

Capítulo Cuarto

Fenómenos Térmicos

111. El origen de la escala de Reaumur.

¿Por qué en la escala de Reaumur el punto de ebullición del agua está señalado con el número 80?

El termómetro original de Reaumur se parecía muy poco al actual. No era de mercurio, sino de alcohol. Reaumur graduó su escala partiendo de un solo punto de referencia constante, o sea, de la temperatura de fusión del hielo, marcado con el número 1000, y utilizando alcohol cuyo coeficiente de dilatación térmica era igual a 0,0008. El inventor estableció que la división de un grado de la escala termométrica ha de equivaler al aumento del volumen de alcohol en una milésima parte. En este caso el punto de ebullición del agua debería estar 80 grados más alto que el punto de fusión del hielo y correspondería a 1080 grados. Posteriormente señaló el punto de fusión del hielo con 0, por lo cual el de ebullición del agua fue designado (y lo es hasta hoy día) con 80 grados.

112. El origen de la escala de Fahrenheit

¿Por qué en la escala de Fahrenheit el punto de ebullición del agua está marcado con el número 212?

El invierno de 1709 en Europa Occidental fue muy duro. Durante un siglo no hizo tanto frío allí. De modo que era natural que el físico danés Fahrenheit, que vivía en la ciudad de Dantzig, para señalar los puntos constantes de la escala de su termómetro, adoptase por cero la temperatura mínima que se registró aquel invierno. Una mezcla refrigerante de hielo, sal común y sal amoníaca le permitió bajar la temperatura hasta tal grado.

Para marcar otro punto constante de su termómetro, Fahrenheit, siguiendo a sus antecesores (entre ellos Isaac Newton), eligió la temperatura normal del cuerpo humano. En aquel tiempo generalmente se creía que la temperatura del ambiente nunca supera la de la sangre humana, y se suponía que si tal cosa sucede, el hombre morirá (éste es un criterio absolutamente erróneo).

En un principio, Fahrenheit marcó este segundo punto constante con el número 24, por la cantidad de horas del día solar medio, pero posteriormente se dio cuenta de que semejantes divisiones de la escala termométrica eran demasiado grandes. El inventor dividió cada grado en cuatro partes, por lo cual la temperatura del cuerpo humano se designó con el número $24 \cdot 4 = 96$. De esta manera estableció definitivamente el valor de la división equivalente a un grado. Graduando la escala de abajo arriba, determinó que la temperatura de ebullición del agua era igual a 212 grados.

¿Por qué Fahrenheit no utilizó la temperatura de ebullición del agua como el segundo punto constante de su termómetro? No lo hizo porque sabía cuán variable es esta magnitud que depende de la presión del aire. La temperatura del cuerpo humano le parecía más segura, pues es más constante. A propósito, es interesante señalar (y es muy fácil comprobarlo mediante el cálculo) que en aquel entonces se creía que la temperatura normal del cuerpo humano era igual a 35,5 grados centígrados (un grado menos que ahora).

113. Longitud de las divisiones de la escala termométrica.

¿Son iguales las divisiones de la escala en el termómetro de mercurio? ¿Y en el otro, de alcohol?

Por supuesto, la dimensión de las divisiones de la escala termométrica está sujeta al valor del coeficiente de dilatación térmica del líquido contenido en él. Consta que al elevar la

temperatura aumenta el coeficiente de dilatación térmica de todos los líquidos; cuanto más se acerca al punto de ebullición, tanto más aumenta.

Lo que acabamos de enunciar, nos permite comprender fácilmente la diferencia entre las escalas del termómetro de mercurio y de alcohol en lo que se refiere a la dimensión de sus divisiones. Por lo general, los termómetros de mercurio están destinados a medir temperaturas muy diferentes del punto de ebullición de ese líquido (357 °C). En el intervalo de 0 a 100 °C el coeficiente de dilatación del mercurio no crece considerablemente y, dado que la capacidad del tubo de vidrio del termómetro también aumenta al elevar la temperatura, no se advierte la irregularidad de dilatación del mercurio en dicho intervalo. Por ello, la escala del termómetro de mercurio es casi uniforme.

A su vez, el alcohol se utiliza en los termómetros destinados a medir la temperatura próxima al punto de ebullición de ese líquido (78 °C), por lo cual es ostensible el aumento de su coeficiente de dilatación térmica al aumentar la temperatura. Si el volumen del alcohol a 0 °C se toma igual a 100, su volumen a 30 °C equivaldrá 103, y a 78°C será 110.

Queda claro que las divisiones de la escala del termómetro de alcohol deben aumentar desde cero hacia arriba.

115. La graduación del termómetro

Un folleto traducido del francés al ruso por León Tolstoi, contiene la siguiente crítica relativa a los termómetros:

«El grado no es igual al comienzo y al final de la escala termométrica; el hecho de que los grados son espacios iguales, demuestra que la razón de cada uno de ellos al volumen del líquido que se dilata a todo lo largo del tubo, no puede ser constante.»

O sea, si, por ejemplo, la longitud de la división correspondiente a un grado mide 1 mm, la columna de mercurio de tanta altura a 0 °C contiene una parte mayor del volumen de mercurio que la misma columna de este líquido a 100 °C, cuando aumenta su volumen total.

«Por tanto, concluye el autor, no podemos dar por iguales los correspondientes intervalos de temperatura.» ¿Tendrá algún fundamento esta crítica?

El autor del folleto (y también León Tolstoi, quien compartía su punto de vista) pretende refutar la siguiente tesis, sobre la cual está basado el diseño de la escala termométrica:

«Iguales intervalos de temperatura corresponden a incrementos absolutamente iguales de volumen de la sustancia termométrica.»

Descartando esta tesis, el crítico propone sustituirla con la que sigue, que da como la única correcta:

«Iguales intervalos de temperatura corresponden a incrementos relativamente iguales de volumen de la sustancia termométrica.»

No obstante, discutir cuál de estas dos afirmaciones es verdadera, sería lo mismo que discutir cuál de las unidades de longitud es más idónea para medir la distancia, el metro o el pie. Ambas tesis son convencionales, de modo que sólo se puede hablar de cuál de ellas es más conveniente, es decir, cuál de las dos hace más clara la ciencia del calor.

Semejante planteamiento ya había sido enunciado en su tiempo por Dalton, por lo cual se denomina «escala de Dalton». Ésta, si hubiera sido aceptada, no tendría puntos de cero absoluto: en general, toda la ciencia del calor, quedaría reformada considerablemente. Esta reforma, lejos de simplificar, complicaría extremadamente la enunciación de las leyes de la naturaleza. Por lo tanto, la escala daltoniana fue rechazada.

116. Expansión térmica del hormigón armado.

¿Por qué no se separan los componentes del hormigón armado, el hormigón y el entramado metálico, durante el calentamiento?

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón (0,000012) es igual al del hierro; cuando varía la temperatura, ambos materiales se dilatan de igual manera y por eso no se separan uno de otro.

117. La expansión térmica máxima.

Cite un sólido que se expande más que los líquidos al calentarlo.

Cite un líquido que se expande más que los gases durante el calentamiento.

La cera es el sólido que se dilata más que los otros, incluso más que muchos líquidos. Su coeficiente de dilatación térmica es de 0,0003 a 0,0015, dependiendo de la especie, es decir, es 25 ó 120 veces mayor que el del hierro. Como el coeficiente de dilatación cúbica del mercurio vale 0,00018, y del queroseno, 0,001, la cera se dilata más que el mercurio, además, algunas de sus especies se expanden más que el queroseno.

El líquido que se dilata más que los restantes es el éter cuyo coeficiente de dilatación es 0,0016. Pero esta sustancia no bate el récord de dilatación térmica: hay un líquido que se expande 9 veces más que ella, a saber, el anhídrido carbónico líquido (CO_2) a 20 °C. Su coeficiente de dilatación térmica es 0,015, o sea, supera 4 veces al de los gases. Por lo general, el coeficiente de dilatación térmica de los líquidos aumenta más rápidamente al acercarse a la temperatura crítica, superando muchas veces al de los gases.

118. La expansión térmica mínima.

¿Qué sustancia se dilata menos que otras durante el calentamiento?

El vidrio de cuarzo posee el menor coeficiente de dilatación térmica: 0,0000003, o sea, 40 veces menor que el del hierro. Se puede sumergir en agua helada un matraz de vidrio de cuarzo, caldeado hasta 1000 °C (este vidrio funde a 1625 °C), sin temor a que se rompa. El coeficiente de dilatación térmica del diamante también es muy pequeño, 0,0000008, aunque supera un poco el del vidrio de cuarzo.

El metal que tiene el menor coeficiente de dilatación térmica es una marca de acero llamada invar (del francés invar, abrev. de invariable). Esta aleación consiste en acero con 36 % de níquel, 0,4 % de carbono y otro tanto de manganeso. Su coeficiente de dilatación es 0,0000009, y el de algunas de sus marcas es menor aún, 0,00000015, es decir, 80 veces menor que el del acero ordinario. Más aún, hay marcas de invar que no se dilatan en absoluto en ciertos intervalos de temperatura.

