

17

TEMPERATURA Y CALOR

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

- El significado de equilibrio térmico y lo que realmente miden los termómetros.
- Cómo funcionan los diferentes tipos de termómetro.
- La física que hay detrás de la escala de temperatura absoluta, o Kelvin.
- Cómo cambian las dimensiones de un objeto, como resultado del cambio de temperatura.
- El significado de calor, y cómo difiere del de la temperatura.
- Cómo efectuar cálculos que incluyan flujo de calor, cambios de temperatura y cambios de fase.
- Cómo se transfiere calor mediante conducción, convección y radiación.

? En una fábrica de acero, el hierro fundido se calienta a 1500° Celsius para eliminar impurezas. ¿Es correcto decir que el hierro fundido contiene calor?



Tanto en un sofocante día de verano como en una helada noche invernal, nuestro organismo necesita mantenerse a una temperatura casi constante. El organismo cuenta con mecanismos eficaces para controlar la temperatura, aunque a veces necesita ayuda. En un día caluroso, usamos menos ropa para mejorar la transferencia de calor del cuerpo al aire y el enfriamiento por evaporación del sudor. Tal vez tomemos bebidas frías, o con hielo, y nos sentemos cerca de un ventilador o en una habitación con aire acondicionado. En un día frío, usamos ropa más gruesa o nos quedamos en interiores donde hay más calor. Si salimos de casa, nos mantenemos activos y bebemos líquidos calientes. Los conceptos de este capítulo nos ayudarán a entender la física básica del calentamiento y el enfriamiento.

Es común usar indistintamente los términos *temperatura* y *calor* en el habla cotidiana. En física, no obstante, los dos términos tienen significado muy distinto. En este capítulo, definiremos la temperatura en términos de su medición y veremos cómo los cambios de temperatura afectan las dimensiones de los objetos. Estudiaremos cómo el calor se refiere a la transferencia de energía causada por las diferencias de temperatura, y aprenderemos a calcular y controlar tales transferencias de energía.

En este capítulo, nos ocuparemos de los conceptos de temperatura y calor, en relación con los objetos *macroscópicos* como cilindros de gas, cubitos de hielo y el cuerpo humano. En el capítulo 18 veremos estos mismos conceptos desde una perspectiva *microscópica*, en términos del comportamiento de los átomos y las moléculas individuales. Estos dos capítulos establecen las bases para el tema de la **termodinámica**, que es el estudio de las transformaciones de energía donde intervienen calor, trabajo mecánico y otros aspectos de la energía, así como la relación entre estas transformaciones y las propiedades de la materia. La termodinámica es una parte fundamental e indispensable de la física, la química y las ciencias biológicas, sus aplicaciones aparecen en objetos como motores de combustión, refrigeradores, procesos bioquímicos y la estructura de las estrellas. Exploraremos las ideas clave de la termodinámica en los capítulos 19 y 20.

17.1 Temperatura y equilibrio térmico

El concepto de **temperatura** se origina en las ideas cualitativas de “caliente” y “frío” basadas en nuestro sentido del tacto. Un cuerpo que se siente caliente suele tener una temperatura más alta, que un cuerpo similar que se siente frío. Esto es un tanto vago y los sentidos pueden engañarse. Sin embargo, muchas propiedades de la materia que podemos *medir* dependen de la temperatura. La longitud de una barra de metal, la presión de vapor en una caldera, la capacidad de un alambre para conducir corriente eléctrica y el color de un objeto brillante muy caliente: todo esto depende de la temperatura.

La temperatura también se relaciona con la energía cinética de las moléculas de un material. En general, esta relación es muy compleja, por lo que no es un buen punto de partida para *definir* la temperatura. En el capítulo 18 examinaremos la relación entre la temperatura y la energía del movimiento molecular para un gas ideal. No obstante, es importante entender que la temperatura y el calor pueden definirse independientemente de cualquier imagen molecular detallada. En esta sección, desarrollaremos una definición *macroscópica* de la temperatura.

Para usar la temperatura como medida de calidez o de frialdad, necesitamos construir una escala de temperatura. Para ello, podemos usar cualquier propiedad medible de un sistema que varíe con su “calidez” o “frialdad”. La figura 17.1a muestra un sistema común para medir la temperatura. Cuando el sistema se calienta, el líquido coloreado (usualmente mercurio o etanol) se expande y sube por el tubo, y el valor de L aumenta. Otro sistema sencillo es una cantidad de gas en un recipiente de volumen constante (figura 17.1b). La presión p medida por el manómetro aumenta o disminuye, al calentarse o enfriarse el gas. Un tercer ejemplo es la resistencia eléctrica R de un alambre conductor, que también varía al calentarse o enfriarse el alambre. Todas estas propiedades nos dan un número (L , p , R) que varía con la calidez y la frialdad, así que pueden usarse para hacer un **termómetro**.

