Temperatura y expansión

Hasta aquí se ha estudiado el comportamiento de sistemas en reposo y en movimiento. Las cantidades fundamentales de masa, longitud y tiempo se introdujeron para describir el estado de un sistema mecánico dado.

Considérese, por ejemplo, un bloque de 10 kg moviéndose con una velocidad constante de 20 m/s. Las cantidades de masa, longitud y tiempo están todas presentes y se determinó que ellas son suficientes para describir el movimiento. Puede hablarse del peso de un bloque, de su energía cinética o de su momento, pero una descripción completa de un sistema requiere algo más que un simple planteamiento de estas cantidades.

Se ha observado que el bloque de 10 kg encuentra fuerzas de rozamiento. A medida que el bloque se desliza hasta pararse, parece que su energía desaparece, pero se observa que él y la superficie sobre la que se desliza están ligeramente tibios. Si la energía se conserva, debe suponerse que la energía perdida reaparece en alguna forma todavía no descubierta. Cuando desaparece energía del movimiento visible de los objetos y no reaparece en forma de energía potencial visible, con frecuencia se observa una elevación en la temperatura. En este capítulo se introduce el concepto de temperatura como una cuarta cantidad fundamental.

TEMPERATURA Y ENERGÍA TÉRMICA

Hasta ahora sólo se han considerado las causas y los efectos del movimiento *externo*. Un cuerpo en reposo sobre una mesa tiene un equilibrio traslacional y rotacional relativo a sus alrededores. Empero, un estudio más cuidadoso del cuerpo revela que está internamente activo. En la figura 17-1 se muestra un modelo simple de un sólido, en donde las moléculas individuales están unidas por fuerzas elásticas análogas a los resortes de la figura. Las moléculas oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio con una frecuencia y amplitud determinada, así que tanto la energía potencial como la cinética están asociadas con el movimiento molecular. Ya que esta energía interna se relaciona con las partes frías o calientes de un cuerpo, con frecuencia se la denomina energía térmica.

La energía térmica representa la energía interna total de un objeto, es decir, la suma de sus energías moleculares cinética y potencial.

Cuando dos objetos con diferente energía térmica se ponen en contacto se transfiere energía de uno a otro. Por ejemplo, supóngase que se vacía una cubeta de carbón de piedra caliente en un recipiente con agua, como se muestra en la figura 17-2. El carbón transferirá energía térmica al agua hasta que el sistema alcance una condición estable, llamada *equilibrio térmico*. Cuando se tocan el carbón y el agua producen la misma sensación de caliente o frío y no hay más transferencia de energía térmica.

Tales cambios en los estados de energía térmica considerados no pueden explicarse satisfactoriamente teniendo en cuenta sólo la mecánica clásica. Por tanto se deduce que todos los objetos tienen otra propiedad fundamental, la cual determina si ellos están en equilibrio térmico con otros objetos. A esta propiedad

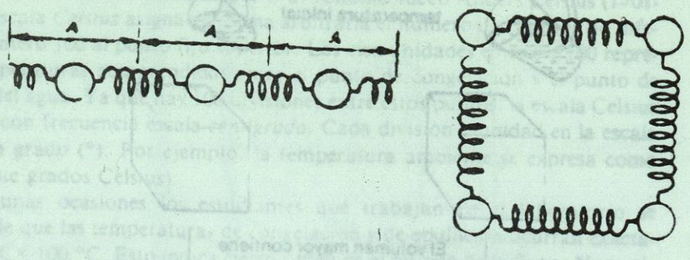


Fig. 17-1 Modelo simplificado de un sólido en el que las moléculas individuales están unidas mediante fuerzas elásticas.

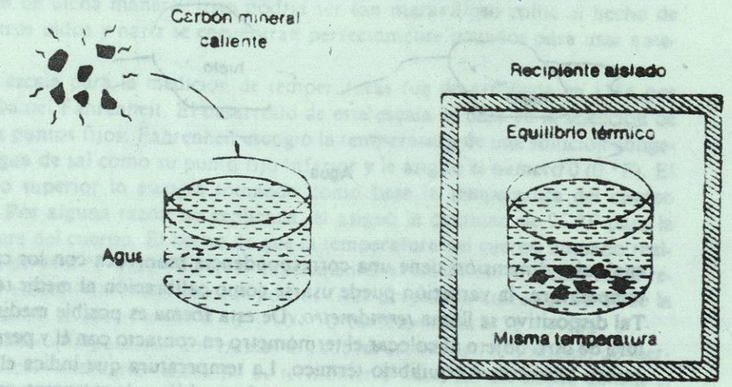


Fig. 17-2 Equilibrio térmico.

se la llama *temperatura*. En el ejemplo anterior, se dice que el carbón y el agua tienen la misma temperatura cuando la transferencia neta de energía térmica es cero.