A su coeficiente de dilatación ínfimo debe este metal sus numerosas aplicaciones; en particular, se emplea con éxito para fabricar piezas de mecanismos de precisión (péndulos de reloj) y aparatos para medir longitudes.

119. Anomalías de la expansión térmica.

¿Qué sólido se contrae cuando se calienta y se dilata cuando se enfría?

Por lo general, a la pregunta de cuál de los cuerpos se dilata al ser enfriado, se suele responder a la ligera: el hielo, olvidando que el agua posee esta dilatabilidad anómala sólo en estado líquido. El hielo, en cambio, no se dilata al ser enfriado, sino que se contrae, lo mismo que la mayoría de los cuerpos de la naturaleza.

No obstante, existen otros sólidos que se dilatan cuando se enfrían por debajo de cierta temperatura. En primer lugar, son el diamante, el óxido cuproso y la esmeralda. El diamante comienza a dilatarse al ser enfriado considerablemente, a saber, a 42 °C bajo cero, mientras que el óxido cuproso y la esmeralda presentan la misma particularidad con un frío moderado, de unos 4 °C bajo cero. Luego a 42 y 4 grados centígrados bajo cero, respectivamente, estos cuerpos tienen la densidad máxima, lo mismo que el agua a +4° C.

El yoduro de plata cristalino (el mineral llamado yodirita, yodargirita o yodargira) se dilata al ser enfriado a temperatura ordinaria. Una varilla de goma extendida por una pesa presenta la misma particularidad: se acorta al ser calentada.

120. Un agujero abierto en una plancha de hierro.

En el centro de una plancha de hierro de 1 m de ancho hay un agujero de 0,1 mm (de grosor de un cabello humano).

¿Cómo debe variar la temperatura del metal para que el agujero se cierre por completo?

Sería erróneo creer que si la plancha se calienta considerablemente, el orificio se cerrará a consecuencia de la dilatación térmica. Por más que se la caliente, será imposible obtener semejante resultado, puesto que durante el calentamiento aumentan las dimensiones de los orificios. Esto lo explica el razonamiento siguiente.

Si no hubiera agujero, la sustancia que estaría en su lugar, se dilataría de la misma manera que el resto de la plancha: en otro caso esta última se plegaría o rompería; al contrario, se sabe que un cuerpo homogéneo que experimenta dilatación térmica, no se pliega ni se rompe. Queda claro, pues, que la plancha con agujero se dilataría como si no lo tuviera: o sea, durante el calentamiento el orificio aumentaría de la misma manera que cualquier parte de la plancha de área igual. Por consiguiente, la capacidad de los recipientes y el área de la sección interior de las tuberías, así como las cavidades de los cuerpos aumentan durante el calentamiento (y disminuyen durante el enfriamiento); en este caso el coeficiente de dilatación es el mismo que el de la sustancia que compone todo el cuerpo.

Así pues, es imposible cerrar un agujero calentando el objeto en el cual está practicado; por el contrario, su volumen aumentará. ¿Sería posible obtener este resultado mediante el enfriamiento? ¿Sería posible enfriar la plancha de hierro de modo que el agujero desaparezca?

A consecuencia de que el coeficiente de dilatación del hierro es 0,000012, mientras que sólo es posible enfriarlo hasta 273 °C bajo cero, queda claro, pues, que el diámetro del agujero no se podría disminuir más que en $0,000012 \cdot 273$, o sea, aproximadamente en 0,003.

Consiguientemente, por más que cambie la temperatura, sería imposible cerrar un orificio practicado en un sólido, por pequeño que sea.

121. La fuerza de dilatación térmica.

¿Es posible impedir mecánicamente la dilatación térmica de una barra metálica o de la columna de mercurio?

Es sabido que la dilatación y contracción térmicas poseen fuerza considerable. El físico inglés J. Tyndall realizó un experimento, en el cual una barra de hierro, al contraerse debido al enfriamiento, rompió una varilla de hierro del grosor de un dedo. Por esta razón, muchos piensan que es imposible contrarrestar la fuerza de dilatación térmica de una barra o un líquido sometidos a calentamiento.

Este criterio es erróneo: a pesar de que son enormes las fuerzas moleculares que condicionan la dilatación térmica, se trata de magnitudes finitas. Por ello, es fácil calcular la fuerza que se ha de aplicar a una varilla de hierro de 1 cm² de sección transversal para impedir que se alargue al calentarla de 0 a 20 °C. Sólo se necesita conocer el coeficiente de temperatura de dilatación lineal del material (el del hierro es igual a 0,000012 °C⁻¹) y su resistencia al alargamiento mecánico caracterizada por el llamado módulo de elasticidad, o módulo de Young (el del hierro es de 20.000.000 N/cm²; quiere decir que al aplicar una fuerza de 10 N por centímetro cuadrado a una varilla de hierro, su longitud aumentará en dos millonésimas y disminuirá en la misma magnitud al comprimirla con la misma fuerza).

He aquí el cálculo correspondiente. Supongamos que hay que impedir que una varilla de hierro de 1 cm^2 de sección transversal se alargue en

$$0,000012 \times 20 = 0,00024$$

de su longitud. Para acortar la varilla en dos millonésimas se requiere un esfuerzo mecánico de 10 N. Por consiguiente, para acortarla en 0,00024 de su longitud, hará falta un esfuerzo de

$$0,00024 : (1 / 2.000.000) = 480 \text{ N.}$$

De modo que si aplicamos a cada uno de los extremos de semejante varilla un esfuerzo de 500 N aproximadamente, entonces, al calentarla de 0 a 20°C , su longitud no aumentará. En este caso la fuerza de dilatación de la varilla también valdrá 500 N.

De la misma manera se calcula la presión que impide que la columna de mercurio del tubo del termómetro se alargue durante el calentamiento. Tomemos el mismo intervalo de temperatura, de 0 a 20°C . El coeficiente de dilatación del mercurio es 0,00018; bajo la presión de 1 at su volumen disminuye en 0,000003 del inicial. En nuestro caso tenemos que impedir que el mercurio se dilate en

$$0,00018 \times 20 = 0,0036.$$

Por lo tanto, para evitar la dilatación del líquido, habrá que aplicar una presión de

$$0,0036 : 0,000003 = 1200 \text{ at.}$$

Este hecho comprueba que si el canal del termómetro se llena con nitrógeno comprimido hasta una presión de 50 ó 100 at (véase la respuesta 114), el grado de dilatación de la columna de mercurio no variará de manera notable.

122. Calentamiento del nivel de burbuja.

La longitud de la burbuja del nivel varía al cambiar la temperatura ambiente.

¿Cuándo la burbuja tiene dimensiones mayores, cuando hace frío o calor?

Con frecuencia a esta pregunta se suele responder que en épocas calurosas las dimensiones de la burbuja son mayores que en tiempo de frío, puesto que el gas contenido en ella se expande debido al calor. No obstante, se olvida que en semejantes condiciones el gas no puede dilatarse: se lo impide el líquido encerrado en la ampolla. Se calientan todos los elementos del utensilio, tanto el bastidor y el tubo de cristal como el líquido y el gas de la burbuja. El bastidor y el tubo se dilatan muy poco; en cambio, el líquido se dilata más que el tubo y, por ende, deberá comprimir la burbuja.

Así que, cuando hace calor, las dimensiones de la burbuja del nivel son menores que cuando hace frío.

123. Corrientes de aire.

He aquí un fragmento tomado de una revista técnica, que describe las condiciones que favorecen la ventilación natural de los locales con calefacción.

«En los locales con calefacción central las condiciones son muy desfavorables para la ventilación natural, pues, el aire sólo circula de arriba abajo. Por ello, en tales locales hay que dejar abierto el postigo de la ventana durante largo tiempo o poner a funcionar ventiladores.

Todo orificio sirve para ventilar la habitación. El aire viciado, teniendo temperatura más alta, sale por él, y el aire fresco ocupa su lugar entrando por las rendijas de las puertas y las ventanas y aun colándose por las paredes. Si en la habitación hay una chimenea, la ventilación es más intensa. Al quemar leña se consume parte del oxígeno contenido en el aire que hay en la habitación. Los productos de combustión salen por la chimenea, y el aire fresco entra en el cuarto ocupando su lugar.»

¿Es correcta la descripción de las corrientes de aire?

Este fragmento está redactado en la forma en que se solía razonar hace más de trescientos años, cuando ni se sospechaba la existencia de atmósfera, y los cuerpos de la naturaleza se clasificaban en cuerpos pesados que se precipitan a la tierra, y ligeros, que siempre suben. No se debe creer que el aire templado sale por el respiradero, mientras que el aire fresco entra desde afuera en el local para ocupar su espacio, ya que el aire templado no sube por sí mismo, sino que es desplazado hacia arriba por el aire frío que desciende. En el fragmento citado están confundidos la causa y el efecto.

