluto de que carecen. Así, por ejemplo, no se puede decir que una temperatura es doble ó triple que otra, ó por lo menos, si se emplean estas expresiones, no debe deducirse de ellas nada acerca de las cantidades de calor que les corresponden. Esto significa sencillamente que la dilatación del mercurio, sobre el punto fijo tomado por punto de partida ó cero, es en este caso doble ó triple de la dilatación total correspondiente á la segunda elevación de temperatura. En una palabra, hay que recordar que la unidad de temperatura, el grado centígrado en la escala centesimal por ejemplo, representa una dilatación del mercurio contenido en el recipiente de un termómetro igual á la centésima parte de la dilatación total que experimentarí el mismo líquido al pasar de la temperatura del hielo fundente á la del agua hirviendo. Nada más.

V

VARIOS TERMÓMETROS. — COMPARACIÓN CON LOS DE MERCURIO Y DE AIRE

El mercurio y el alcohol no son los únicos líquidos con los cuales han construído termómetros los físicos. Deluc, físico de fines del siglo pasado, comparó las indicaciones dadas por termómetros construídos y graduados separadamente, y llenos de los cuatro líquidos siguientes: mercurio, alcohol, aceite de oliva y agua. Los dos últimos sólo po-

dían dar temperaturas superiores á la de la fusión del hielo. He aquí los resultados, en grados Réaumur, obtenidos por dicho sabio:

Term. de mercurio	— 10°	— 5°	0°	20°	40°	60°	80°
— de aceite...	"	"	0	19,3	39,2	59,3	80
— de alcohol..	— 7,7	— 3,9	0	16,5	35,1	56,2	80
— de agua.....	"	"	0	4,1	20,5	45,8	80

Los puntos fijos 0° y 80° son idénticos; y así debía ser, por cuanto habían sido los puntos de partida para la graduación. Pero las diferencias de las temperaturas intermedias son muy perceptibles, viéndose que son muy considerables por lo que hace al agua. De las investigaciones hechas de 1846 á 1852 por M. I. Pierre sobre la dilatación de un gran número de líquidos, resulta que los termómetros más parecidos á los de mercurio son los que se llenan de sulfuro de carbono, de alcohol, de éter común, y de cloruro y bromuro de etilo. Como la temperatura de ebullición de estos líquidos es respectivamente de 48°, 78°, 35°,5, 11° y 40°,7, los termómetros así contruídos no podrán servir sino para marcar temperaturas bajas. El agua es la que produce mayor discordancia con las indicaciones del termómetro de mercurio.

Vese, pues, cuánto distan de ser comparables entre sí los aparatos termométricos basados en la dilatación de líquidos diferentes, por más que estén graduados á partir de los mismos puntos fijos. Colocados en idénticas condiciones térmicas, en medios que, según nuestra definición, tengan la misma temperatura, sería desigual el número de grados que marcasen; en cambio podrían marcar los mismos grados sin que las temperaturas fuesen iguales. Ante estas dificultades, se ha tratado de averiguar si había alguna substancia, líquida ó gaseosa, que pudiese dar indicaciones comparables entre sí cuando se toman sus variaciones de volumen como medida de las de temperatura. En otros términos, se ha planteado la cuestión siguiente: ¿Hay algún cuerpo cuyas dilataciones sean proporcionales á las cantidades de calor que las producen, ó si no existe alguno que goce en absoluto de esta propiedad, cuál es el que se aproxima más á ella?

Desde 1723, Taylor estudió la cuestión por lo que respecta á los líquidos. Tomando dos masas iguales de agua á temperaturas diferentes, marcadas por el termómetro de experimentos, las mezclaba adoptando las precauciones convenientes para evitar las pérdidas de calor. Conforme lo veremos más adelante, la mezcla debía estar á una temperatura media entre las extremas, á 15° por ejemplo si las masas mezcladas estaban á 20° y á 10°. Los experimentos de Taylor, repetidos posteriormente por varios sabios, han probado que el termómetro de mercurio llena esta condición hasta 200°. Pasado este límite, las indicaciones son demasiado altas, de lo cual se deduce que entonces se necesita menor cantidad de calor para producir la misma dilatación.