Se dice que dos objetos están en **equilibrio térmico** *si y sólo si tienen la misma temperatura.*

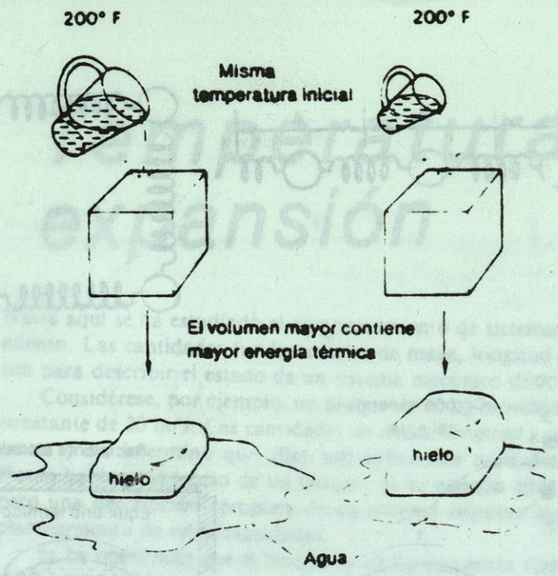
Una vez que se establece un medio para medir temperaturas, se tiene una condición necesaria y suficiente para el equilibrio térmico.

Antes de estudiar la medición de la temperatura, es necesario distinguir claramente entre los conceptos de temperatura y energía térmica. Es posible que dos objetos esten en equilibrio térmico (misma temperatura) con energías térmicas muy diferentes. Por ejemplo, considérese una jarra y una copa ambas llenas de agua, cada una con una temperatura de 200 °F. Si se mezclan, no habrá transferencia de energía, a pesar de que la energía térmica es mucho mayor en la jarra ya que contiene muchas más moléculas. Recuérdese que la energía térmica representa la *suma* de las energías cinética y potencial de todas las moléculas. Si se vacía el agua de cada uno de los recipientes sobre cubos de hielo por separado, como se muestra en la figura 17-3, en uno se fundirá mayor cantidad de hielo debido al mayor volumen de agua de la jarra, indicando que esta tenía mayor energía térmica.

TERMOMETRÍA

La ciencia que estudia la medición de la temperatura se llama *termometría*. En general, la temperatura se determina al medir alguna cantidad mecánica, óptica o eléctrica que varía con la misma. Por ejemplo, la mayor parte de las sustancias se dilatan cuando la temperatura aumenta. Si puede demostrarse que un cambio de

Fig. 17-3 Distinción entre energía térmica y temperatura.



cualquier dimensión tiene una correspondencia biunívoca con los cambios en la temperatura, la variación puede usarse como calibración al medir temperaturas. Tal dispositivo se llama *termómetro*. De esta forma es posible medir la temperatura de otro objeto al colocar el termómetro en contacto con él y permitiendo que ambos alcancen el equilibrio térmico. La temperatura que indica el termómetro mediante una escala graduada corresponde también a la temperatura de los objetos circundantes.

Un **termómetro** es un dispositivo que, por medio de una escala marcada, puede dar una indicación de su propia temperatura.

Son necesarias dos cosas en la construcción de un termómetro. Primero, se debe tener una confirmación de que alguna propiedad termométrica X varía con la temperatura T. Si las variaciónes son lineales, puede escribirse

$$T = kX$$

donde k es la constante de proporcionalidad. Debe seleccionarse la propiedad termométrica de modo que se mida fácilmente; por ejemplo, la dilatación de un líquido, la presión en un gas o la resistencia en un circuito eléctrico. Otras cantidades que varían con la temperatura son la energía de radiación, el color de la luz emitida, la presión del vapor y la susceptibilidad magnética. Empleando cada una de esas propiedades se han construido los termómetros. La selección se hace con base en el intervalo de temperatura, por lo cual el termómetro es lineal, y por la mecánica de su uso.

El segundo requisito para construir un termómetro es establecer una escala de temperaturas. En general, esto se logra al seleccionar los *puntos fijos* superior e inferior, que son temperaturas fácilmente obtenibles en una medición de laboratorio. Dos temperaturas convenientes fácilmente reproducibles son:

El punto fijo inferior (punto de congelación) es la temperatura a la cual coexisten agua y hielo en equilibrio térmico bajo una presión de 1 atm.

El punto fijo superior (punto de ebullición del agua) es la temperatura en la que coexisten agua y vapor en equilibrio térmico bajo una presión de 1 atm.