El mismísimo Torricelli, cuya famosa experiencia puso fin al temor del vacío, ridiculizó ingeniosamente la teoría que sostenía que los cuerpos ligeros tienden a emerger en el ambiente. En una de sus Lecturas Académicas dice lo siguiente:

«Un día las nereidas decidieron crear su curso de física. En lo profundo del océano instalaron su academia y se pusieron a explicar los fundamentos de la física, de la misma manera que solemos hacer en nuestras escuelas los que habitamos el océano de aire. Las curiosas nereidas echaron de ver que entre todos los objetos que ellas utilizaban bajo el agua, unos bajaban, en tanto que otros subían. Entonces las ninfas, ni cortas ni perezosas, sin pensar en cómo se comportarían esos mismos objetos si se encontrasen en otros medios, dedujeron terminantemente que unos cuerpos, por ejemplo, la tierra, las piedras y los metales son pesados, pues bajan al fondo; otros, como el aire, la cera y la mayoría de las plantas, son ligeros, ya que aparecen a flor de agua...

El equívoco de las jóvenes ninfas, que clasificaron de ligeros los cuerpos que solemos catalogar entre los pesados, es bien perdonable. Me imaginé que he nacido y crecido en un anchuroso mar de mercurio. Enseguida se me ocurrió redactar un tratado de cuerpos pesados y ligeros. Empecé a disertar de la manera siguiente: como vivo en lo profundo de este mar, estoy acostumbrado a guardar todos los materiales, excepto el oro, bien amarradas para que no emerjan en la superficie. Por tanto, todos los cuerpos en general son ligeros y tienen la virtud natural de subir en el agua, menos el oro que se precipita en el mercurio. Sería muy distinta la física ideada por las salamandras (si es cierto que éstas residen en el fuego); según ellas, todos los cuerpos, incluido el aire, serían pesados.»

«Un libro de Aristóteles contiene la definición siguiente: se considera pesado aquel objeto que tiende hacia abajo; y se considera ligero aquel que tiende hacia arriba. ¿Habrá poca diferencia entre estas definiciones y las que se atribuyen a las nereidas, que concuerdan con las observaciones, pero no han sido rectificadas por la razón?»

Al cabo de tres siglos que transcurrieron desde entonces, no hemos logrado superar las nociones *pretorricellianas*, pues aún se encuentran afirmaciones sobre el aire templado que «tiende hacia arriba» y el frío que «ocupa su lugar».

125. La sartén de cobre y la sartén de hierro fundido.

¿En qué caso el guisado se achicharra más, cuando se prepara en una sartén de cobre o en una de hierro fundido? ¿Por qué?

La conductividad térmica del hierro fundido es 7,5 veces mayor que la del cobre; quiere decir que en una unidad de tiempo una capa de hierro fundido transmite una cantidad de calor 7,5 veces mayor que otra de cobre del mismo espesor, siendo la misma la diferencia

de temperatura a ambos lados de la capa. Queda claro, pues, que en una sartén de hierro fundido puesta sobre el hornillo el guisado se achicharra más que en otra, de cobre.

126 Enmasillado de las rendijas de las ventanas.

En los países de clima frío, las ventanas de los edificios tienen bastidores dobles para disminuir las pérdidas de calor durante el invierno. Además, suelen enmasillar las rendijas entre los cristales y el bastidor; no obstante, hay quien aconseja dejar sin enmasillar la rendija superior del marco exterior de las ventanas.

Explique el fundamento físico de este consejo.

Este consejo no tiene ningún fundamento físico: si se deja sin enmasillar alguna rendija, aumenta el escape de calor desde el interior del local, puesto que el segundo marco encristalado colocado en las ventanas disminuye las pérdidas de calor si el aire comprendido entre los cristales no se comunica en absoluto con el espacio interior y el exterior. Pero si el marco exterior tiene una rendija no enmasillada, el aire frío exterior desplazará el menos frío que se encuentra entre los cristales, se calentará y será desplazado a su vez por una nueva porción de aire frío colado desde afuera. Como en este caso el aire que ingresa, se calienta entre los cristales a expensas del calor del local, debido al cambio de aire en el espacio entre los marcos disminuirá la temperatura ambiente de la habitación. Cuanto mejor estén enmasilladas las rendijas, tanto mayor será el efecto termoaislante de los marcos de ventana.

127. En una habitación bien calentada.

El calor sólo es capaz de transmitirse de cuerpos con temperatura más alta a otros, cuya temperatura es más baja. En una habitación donde hace mucho calor, la temperatura del cuerpo humano es mayor que la del ambiente.

¿Por qué tenemos calor en este caso?

La temperatura de la superficie del cuerpo humano es de 29 (las plantas de los pies) a 35 °C (la cara), mientras que la del ambiente de las viviendas no suele exceder los 20 °C. Por ello, nuestro cuerpo no puede recibir directamente calor del medio circundante. ¿Por qué, pues, tenemos calor cuando nos encontramos en una habitación?

Tenemos calor no porque nuestro cuerpo lo absorbe del ambiente, sino porque la capa de aire que nos envuelve, lo conduce mal e impide que el cuerpo pierda calor, o sea, disminuye sus pérdidas. La capa de aire inmediata a nuestro cuerpo se calienta por el calor procedente de éste y es desplazada hacia arriba por otro aire, más frío; este último, a su vez, también se calienta y cede su lugar a otra porción de aire, etc. Es cierto que el aire templado debe absorber menos calor de nuestro cuerpo que el frío. Por eso tenemos calor estando en un cuarto con buena calefacción.

128 La temperatura del agua en el fondo de un río.

¿Cuándo es más alta la temperatura del agua de la capa cercana al fondo de un río profundo, en verano o en invierno?

Muchas veces se dice que en el fondo de ríos profundos la temperatura es una misma, de 4 °C sobre cero durante todo el año, pues a esta temperatura la densidad del agua es máxima. Para los estanques y lagos de agua dulce esta afirmación es cierta. Pero en los ríos, contrariamente a lo que se afirma, la distribución de temperaturas es distinta.

El agua de los ríos no sólo se desplaza en el sentido longitudinal, sino también en el transversal, aunque estas corrientes no se advierten a simple vista. De modo que el agua se

mezcla constantemente, por lo cual su temperatura junto al fondo es la misma que junto a la superficie.

La respuesta correcta a la pregunta planteada sería la siguiente: «Cerca del fondo del río más profundo la temperatura del agua en verano es más alta que en invierno, en tantos grados en cuantos la del ambiente exterior en verano es más alta que en invierno.»

129. Congelación de los ríos.

¿Por qué los ríos de corriente rápida todavía no se congelan cuando la temperatura ambiental es de algunos grados bajo cero?

Muchos piensan que en invierno los ríos de corriente rápida se demoran en congelarse porque las partículas de agua están en constante movimiento. En realidad, esto no es cierto. Las moléculas de agua siguen moviéndose aun cuando no hay corriente, con una velocidad de varios centenares de metros por segundo, por eso un aumento de velocidad de 1 a 2 m/s no influye mucho. Además, y esto es lo más importante, el movimiento del agua del río, tanto longitudinal como vorticial, entremezcla considerables masas de agua, sin alterar el movimiento de unas moléculas respecto a otras, es decir, no cambia el estado térmico del cuerpo.

Por otra parte, el hecho de que los ríos se demoran un poco en helarse al comenzar la época de frío, está condicionado por el movimiento del agua, pero de una manera algo distinta de lo que se suele creer. El agua que corre rápidamente no se congela porque se mezcla, desde el fondo hasta la superficie, por lo que tiene una temperatura más o menos igual. El agua cercana a la superficie, cuya temperatura ha bajado hasta cero grado, enseguida se mezcla con las capas inferiores, que aún no se han enfriado, a consecuencia de lo cual la temperatura de la capa superficial vuelve a ser superior a cero. Los ríos comienzan a helarse cuando la temperatura de toda el agua, desde la superficie hasta el fondo del río, sea igual a cero. Mas, para ello se necesita algún tiempo, tanto mayor cuanto más profundo es el río. La congelación de los ríos rápidos depende del proceso de mezclado del agua. Si el agua fluye lentamente, la corriente transversal no arrastra hacia el fondo los cristales de hielo formados en la capa superficial; éstos, pegándose unos a otros, cubren la superficie del agua formando una capa sólida. Pero si la corriente es rauda, los mismos son arrastrados hacia abajo, se pegan a los objetos que encuentran y se amontonan estorbando la corriente y provocando inundaciones. En Siberia, el Angara, único río que nace en el lago Baikal, de corriente rápida, no se hiel a largo tiempo a pesar de que hace muchísimo frío; en esta época en el río se forman grandes masas de hielo que dificultan la corriente. Pero su afluente Irkut, de corriente lenta, se congela a una temperatura de pocos grados bajo cero. A veces, semejante fenómeno se observa en diferentes tramos de un mismo río: si la pendiente es notable, la corriente es rápida y no se hiel a largo tiempo, además, se amontonan fragmentos de hielo que provocan inundaciones. Si, en cambio, la corriente es tranquila, el agua se congela prontamente.

130. La temperatura de la atmósfera

¿Por que en las capas superiores de la atmósfera hace más frío que en las inferiores?