Fundándose más adelante Dulong y Petit en estas diferencias entre las dilataciones y los calores absorbidos, aun empleando el mercurio, y en la idea de que dilatándose por igual todos los gases entre temperaturas dadas, su dilatación es independiente de la naturaleza de sus moléculas y de su acción recíproca, y depende exclusivamente de la cantidad de calor absorbida, consideraron el termómetro de aire preferible á todos los demás, y propio para emplearlo exclusivamente en las averiguaciones científicas de la temperatura. Cuando nos ocupemos de la medida de la dilatación de los gases, diremos algo acerca de la construcción del termómetro de aire y de su uso, y veremos que sus ventajas teóricas sobre el termómetro de mercurio no son tan grandes como Dulong y Petit lo creyeron á la sazón.

Por ahora, limitémonos á decir que los termómetros de mercurio concuerdan notablemente con el de aire á menos de los 100°. Sobre éstos, marcan constantemente una temperatura más elevada; á los 200°, el adelanto está comprendido entre 0°,5 y 2°, varía de 4 á 10° cerca de la ebullición del mercurio, es decir, hacia los 360°. Como el uso del termómetro de mercurio es mucho más cómodo que el del de aire, se puede utilizar el primero para las investigaciones más exactas hasta 100 y más grados, si se ha comparado previamente con el termómetro de aire las indicaciones del termómetro empleado.

¿Son comparables entre sí todos los termómetros de mercurio contruídos como hemos dicho? Colocados en idénticas condiciones físicas, ¿marcarán todos ellos exactamente la misma temperatura? Plantear esta cuestión equivale á preguntar si el vidrio de que está formado el tubo ejerce alguna influencia en las indicaciones termométricas. Sábese en efecto que la dilatación aparente del mercurio, la diferencia entre la dilatación absoluta de este líquido y su envolvente, es la que sirve para definir la unidad termométrica, el grado. Siendo el mercurio perfectamente puro, su dilatación no cambia, pero la del vidrio difiere de un termómetro á otro, según la composición y el estado molecular de esta substancia. Las diferentes especies de vidrio no se dilatan con la misma igualdad, variando de una á otra la ley de esta dilatación con la temperatura. Por último, cuando á un mismo vidrio se le ha sometido á ciertas temperaturas, sufre en su estructura molecular una modificación que cambia la capacidad del recipiente y produce una desviación en los puntos fijos.

De los estudios hechos por V. Regnault ha resultado que la naturaleza química del vidrio ejerce gran influencia en las temperaturas que exceden de 100°. Tampoco hay rigurosa concordancia de 0° á 100° entre las indicaciones de dos termómetros de mercurio, uno de ellos contruído con vidrio común y otro con cristal de base de plomo. He aquí algunas cifras sacadas de los datos de Regnault:

Temperatura del termómetro de aire	TERMÓMETRO DE MERCURIO			
	de cristal	de vidrio	de vidrio verde	de vidrio de Suecia
100°	100°	100°	100°	100°
120	120 12	119 25	120 08	120 04
140	140 29	139 84	140 21	140 11
160	160 52	159 74	160 40	160 20
180	180 80	179 63	180 66	180 33
200	201 25	199 70	200 80	200 50
220	221 82	219 80	221 20	220 75
240	242 55	239 98	241 60	241 16

La comparación de estas cantidades demuestra que los termómetros de vidrio común son los que ofrecen menores diferencias con las indicaciones del termómetro de aire; que los de cristal son los menos á propósito, sobre todo para altas temperaturas, pues pasados los 240° va creciendo la discordancia, y que, mientras al llegar á los 350°, un termómetro de vidrio marca 354°, uno de cristal da 360°,50, ó sea 10 grados y medio más que la verdadera temperatura. Para obviar estos inconvenientes, se necesita construir los termómetros con la misma clase de vidrio, si se quiere tener resultados