La medición de temperatura más ampliamente utilizada en trabajos científicos se basa en la escala establecida por el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744). La escala *Celsius* asigna en forma arbitraria el número 0 al punto fijo inferior y el número 100 al punto fijo superior. Las cien unidades entre 0 y 100 representan temperaturas comprendidas entre el punto de congelación y el punto de ebullición del agua. Ya que hay 100 divisiones entre estos puntos, la escala Celsius es llamada con frecuencia escala *centígrada*. Cada división o unidad en la escala se llama un grado (°). Por ejemplo, la temperatura ambiente se expresa como 20 °C (veinte grados Celsius).

En algunas ocasiones los estudiantes que trabajan en el laboratorio se asombran de que las temperaturas de congelación y de ebullición ocurran exactamente a 0 °C y 100 °C. Esto indica cierto orden en el mundo de la física. Naturalmente, la respuesta es que ellos tienen esas temperaturas simplemente porque se definieron de dicha manera. Esto podría ser tan maravilloso como el hecho de que nuestros oídos y nariz se encuentran perfectamente situados para usar anteojos.

Otra escala para la medición de temperaturas fue desarrollada en 1714 por Gabriel Daniel Fahrenheit. El desarrollo de esta escala se basa en la selección de diferentes puntos fijos. Fahrenheit escogió la temperatura de una solución congelada de agua de sal como su punto fijo inferior y le asignó el número 0 (0 °F). El punto fijo superior lo escogió tomando como base la temperatura del cuerpo humano. Por alguna razón no explicada, él asignó la cantidad de 96 °F para la temperatura del cuerpo. El hecho de que la temperatura del cuerpo humano realmente sea de 98.6 °F indica un error experimental al establecer la escala. Si se relaciona la escala Fahrenheit con los puntos fijos aceptados universalmente de la escala Celsius, se observa que 0 °C y 100 °C corresponden a 32 °F y 212 °F.

Es posible comparar las dos escalas al calibrar termómetros comunes de mercurio de vidrio ordinario. Este tipo de termómetro hace uso del hecho de que el mercurio se dilata al incrementarse la temperatura. Consta de un tubo capilar de vidrio al vacío con un depósito de mercurio en el fondo y con el extremo superior cerrado. Ya que el mercurio se dilata más que el tubo de vidrio, la columna de mercurio se eleva en el tubo hasta que el mercurio, el vidrio y sus alrededores logran equilibrarse.

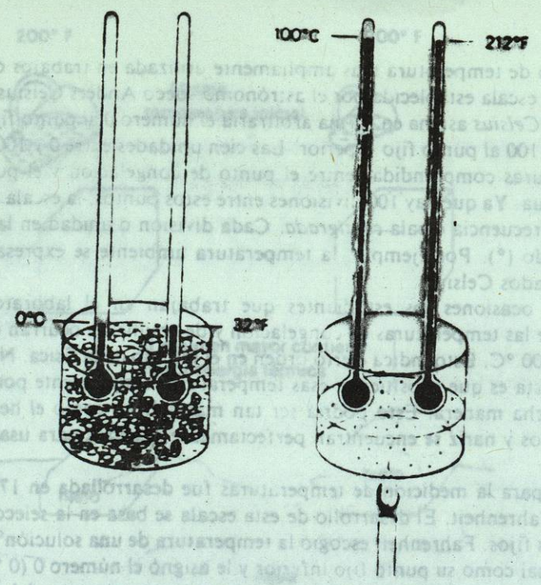
Supóngase que se fabrican dos termómetros no graduados y se colocan en una mezcla de hielo y agua, como se muestra en la figura 17-4. Después de que las columnas de mercurio se estabilizan, una de ellas se marca con 0 °C y la otra con 32 °F. A continuación se colocan los dos termómetros en agua hirviente, hasta que las columnas de mercurio se estabilicen en el punto de ebullición. Nuevamente se marcan los dos termómetros, marcando 100 °C y 212 °F adyacentes al nivel de mercurio arriba de las marcas correspondientes al punto de congelación. El nivel del mercurio es el mismo en ambos termómetros. Así que la única diferencia entre los dos termómetros es la forma en que fueron graduados. Hay 100 divisiones o grados Celsius (C°), entre el punto de congelación y el de ebullición en el termómetro Celsius, y hay 180 divisiones, o grados Fahrenheit (F°), en el termómetro Fahrenheit. Por tanto, 100 grados Celsius representan el mismo intervalo de tempertura que 180 grados Fahrenheit. Simbólicamente,

$$100\ C^\circ = 180\ F^\circ \quad \text{o} \quad 5\ C^\circ = 9\ F^\circ \tag{17-1}$$

La marca de grados (°) se coloca después de la C o la F para destacar que los números corresponden a intervalos de temperatura y no a temperaturas específicas. En otras palabras, 20 F° se lee "veinte grados Fahrenheit" y corresponde a una *diferencia* entre dos temperaturas en la escala Fahrenheit. Por otro lado, el símbolo 20 °F se refiere a una marca específica en el termómetro Fahrenheit. Supóngase, por ejemplo, que una sartén con comida inicialmente se enfría de 98 °F a 76 °F. Estos números corresponden a temperaturas específicas sobre las alturas de la columna de mercurio. Sin embargo, representan un cambio de temperatura de

$$\Delta t = 98\ F - 76\ F = 22\ F^\circ$$

Fig. 17-4 Calibración de los termómetros Celsius y Fahrenheit.