Respondiendo a esta pregunta se suele comentar que los rayos solares calientan poco la atmósfera; la calienta más el calor procedente de la superficie terrestre, gracias a la conducción del calor.

«La Tierra se calienta con los rayos solares que atraviesan el aire sin calentarlo. Cuando inciden sobre la superficie terrestre, le transmiten su calor. A su vez, esta última calienta la capa de aire inmediata a ella. Por consiguiente, las capas superiores de aire están más frías que las inferiores.»

Esta explicación fue publicada en una de las revistas de divulgación científica como respuesta a la pregunta de uno de los lectores: «¿Por qué en las capas superiores de la atmósfera hace mucho frío?»

Cabe decir que el agua puesta a calentar en una cacerola se encuentra en las mismas condiciones: este líquido recibe calor del fondo del utensilio que conduce calor, pero sus capas superiores tienen la misma temperatura que las inferiores. Este hecho se debe al mezclado del líquido calentado por abajo, a la llamada convección. Si la atmósfera fuera líquida, entonces, siendo calentada desde abajo, tendría temperatura igual en cada uno de sus puntos. En la atmósfera gaseosa también hay corrientes provocadas por el calentamiento: el aire frío de las capas superiores desciende desplazando desde abajo el aire templado, pero la temperatura no se iguala. ¿Por qué?

Uno de los libros de texto da la siguiente respuesta que parece bastante verosímil. El aire que sube desde la superficie terrestre, realiza trabajo merced a la energía de su reserva de calor; por ello, cada kilogramo de aire que asciende a 427 m, debe ceder una cantidad equivalente de calor, en este caso, 1 kcal. Si consideramos que el calor específico del aire es de 0,25 kcal/(kg × grad) aproximadamente, cada 100 m de altura su temperatura debe variar en 1 °C. De hecho se observa una variación similar.

A pesar de que esta explicación concuerda con los datos reales, es del todo errónea, pues se basa en una suposición equivocada de que el aire realiza trabajo mientras asciende. En realidad, en este caso dicho fluido realiza tan poco trabajo como un corcho que emerge en el agua. El corcho no se enfría mientras sube a la superficie desde el fondo de un lago ni realiza trabajo, sino que, por el contrario, sobre él mismo se realiza trabajo. De la misma manera el aire sube, siendo desplazado por la corriente fría que realiza trabajo para elevarlo a expensas de la energía de la masa de aire frío que desciende. Además, ¿se enfría, acaso, una bala disparada hacia arriba que realiza trabajo para subir a cierta altura? Ni mucho menos: mientras disminuye su energía cinética, aumenta la energía potencial, de manera que se observa el balance energético sin que la energía mecánica se convierta en térmica. Ahora queda claro, por qué es errónea otra explicación del hecho de que las capas superiores de la atmósfera tienen temperatura tan baja: las moléculas del flujo de aire ascendente se desaceleran mientras suben, en tanto que la disminución de su velocidad equivale a la disminución de su temperatura. Esta conclusión también es errónea, pero equivocadamente la hicieron suya incluso algunos experimentadores de gran talla, aunque Maxwell en su *Theory of Heat* prevenía de ella.

«La gravedad decía éste, no influye de ninguna manera en la distribución de temperaturas en la columna de aire.» No debemos hacer caso omiso del hecho de que merced a la gravedad todas las moléculas del gas se desplazan de un modo estrictamente igual, sin alterar la posición de unas respecto a otras: se trata pues, de su traslado paralelo. Por esta razón, el movimiento de una molécula respecto de otras no varía bajo el efecto de la gravedad, lo mismo que al trasladar un recipiente lleno de gas de un lugar a otro. El movimiento térmico de las moléculas no cambia, por ello, tampoco puede cambiar la temperatura del gas.

En realidad, las corrientes ascendentes de aire se enfrían a consecuencia de su expansión adiabática. Al mezclarse con las capas superiores de la atmósfera, cada vez más enrarecidas, el aire realiza trabajo de expansión a expensas de su reserva de calor. Cuando el gas cambia de estado variando también su presión sin recibir energía desde afuera (y sin cederla al medio exterior), se dice que semejante cambio de estado es adiabático.

En términos cuantitativos, hay que examinar este fenómeno de la manera siguiente. Si junto a la superficie terrestre la temperatura del aire es T_0 y a la altura h es T_h , mientras que la presión barométrica es P_0 y P_h , respectivamente, el descenso de la temperatura a la altura h vendrá dado por la expresión siguiente:

$$T_0 - T_k = T_0 \left[\left(\frac{P_0}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

Aquí, k es la razón de la capacidad calorífica del gas a volumen constante con respecto a su capacidad calorífica bajo presión constante; para el aire $k = 1,4$, por consiguiente,

$$(k - 1)/k = 0,29.$$

Por ejemplo, vamos a calcular el descenso de la temperatura del aire a la misma altura de 5,5 km, donde la presión barométrica es dos veces menor que junto a la superficie terrestre. Para simplificar, vamos a examinar el ascenso de una masa de aire seco. Tenemos, pues, la expresión que sigue:

$$T_0 - T_k = T_0 (2^{0,29} - 1) = 0,22T_0$$

de donde

$$T_k = 0,78T_0$$

Si junto a la superficie terrestre la temperatura es de 17°C, o 290° K, entonces

$$T_h = 0,78 \times 290 = 226^\circ \text{K}$$

Esta magnitud equivale a -49°C, es decir, corresponde a 1°C aproximadamente por cada 100 m de altura.

La presencia del vapor de agua modifica el cálculo que acabamos de exponer: el descenso de temperatura por cada 100 m de altura, igual a 1 grado centígrado para el aire seco, disminuye casi en 0,5 grado si el aire contiene vapor de agua.

Así pues, en el seno de la atmósfera calentada por abajo, la mezcla de masas de aire no puede igualar su temperatura: el aire que asciende, se enfría a consecuencia de la expansión adiabática, mientras que el que desciende, se calienta debido a la compresión adiabática. Por esta razón, las capas superiores de la atmósfera tienen una temperatura menor que las cercanas a la superficie terrestre.

131. Intensidad de calentamiento.

¿Se necesita más tiempo para calentar el agua con un mechero de gas de 10 a 20 grados centígrados o de 90 a 100 grados?

Observando el calentamiento del agua con un reloj en la mano, es fácil cerciorarse de que el agua tarda más en calentarse de 90 a 100°C que de 10 a 20°C; y eso que la cantidad de agua disminuye constantemente a consecuencia de la evaporación. Este enigma se descifra de la siguiente manera: el calor de la llama no sólo se invierte en la evaporación intensa de líquido, sino también se disipa en el ambiente debido a la emisión de calor. A temperaturas altas (de 90 a 100°C) el agua emite mayor cantidad de energía que a temperaturas bajas (de 10 a 20°C). Por ello, a pesar de que el agua recibe uniformemente calor, su temperatura aumentará tanto más despacio cuanto más caliente esté el líquido.

132 La temperatura de la llama de una vela.

¿Qué temperatura tendrá la llama de una vela esteárica? (un ácido graso sólido orgánico blanco de apariencia cristalina. No es soluble en agua, pero sí en alcohol y éter)

Estamos propensos a subestimar la temperatura de las fuentes de luz tan «modestas» como la llama de una vela ordinaria. Por eso, muchos se sorprenderán al enterarse de que la llama de una vela tiene una temperatura de 1600°C (según estableció O. Lummer con arreglo a la ley de desplazamiento de Wien).

133. Los clavos y la llama.

¿Por qué los clavos no se funden en la llama de una vela?

Comúnmente se suele responder de la siguiente manera: «Pues, porque la llama de una vela no produce suficiente calor». Pero si acabamos de averiguar que la temperatura de la llama de la vela es de 1600°C , es decir, supera en 100° la de fusión del hierro. Resulta, pues, que la llama de la vela da suficiente calor; no obstante, es incapaz de fundir dicho metal.

La causa de esto consiste en que al mismo tiempo que el clavo recibe calor de la llama, lo emite al medio ambiente. Cuanto más sube la temperatura del objeto que se calienta, tanto más intensa es la pérdida de calor; finalmente, en cierto momento la emisión y el suministro de calor se igualan, por lo cual deja de aumentar la temperatura del objeto sometido al calentamiento.

Si la llama, más exactamente, su parte más caliente, envolviera todo el clavo, durante el calentamiento la temperatura máxima de dicho objeto sería igual a la de la llama, y éste se fundiría. Como la llama sólo envuelve parte del clavo, mientras que el resto emite calor, el ingreso y la pérdida de calor se igualarán mucho antes de que la temperatura del metal se iguale con la de la llama, y aun con la de fusión del hierro.

De modo que el clavo no se funde en la llama de la vela porque ésta no lo envuelve enteramente, y no porque produce poco calor.

135 Calentamiento del agua en tres estados.

¿Qué es más fácil de calentar en una misma cantidad de grados, 1 kg de agua líquida, 1 kg de hielo o 1 kg de vapor de agua?

Lo más fácil es calentar el vapor de agua (su calor específico es de $0,46\text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$) y luego el hielo (de calor específico igual a $0,505\text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$); la mayor cantidad de calor se necesita para calentar el agua líquida.

136. Calentamiento de un centímetro cúbico de cobre

¿Qué cantidad de calor se necesita para calentar en 1 grado centígrado 1 cm de cobre (de calor específico $\sim 0,1$)?

A la pregunta sobre la cantidad de calor que se requiere para calentar en un grado 1 cm^3 de cobre, a veces se suele responder equivocadamente: $0,1\text{ cal}$, o sea, lo que vale el calor específico de este metal, olvidando que el calor específico no se refiere a la unidad de volumen, sino a la unidad de masa, es decir, no corresponde a 1 cm^3 , sino a 1 g . Para calentar en un grado 1 cm^3 de cobre (cuya densidad es de 9 g/cm^3) se necesita $0,9\text{ cal}$ en vez de $0,1\text{ cal}$.

137 Los cuerpos de calor específico más elevado

- a) ¿Qué sólido necesita la mayor cantidad de calor para su calentamiento?
 b) ¿Qué líquido necesita la mayor cantidad de calor para su calentamiento?
 c) ¿Qué sustancia necesita la mayor cantidad de calor para su calentamiento?

a) Entre los sólidos, el que mayor cantidad de calor necesita para ser calentado, es el metal litio: su calor específico de $1,04 \text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$ es dos veces mayor que el del hielo.
 b) Entre los líquidos, el mayor calor específico lo tiene el hidrógeno líquido ($6,4 \text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$), y no el agua, como se suele creer las más de las veces. El calor específico del amoníaco licuado también es mayor que el del agua (aunque no lo supera mucho).
 c) Entre los cuerpos de la naturaleza, sólidos, líquidos y gaseosos, el que mayor cantidad de calor requiere para ser calentado, es el hidrógeno. El calor específico de esta sustancia al estado gaseoso (a presión constante) es de $3,4$, y al estado líquido, de $6,4 \text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$. El calor específico del helio al estado gaseoso ($1,25 \text{ kcal}/(\text{kg} \times \text{grad})$) es más elevado que el del agua.

138. El calor específico de los alimentos

Para conservar los alimentos en frío se necesita conocer su calor específico. ¿Conoce usted el calor específico de la carne, el huevo, el pescado y la leche?

He aquí los datos relativos al poder calorífico (en kcal/kg) de los alimentos enumerados al plantear el problema: carne 1797, pescado 836, huevo 1649 y leche 668.

139. El metal más fusible.

¿Cuál de los metales que se mantienen sólidos a temperatura ambiente, se funde más fácilmente?

Entre las aleaciones que se encuentran en estado sólido a temperatura ambiente, es muy fusible la aleación de Wood que consta de estaño (4 partes), plomo (8 partes), bismuto (15 partes) y cadmio (4 partes) y funde a 70°C . Además, existe otra aleación, más fusible aún, que también debe su nombre a su inventor Lipowitz; ésta contiene menor cantidad de cadmio que la de Wood (3 partes en vez de 4) y funde a 60°C .

No obstante, estas aleaciones no ocupan el primer lugar entre los metales más fusibles. El metal galio funde a una temperatura menor aún, a 30°C , es decir, se derruiría en la boca de la persona, por decirlo así. El galio es el elemento 31 de la tabla de Mendeléev, «pronosticado» por D. Mendeléev en 1870 y descubierto por P.E. Lecoq de Boisbaudran en 1875.

El galio se utiliza fundamentalmente en los termómetros en vez del mercurio; su fusión empieza a 30°C y la ebullición, sólo a 2300°C , es decir, este elemento permanece en estado líquido en un intervalo de temperatura muy amplio de 30 a 2300°C . Como existen marcas de vidrio de cuarzo que funden a 3000°C , técnicamente es posible fabricar termómetros de galio. Ya se fabrican termómetros de galio para temperaturas de hasta 1500°C .

140. El metal más refractario

Cite el metal más refractario.

Hace mucho que el platino, cuya temperatura de fusión es de 1800°C , ha dejado de ocupar el primer puesto entre los metales refractarios. Se conocen metales cuyas temperaturas de fusión superan en 500 ó 1000 grados la del platino. Entre ellos figuran el iridio (2350°C), el osmio (1700°C), el tantalio (2800°C) y el tungsteno (3400°C).

El tungsteno es el metal más difícilmente fusible entre los que se conocen (se emplea para los filamentos de lámparas de incandescencia).

141. Calentamiento del acero

¿Por qué se destruye el entramado de acero de los edificios durante el incendio, aunque este metal no se inflama ni se funde por las llamas?

Las barras de acero se vuelven menos resistentes cuando sufren la acción de una temperatura muy alta. A los 500°C su resistencia a la rotura es dos veces menor que a 0°C; a los 600°C es tres veces menor; a los 700°C disminuye casi siete veces. (He aquí datos más exactos: si adoptamos por unidad su resistencia a 0°C, entonces la resistencia a 500°C valdrá 0,45; a 600°C, 0,3; a 700°C, 0,15.) Por esta razón, durante los incendios las estructuras de acero se desploman bajo la acción de su peso.

142. Una botella de agua colocada dentro de trozos de hielo.

a) ¿Se podría colocar una botella tapada llena de agua dentro de una masa de hielo en derretimiento sin temor a que se rompa?

b) Una botella llena de agua se encuentra dentro de una masa de hielo a 0 °C, y otra, dentro de agua a la misma temperatura. ¿En cuál de las botellas el agua se congelará antes?

a) Si se congelara el agua contenida en la botella, el vidrio se rompería a consecuencia de la dilatación del hielo. No obstante, en las condiciones especificadas el agua no se helará. Para ello no sólo habría que reducir la temperatura hasta 0°C, sino también haría falta disminuir el calor latente de fusión en 80 calorías por cada gramo de agua que se congela. El hielo, dentro del cual se encuentra la botella, tiene una temperatura de 0°C (se derrite) y, por consiguiente, el agua no transmitirá calor al hielo: la transmisión de calor es imposible cuando las temperaturas son iguales. Como el agua no cede calor a 0°C, permanecerá en estado líquido. Por ello, no hay que temer que la botella se rompa.

b) El agua no se congelará en ninguna de las botellas. En ambos casos la temperatura es de 0°C, por consiguiente, el agua contenida en la botella se enfriará hasta 0°C, pero no se helará, pues no podrá ceder calor latente de fusión al ambiente: si los cuerpos tienen temperaturas iguales, no intercambian calor.

143. El hielo en el agua.

¿Podría sumergirse por sí mismo el hielo en el agua a 0°C?

Como a 0°C el hielo tiene un peso específico de 0,917, en las condiciones normales se sostiene en la superficie del agua. Pero durante el calentamiento disminuye el de esta última: por ejemplo, a 100 °C equivale a 0,96 g/cm³, por lo cual en este caso el hielo que se derrite, continuará flotando. Si seguimos calentando el líquido (a presión elevada), a los 150 °C su peso será de 0,917, de modo que el hielo podrá permanecer por debajo del nivel de su superficie, sin bajar ni subir. A los 200 °C el agua tendrá una densidad de 0,86 g/cm³, es decir, menor que la del hielo, por lo cual éste se hundirá.

Cabe señalar que en condiciones normales el hielo es una de las variedades del agua sólida; en otras condiciones (cuando varía la presión) se forman otras variedades de hielo cuyas propiedades son distintas. Realizando experimentos sobre las propiedades de diversos cuerpos sometidos a una presión bastante alta (de hasta 30.000 at), el físico inglés Bridgman descubrió seis variedades diferentes de hielo y las designó con números: hielo I, hielo II, etc. El hielo I es más ligero que el agua en un 10 ó en un 14%. Las otras cinco

variedades son más densas que esta última: el hielo II, en el 22 %; el hielo III, en el 3 %; el hielo IV, en el 12 %, el hielo V, en el 8 % y el hielo VI, en el 12%. Por consiguiente, entre las seis variedades de hielo sólo una flota en el agua, mientras que las demás se hunden.

145. El hielo

La explicación que se da al hecho de que la superficie del hielo es resbaladiza es que su punto de fusión desciende al aumentar la presión. Se sabe que para disminuir en un grado centígrado el punto de fusión del hielo hay que crear una presión de 130 at. Por ello, para poder patinar a la temperatura de 5 °C bajo cero, el deportista debe ejercer sobre el hielo una presión de $5 \cdot 130 = 650$ at. No obstante, la superficie de contacto entre el patín y el hielo no mide menos de unos cuantos centímetros cuadrados, de modo que a 1 cm le corresponden no más de 10 a 20 kg de la masa del patinador. Por consiguiente, la presión que éste ejerce sobre el hielo, es muchas veces menor que la necesaria para disminuir el punto de fusión del hielo en 5°.

¿Cómo explicaría usted el hecho de que a 5 °C bajo cero y a más baja temperatura es posible patinar?