Δt se emplea para denotar un cambio en temperatura.

La física que trata de la transferencia de energía térmica está relacionada siempre con cambios en la temperatura. Es por esto que con frecuencia llega a ser necesario convertir un intervalo de temperatura de una escala en el intervalo correspondiente de la otra. Esto puede lograrse mejor recordando la ecuación (17-1): un intervalo de 5 C° es equivalente a un intervalo de 9 F°. Los factores de conversión apropiados pueden escribirse como

$$\frac{5\ C^\circ}{9\ F^\circ} = 1 = \frac{9\ F^\circ}{5\ C^\circ} \qquad (17\text{-}2)$$

Cuando se convierten F° en C°, debe emplearse el factor de la izquierda; cuando se convierten C° en F°, debe emplearse el factor de la derecha.

EJEMPLO 17-1 Un riel de acero varía su temperatura de 20 °F en la noche a 70 °F al mediodía durante un periodo de 24 h. Exprésese este intervalo de temperaturas en grados Celsius.

Solución El intervalo de temperatura es

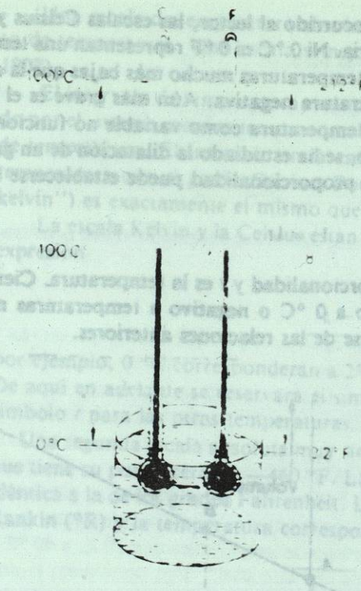
$$\Delta t = 70°F - 20°F = 50\ F^\circ$$

A fin de convertir el intervalo completo en grados Celsius, se selecciona el factor de conversión que cancelará las unidades Fahrenheit. De esta manera

$$\Delta t = 50\ F^\circ \times \frac{5\ C^\circ}{9\ F^\circ} = 27.8\ C^\circ$$

Debe recordarse que la ecuación (17-2) se aplica a intervalos de temperatura. Sólo puede emplearse cuando se trabaja con *diferencias* de temperatura. Es enteramente otra cuestión encontrar la temperatura en la escala Fahrenheit, la cual corresponde a la misma temperatura en la escala Celsius. Puede desarrollarse una ecuación empleando razones y proporciones que ayuden a convertir temperaturas específicas. Supóngase, por ejemplo, que se colocan dos termómetros idénticos en un recipiente con agua, como se muestra en la figura 17-5. Un termómetro se gradúa en grados Fahrenheit y el otro en grados Celsius. Los símbolos t_C y t_F representan la misma temperatura (la temperatura del agua), pero en diferentes

Fig. 17-5 Comparación de las escalas Celsius y Fahrenheit.



escalas. Es evidente que la diferencia entre t_C y 0 °C corresponde al mismo intervalo que la diferencia entre t_F y 32°F. La razón del primero es de 100 divisiones como la razón del último es de 180 divisiones. Por tanto,

$$\frac{t_C - 0}{100} = \frac{t_F - 32}{180}$$

si se simplifica y resuelve para t_C, se obtiene

$$t_C = \frac{5(t_F - 32)}{9} \qquad (17\text{-}3)$$

o, resolviendo para t_F,

$$t_F = \frac{9t_C}{5} + 32 \qquad (17\text{-}4)$$

EJEMPLO 17-2 El punto de fusión del plomo es de 330°C. ¿Cuál es la temperatura correspondiente en la escala Fahrenheit?

Solución Al sustituir en la ecuación (17-4), se obtiene

$$t_F = \frac{9t_C}{5} + 32 = \frac{9(330)}{5} + 32$$

$$= 594 + 32 = 626\ F$$

Debe notarse que las ecuaciones (17-3) y (17-4) no permiten un análisis dimensional porque el origen de cada escala son puntos diferentes. Lo que realmente estas ecuaciones representan es la relación entre los *números* que son asociados a temperaturas específicas en dos escalas *diferentes*. Para ser estrictamente precisos, debe decirse que una temperatura de 0 °C *corresponde* a una temperatura de 32 °F o que una temperatura de 68 °F *corresponde* a una temperatura de 20 °C.