La diferencia entre la explicación del fenómeno y el resultado del cálculo se debe a las dimensiones exageradas de la superficie de contacto entre el patín y el hielo. No toda la superficie del patín está en contacto con el hielo, sino algunos de sus puntos, cuya área total no debe de superar 0,1 cm² (es decir, 10 mm²). En este caso la presión que el patinador (de 60 kg de peso) ejerce sobre el hielo, no será menor de $60 : 0,1 = 600$ kgf/cm², es decir, no será inferior a la magnitud que se requiere para que, conforme a la teoría, disminuya la temperatura, a la cual el hielo empieza a derretirse.

Si el frío es muy intenso, la presión de los patines será insuficiente para reducir la temperatura de fusión del hielo hasta el valor requerido; en este caso el patinaje se dificultará, puesto que aumentará notablemente la fricción por falta del agua que sirve de engrase.

146. Disminución del punto de fusión del hielo.

¿Hasta qué temperatura es posible disminuir el punto de fusión del hielo elevando mucho la presión?

El punto de fusión del hielo disminuye en 1/130 de grado cuando la presión ambiente aumenta en una atmósfera. Pero no se piense que el hielo empezará a derretirse a una presión suficiente, por muy baja que sea la temperatura. Cuando se eleva la presión, el punto de fusión del hielo disminuye hasta cierto límite: es imposible reducirlo más de 22 grados; esto se lograría a la presión de 2200 at.

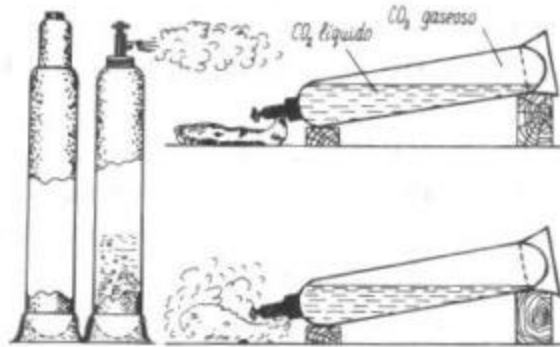
Así pues, por más que se eleve la presión, el hielo no se derretirá a una temperatura menor de 22 °C bajo cero; es imposible patinar sin dificultad alguna cuando la temperatura baja hasta ese valor, ya que a la presión de 2200 at el hielo se torna más denso que de ordinario y, por consiguiente, ocupa menos espacio: la presión ya no contribuye a su derretimiento.

147. El «hielo seco».

¿Sabe usted qué es el «hielo seco»?

En la técnica, por «hielo seco», o «nieve carbónica», se entiende el anhídrido carbónico sólido. Si se deja salir anhídrido carbónico líquido de una botella a presión muy alta (de 70 at) al aire libre, empieza a evaporarse tan intensamente que su resto se congela (por el frío

engendrado durante la evaporación) formando una masa suelta como la nieve. Al prensarla, se compacta tomando forma muy parecida al hielo.



A la izquierda: anhídrido carbónico contenido en una botella de acero de paredes gruesas; encima están sus vapores. Más a la derecha: cuando se abre la válvula el líquido comienza a bullir a consecuencia del descenso de presión. A la derecha arriba: la botella está inclinada para verter anhídrido carbónico en un saco atado al grifo. A la derecha abajo: el saco queda envuelto en una nube de vapores de anhídrido carbónico condensados; dentro del mismo se encuentra anhídrido carbónico congelado.

El «hielo» carbónico posee una propiedad notable: no se derrite cuando se calienta, sino que inmediatamente se convierte en gas sin pasar por la fase líquida. Esta propiedad proporciona una gran ventaja al utilizarlo para enfriar los productos de fácil deterioro: el «hielo seco» no moja y ni siquiera humedece los productos mientras se evapora. De aquí proviene su nombre.

Otra ventaja del «hielo» carbónico ante el ordinario consiste en que proporciona unas quince veces más frío que este último. Además, se evapora muy lentamente; un vagón de frutas, enfriado mediante «hielo seco», puede estar en camino durante diez días sin cambiar ni reponer la reserva de anhídrido carbónico.



El anhídrido carbónico congelado forma una masa parecida a la nieve; después de prensarla se obtiene «hielo seco»

El efecto refrigerante del «hielo seco» se debe a su temperatura muy baja ($- 80^{\circ}\text{C}$); además, el gas que se forma al sublimarlo, también es bastante frío (0°C): el «manto» gaseoso que envuelve el anhídrido carbónico sólido, ralentiza el deshielo. El gas carbónico no contamina en absoluto el producto, además, disminuye considerablemente el peligro de incendios impidiendo la propagación del fuego.

148. El color del vapor de agua.

¿De qué color es el vapor de agua?

La mayoría de las personas están seguras de que el vapor de agua es de color blanco, y se asombran mucho al oír que esto no es así. De hecho, el vapor de agua es absolutamente transparente e invisible y, por consiguiente, es incoloro. La niebla blanquecina que se suele llamar «vapor» no es vapor en el sentido físico de la palabra, sino agua pulverizada que tiene forma de gotitas pequeñísimas. Las nubes tampoco constan de vapor de agua, se componen de diminutas gotitas de líquido.

149. La ebullición del agua.

¿Qué agua, sin hervir o hervida, empieza a hervir antes que la otra bajo condiciones iguales?

El agua no hervida empezará a bullir antes, pues contiene aire disuelto. Para explicar, por qué el aire presente en el agua acelera la ebullición, hay que examinar algunos detalles. Helos aquí.

La ebullición, a diferencia de la evaporación, consiste en que aparecen burbujas de vapor en el seno del líquido que se calienta. Esto sólo es posible cuando la presión del vapor supera la presión atmosférica sobre la superficie de líquido, que se transmite a su interior con arreglo a la ley de Pascal.

Consta que a los 100°C la presión del vapor de agua saturante es igual a la atmosférica. No obstante, esto sólo se refiere al caso cuando el vapor satura el espacio encima de la superficie del agua plana. En el seno de la burbuja que se forma en el agua, la presión del vapor saturado debe ser menor que la atmosférica, es decir, menor que junto a la superficie del agua plana a la misma temperatura. La causa de este fenómeno consiste en que la superficie cóncava de líquido vuelve a captar fácilmente las moléculas desprendidas de ella. Por consiguiente, cuando hay relativamente pocas moléculas liberadas, la cantidad de moléculas que se liberan cada segundo dentro de la burbuja debe equivaler a la de moléculas capturadas. Se trata, pues, del estado de saturación, cuando un espacio dado contiene, a una temperatura determinada, la cantidad máxima de vapor, y cuando la presión del vapor también es máxima. De modo que queda claro que la presión máxima del vapor en el seno de la burbuja es menor que encima de la superficie del agua plana, donde equivale a la atmosférica. Cuanto más cóncava es la superficie de agua, es decir, cuanto menor es el radio de la burbuja, tanto menor será la presión máxima del vapor. Por ejemplo, dentro de una burbuja de 0,01 mm de radio, a los 100°C la presión del vapor saturante es de 750 mm de mercurio en vez de 760 mm de mercurio.

Resulta, pues, que el agua no debe empezar a bullir a los 100°C , como establece la teoría, sino a una temperatura mayor, es decir, cuando el vapor cree en el agua una presión más alta, igual a la atmosférica. Por esta razón, el agua hervida previamente, que ya no contiene aire disuelto, tarda más en empezar a bullir. En cambio, la ebullición dura menos, se desprende mayor cantidad de vapor, y el agua tarda poco tiempo en calentarse hasta la temperatura normal de ebullición (100°C) a consecuencia del consumo intenso de calor para la evaporación.

La ebullición del agua sin hervir que contiene aire disuelto transcurre de una manera distinta. Como la solubilidad de los gases disminuye al aumentar la temperatura, el exceso de aire debe desprenderse del líquido que se calienta. Precisamente este aire forma burbujas. Los primeros glóbulos que aparecen en el agua sin hervir durante el calentamiento, no contienen vapor, sino aire, y sólo poco rato después empiezan a desprenderse de su superficie interna moléculas de vapor de agua. Hay que tener en cuenta que a las primeras burbujas de vapor, las más pequeñas, les cuesta más trabajo formarse, puesto que la presión del vapor de agua en ellas es muy reducida. Cuando terminan estas dificultades, es decir, cuando de una u otra forma aparecen burbujas, se facilita considerablemente el proceso de formación de vapor en ellas, y su tamaño aumenta. Este hecho explica, por qué el agua no hervida con aire disuelto no tarda tanto en empezar a hervir como la hervida previamente.

Maxwell logró sobrecalentar hasta 180°C (a presión normal y creando ciertas condiciones complementarias) agua, de la cual había extraído, en la medida de lo posible, aire disuelto. Tal vez eliminando más aire, lograría calentarla hasta una temperatura mayor, sin que dejase de ser líquida.

150. Calentamiento mediante el vapor.

¿Sería posible calentar el agua mediante vapor de 100°C hasta que empiece a hervir?

El vapor calentado hasta 100°C puede ceder calor al agua siempre que la temperatura de ésta sea inferior a los 100°C . A partir del instante en que se igualan las temperaturas del

vapor y el agua, el primero deja de transmitir calor a la segunda. Por ello, es posible calentar agua hasta 100°C mediante el vapor que tiene esa misma temperatura, pero éste no podrá transmitirle la cantidad de calor necesaria para pasar al estado gaseoso. Por consiguiente, se puede calentar agua hasta la temperatura de ebullición mediante el vapor, cuya temperatura es de 100°C , más es imposible lograr que empiece a hervir: seguirá en estado líquido.

151. Una tetera con agua hirviendo sobre la palma de la mano

Hay quien dice que se puede poner una tetera metálica, recién retirada del hornillo, sobre la palma de la mano sin que esto provoque una quemadura, a pesar de que el agua sigue hirviendo. La mano empieza a sentir calor sólo después de algunos segundos.

¿Cómo explicaría usted este fenómeno?



Un experimento menos peligroso de lo que parece ser

Se suele interpretar equivocadamente el hecho descrito al plantear el problema, aunque, de por sí, es cierto. Generalmente se cree que la mano no siente el calor de la tetera con agua hirviendo porque parte considerable se consume para continuar la ebullición. El calor necesario para la ebullición se toma de las paredes del recipiente, en particular, de su fondo, debido a lo cual descende la temperatura de este último. Cuando cesa la ebullición, el fondo deja de transmitir su calor al agua, y la mano empieza a sentir calor.

Esta explicación es errónea, pues no aclara por qué las paredes laterales queman más que el fondo; además, no considera el hecho de que a consecuencia de la evaporación el fondo de la tetera no puede tener una temperatura menor que el agua contenida en ella; en este caso la temperatura del agua es de unos 100°C , o sea, es suficiente para quemar la mano.

La causa real de este fenómeno consiste en lo siguiente: la humedad (el sudor) de la palma de la mano entra en contacto con el fondo de la tetera, pasando al llamado «estado esferoidal»; en un primer instante después de retirar la vasija del hornillo, el fondo tiene calor suficiente para ello. Mas, cuando su temperatura está por debajo de 150°C , ya no hay humedad que se encuentre en estado esferoidal, por lo cual el calor se siente más.

Este experimento se lleva a cabo con éxito siempre que el fondo de la tetera sea liso y no esté ensuciado, pues la rugosidad de la superficie metálica y la suciedad estorban que haya humedad en estado esferoidal.

152. ¿Prefiere usted comida frita o cocidas*¿Por qué la comida frita es más sabrosa que la cocida?*

La comida frita sabe mejor que la cocida no sólo porque se le añade aceite o grasa, sino fundamentalmente porque la freidura y el cocimiento tienen sus particularidades físicas. Tanto el agua como la grasa no se calientan por encima de la temperatura de su ebullición. La primera hierve a 100°C , mientras que la segunda a 200°C . Por consiguiente, para freír se necesita una temperatura más alta que para cocer. A su vez, un calentamiento más intenso de las sustancias orgánicas contenidas en la comida provoca en ellas transformaciones que mejoran su sabor. Por eso la carne frita sabe mejor que la cocida, así como el huevo frito es más sabroso que el duro, etc.

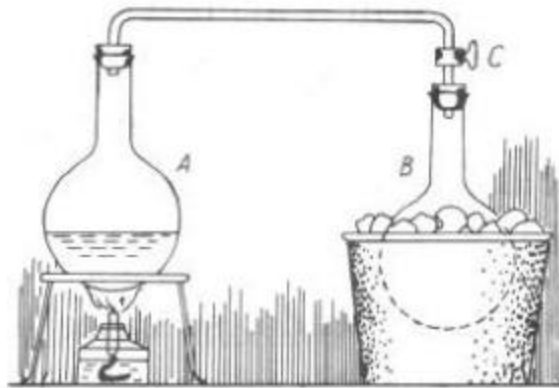
153. El huevo caliente en la mano*¿Por qué no quema la mano un huevo recién sacado del agua hirviendo?**Un huevo recién sacado del agua hirviendo no abrasa la mano*

Al sacar un huevo del agua hirviendo, su cáscara aún está húmeda y muy caliente. El agua que se evapora de la superficie caliente, la enfría, por lo cual el calor no se siente mucho. Pero este efecto sólo tiene lugar en los primeros instantes, mientras el huevo se seca, después de lo cual su elevada temperatura empieza a sentirse.

155. El principio de la pared fría

El traductor de un tratado de astronomía se topó en el texto con el término «principio de la pared fría». Al consultar numerosos libros de física no encontró semejante término. ¿Sabe usted, en qué consiste este principio?

Cuando el traductor del libro me pidió que le explicara el «principio de la pared fría», tardé mucho en encontrar este término. Por fin lo localicé en un libro de texto traducido del francés, que hoy día es difícil de encontrar. He aquí lo que dice al respecto: «Principio de Watt, o principio de la pared fría. Supongamos que tenemos dos recipientes: el recipiente A contiene agua a 100°C y el B, a 0°C . Mientras no se comunican, tienen diferente tensión del vapor: en B la tensión es de 4,6 mm de mercurio y en A, de 760 mm de mercurio.

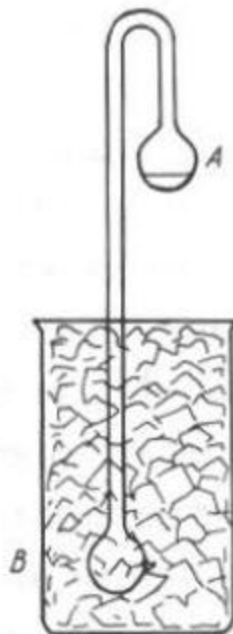


Experimento que explica el « principio de la pared fría »

Pero cuando se abre la llave C, el vapor de A entra en B y enseguida se convierte en agua; por ello, la presión del vapor del recipiente A no puede superar la de B. Se trasvasa vapor de A a B sin aumentar la tensión del vapor en este último. He aquí el principio formulado por primera vez por J. Watt:

"Si se comunican dos recipientes que contienen un mismo líquido a temperatura diferente, tendrán igual tensión de vapor, equivalente a la máxima que se registra a la temperatura más baja de estas dos."

Si el lector tiene alguna noción del instrumento físico llamado "crióforo", muy sencillo e ilustrativo, sabrá qué es el "principio de la pared fría", puesto que su acción está basada precisamente sobre dicho principio. El crióforo consta de dos bolas de vidrio huecas unidas mediante un tubo.



El crióforo: cuando se enfría el recipiente inferior, se congela el agua contenida en el superior

Dentro de este dispositivo hay un poco de agua con vapor encima de ella, y no hay aire. Al trasegar agua a la bola superior, la inferior se coloca en una mezcla refrigerante. Con

arreglo al "principio de la pared fría", en el recipiente superior encima del agua debe establecerse la presión baja del otro, metido dentro de la mezcla refrigerante. Como la presión es reducida, el agua empieza a hervir, mientras que el vapor que se forma en este caso se condensa en la bola inferior enfriada; la ebullición es tan enérgica y la pérdida de calor a consecuencia de la evaporación es tan intensa que se congela, el agua del recipiente superior, aunque no está en el seno del hielo.

J. Watt aprovechó este principio para construir su "refrigerador": el vapor de escape contenido en el cilindro se dirige por sí mismo al refrigerador y se condensa en él. Antes de J. Watt, en la máquina de Newcomen, para condensar el vapor agotado se inyectaba agua fría en el cilindro, enfriando de esta manera no sólo el vapor, sino también las paredes del cilindro, sin lo cual el vapor no se condensaba; durante la carrera siguiente del émbolo, en el cilindro enfriado se inyectaba vapor caliente, cuyas primeras porciones se condensaban en las paredes hasta que la temperatura del cilindro se igualaba con la del vapor en la caldera. Queda claro, pues, que semejante procedimiento de condensación del vapor no era muy económico, por cuanto se consumían grandes cantidades de vapor y agua fría, para lo cual se gastaba mucho carbón. Es por eso que las máquinas anteriores a la de Watt tenían un rendimiento tan bajo, sólo del 0,3 %. Este inventor utilizó, entre otros adelantos, el condensador cuyo funcionamiento se basaba en el "principio de la pared fría", descubierto por él mismo: el vapor abandona por sí mismo el cilindro dejando calientes sus paredes y enfriándose fuera de él, en el condensador.»

Por cierto, al lector le interesará saber de qué manera se aplicará en la astronomía este principio que, al parecer, sólo tiene aplicaciones mecánicas. No obstante, este principio es fundamental al resolver problemas relacionados con la revolución de los planetas más cercanos al Sol, o sea, Mercurio y Venus.

Orbitando al Sol, Mercurio siempre le presenta la misma cara, por lo cual en ese planeta el «día» equivale al «año». En su cara siempre iluminada por los rayos solares, hay un día eterno y un intenso calor, mientras que en la cara opuesta, siempre sumida en las tinieblas del Universo, reinan una noche infinita y un intenso frío de -264°C , casi lo mismo que en el espacio. En la mitad fría de Mercurio la atmósfera debe condensarse y congelarse, aunque consista en hidrógeno. Pero, según el principio de Watt, a esta «pared fría» del planeta debe afluir la atmósfera del hemisferio diurno, donde se establece la presión reducida que se registra en la atmósfera licuada del hemisferio frío. Además, la parte de la atmósfera que se traslada de esa manera, también se condensa a consecuencia de la temperatura tan baja. Este proceso ha de continuar hasta que toda la atmósfera del planeta se desplace a la cara fría. Por consiguiente, Mercurio no puede tener atmósfera gaseosa, lo cual se deriva irrefutablemente del «principio de la pared fría», siendo iguales los períodos de giro del planeta sobre su eje y el de revolución en torno al Sol.

Los astrónomos no tienen opinión unánime en cuanto a la duración de los respectivos períodos de Venus. Unos consideran que en este planeta el «día» dura lo mismo que el «año» como en Mercurio. Según otros, el período de rotación venusiano, es decir, su «día» vale menos que el «año». El referido principio de la pared fría redundaría en beneficio de este segundo grupo de astrónomos, pues las observaciones directas de Venus han permitido establecer que tiene atmósfera: si su «día» y «año» fueran iguales, la atmósfera de dicho planeta correría la misma suerte que la de su vecino Mercurio.

El «principio de la pared fría» también echa por tierra las suposiciones de Herbert Wells de que la Luna pudiera tener atmósfera, enunciada en su ingeniosa novela Los primeros hombres en la Luna. El novelista supone que de noche su atmósfera se congela y de día se derrite y evapora

volviendo a ser gaseosa. Pero ya sabemos que es imposible que en un hemisferio de dicho cuerpo celeste haya un gas licuado y en el otro, la misma sustancia, pero en estado gaseoso.

156. El poder calorífico de la leña

¿Qué leña da más calor, de abedul o de álamo temblón (si se queman cantidades iguales de leña igualmente seca)?

Generalmente se piensa que la leña de abedul da más calor que la de pino y, en especial, que la de álamo temblón. Esto es cierto si se comparan volúmenes iguales: al quemar totalmente un leño de abedul, se obtiene más calor que quemando otro, de álamo temblón, de las mismas dimensiones. No obstante, en física y en técnica, al estimar el poder calorífico del combustible, se comparan las masas y no los volúmenes. Como la madera del abedul es 1,5 veces más densa que la del álamo temblón, no nos debe sorprender el hecho de que el poder calorífico de la leña de abedul es igual que el de la otra especie de madera. En general, cuando se quema un kilogramo de leña de cualquier especie de madera se obtiene una misma cantidad de calor (siempre que sea igual el porcentaje de humedad contenida en ellas).

Así pues, nos parece que la madera de abedul tiene mayor poder calorífico que la de álamo temblón porque comparamos masas desiguales de estos combustibles quemando mayor cantidad de una de ellas.

Si las diferentes especies de madera, de igual masa, producen iguales cantidades de calor, no serán completamente equivalentes como combustible. Cuando se utilizan calderas de vapor, no sólo importa el poder calorífico del combustible, sino también la velocidad con que se quema. En tiempos lejanos, cuando en las fábricas de vidrio se empleaban tales calderas, se prefería la leña de álamo temblón o de pino, que se quema más rápidamente que la de las demás especies. En las chimeneas y estufas que sirven para calentar las habitaciones, la leña de especies más densas calienta mejor que la de otras, de menor densidad, que tardan menos en quemarse.

157. El poder calorífico de la pólvora y del queroseno.

¿Qué agente tiene mayor potencia calorífica, la pólvora o el queroseno?

Sería erróneo suponer que el efecto violento de los explosivos se debe a la enorme cantidad de energía de dichas sustancias, es decir, a su elevado poder calorífico, el cual, en muchos tipos de explosivos, es sorprendentemente pequeño en comparación con el poder calorífico de muchas clases de combustible industrial, como son,

Al quemar 1 kg de:	Se obtiene
Pólvora negra	700 cal
Pólvora de piroxilina	960 cal
Cordita	1200 a 1400 cal

He aquí el poder calorífico de algunos tipos de combustible industrial:

Queroseno y gasolina	11.000 cal
Petróleo	10.500 cal
Carbón	7.000 cal
Leña seca	3.100 cal

Pero no se debe comparar en forma directa estos datos con los anteriores: hay que tener en cuenta que durante la quema de los explosivos sólo se consume el oxígeno contenido en ellos, mientras que en el caso de los combustibles convencionales se consume el del medio ambiente. Al relacionar el número de calorías con la masa del combustible, hay que incluir también la de oxígeno que se consume durante su quema. Esta masa adicional supera 2 ó 3

veces la del combustible. Por ejemplo, para quemar 1 kg de carbón se consumen 2,2 kg de oxígeno (éste es un cálculo teórico; en la práctica la cifra es mayor), 1 kg de petróleo consume 2,8 kg de oxígeno, etc.

Mas, las cifras relativas al poder calorífico de los combustibles superan los datos que caracterizan el de los explosivos, aunque se corrijan correspondientemente. Sería un despilfarro calentar las estufas quemando pólvora, pues esta sustancia produce tres veces menos calor que la hulla.

Por ello, naturalmente surge la pregunta siguiente: si los explosivos contienen cantidades no muy grandes de energía, ¿cómo se podría explicar el terrible efecto destructor que producen? éste se explica únicamente por la rapidez de combustión, es decir, por el hecho de que una cantidad relativamente pequeña de energía se libera en un intervalo de tiempo muy corto. Durante la quema de los explosivos se forma gran cantidad de gases que, encerrados en un recinto de volumen reducido, empujan el proyectil con una presión de 4000 atmósferas.

Si la combustión de la pólvora fuera lenta, en el tiempo necesario para salir el proyectil por la boca del cañón, se quemaría una parte pequeña de la carga y se formarían pocos gases, por lo cual su presión y la velocidad del proyectil serían insuficientes. Pero de hecho la pólvora se quema en el cañón casi instantáneamente. En menos que una centésima de segundo la carga se quema totalmente y los gases proyectan la bala con una fuerza enorme.

158. ¿Qué potencia luminosa tiene una cerilla?

No se trata de una broma, sino de un problema bastante serio de la física. Durante la combustión se libera energía. ¿Cuántos julios de energía se obtienen cada segundo quemando una cerilla?

En otras palabras, ¿cuál es la potencia de una cerilla en vatios?

Como ve, este problema no tiene nada de broma.

No se crea, pues, que la energía de la cerilla es ínfima. Es fácil cerciorarse de que no lo es. He aquí el cálculo. Una cerilla pesa unos 100 mg, 0 0,1 g (el peso se determina mediante una balanza sensible o midiendo su volumen, adoptando su densidad igual a 0,5 g/cm³). Supongamos que el poder calorífico de la madera vale 3000 cal/g. Mediante el reloj determinamos que una cerilla tarda unos 20 segundos en quemarse. Por lo tanto, de las 300 calorías (3000 * 0,1) que rinde una cerilla, cada segundo se obtienen 300 : 20 = 15 cal/g. Una caloría pequeña vale 4,2 J, por consiguiente, la potencia de la cerilla que se quema es de

$$4,2 * 15 = 63 \text{ W.}$$

Así pues, la potencia de una cerilla supera la de una bombilla eléctrica de 50 W.

De la misma manera se podría calcular que fumando un cigarrillo se obtiene una potencia de 20 W. He aquí los datos para el cálculo: masa de la picadura, 5 g; poder calorífico específico, 3000 cal/g; tiempo en que se consume un cigarrillo, 5 min.

159 ¿Cómo se quitan las manchas con la plancha?

¿Merced a qué efecto se quitan de la tela las manchas de grasa con una plancha?

A la ropa se le quitan las manchas de grasa mediante el calentamiento, puesto que la tensión superficial de los líquidos disminuye cuando aumenta la temperatura. «Por eso, si en distintos puntos de una mancha líquida la temperatura es diferente, la grasa tiende a desplazarse de la zona caliente hacia la fría. Si a una de las caras de la tela aplicamos un

hierro caliente, y a la otra una hoja de papel de algodón, este último absorberá la grasa.» (Maxwell, *Theory of Heat*). Por consiguiente, el material que absorberá la grasa debe aplicarse a la cara opuesta a la plancha.

160. Solubilidad de la sal común.

¿A qué temperatura del agua se disuelve mayor cantidad de sal común, a 40 ó 70 grados centígrados?

Cuando se eleva la temperatura del agua, aumenta la solubilidad de la mayoría de las sustancias sólidas disueltas en ella; por ejemplo, a 0°C se disuelve en el agua el 64% del azúcar, mientras que a 100°C, el 83%. No obstante, la sal común no figura entre estas sustancias, ya que su solubilidad en el agua casi no depende de la temperatura: a 0°C se disuelve el 26% de la sal y a 100°C, el 28%. Tanto a 40°C como a 70°C en el agua se disuelve exactamente una misma cantidad de sal, el 27%.