Para medir la temperatura de un cuerpo, colocamos el termómetro en contacto con él. Si queremos conocer la temperatura de una taza con café, introducimos el termómetro en él; al interactuar los dos, el termómetro se calienta y el café se enfría un poco. Una vez que el termómetro se estabiliza, leemos la temperatura. El sistema está en una condición de *equilibrio*, en la cual la interacción entre el termómetro y el café ya no causa un cambio en el sistema. Llamamos **equilibrio térmico** a dicho estado.

Si dos sistemas están separados por un material **aislante**, como madera, espuma de plástico o fibra de vidrio, se afectan mutuamente con más lentitud. Las hieleras portátiles se fabrican con materiales aislantes para retardar el calentamiento del hielo y de la comida fría en su interior, que tratan de llegar al equilibrio térmico con el aire veraniego. Un *aislante ideal* es un material que no permite la interacción entre los dos sistemas; evita que alcancen el equilibrio térmico si no estaban en él inicialmente. Los aislantes ideales son sólo eso: una idealización; los aislantes reales, como los de las hieleras, no son ideales, así que finalmente su contenido se calentará.

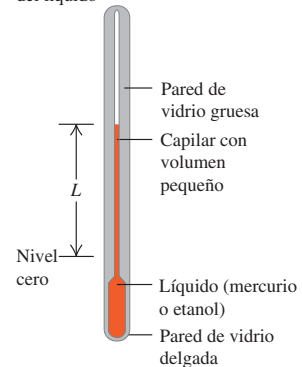
Ley cero de la termodinámica

Podemos descubrir una propiedad importante del equilibrio térmico considerando tres sistemas, A , B y C , que inicialmente no están en equilibrio térmico (figura 17.2). Rodeamos los sistemas con una caja aislante ideal para que sólo puedan interactuar entre sí. Separamos A y B con una pared aislante ideal (la barra verde en la figura 17.2a); pero dejamos que C interactúe tanto con A como con B . Esta interacción se indica en la figura con una barra amarilla que representa un **conductor** térmico, es decir, un material que *permite* la interacción térmica. Esperamos hasta que se establece el equilibrio térmico; entonces, A y B están en equilibrio térmico con C pero, ¿están en equilibrio térmico *entre sí*?

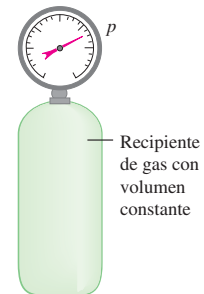
Para averiguarlo, separamos el sistema C de los sistemas A y B con una pared aislante ideal (figura 17.2b) y sustituimos la pared aislante entre A y B por una *conductora*

17.1 Dos dispositivos para medir la temperatura.

a) Los cambios de temperatura hacen que cambie el volumen del líquido

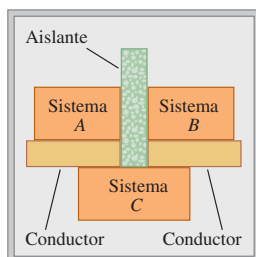


b) Los cambios de temperatura hacen que cambie la presión del gas

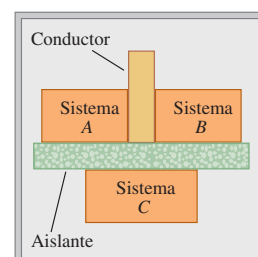


17.2 Ley cero de la termodinámica.

a) Si los sistemas A y B están cada uno en equilibrio térmico con el sistema C ...



b) ... los sistemas A y B están en equilibrio térmico entre sí.



que permite que A y B interactúen. ¿Qué sucede? Los experimentos indican que *nada* sucede; no hay cambios adicionales en A ni en B. Concluimos que

Si inicialmente C está en equilibrio térmico con A y con B, entonces A y B también están en equilibrio térmico entre sí. Este resultado se llama ley cero de la termodinámica.

(La importancia de esta ley se reconoció sólo después de nombrarse la primera, segunda y tercera leyes de la termodinámica. Dado que es fundamental para todas ellas, el nombre “cero” pareció adecuado.)

Suponga ahora que el sistema C es un termómetro, como el sistema de tubo y líquido de la figura 17.1a. En la figura 17.2a, el termómetro C está en contacto con A y con B. Cuando se encuentran en equilibrio térmico, la lectura del termómetro se estabiliza, el termómetro mide la temperatura tanto de A como de B; por lo tanto, ambos tienen la *misma* temperatura. Los experimentos indican que el equilibrio térmico no se afecta si se agregan o quitan aislantes, así que la lectura de C no cambiaría si sólo estuviera en contacto con A o sólo con B. Concluimos que

Dos sistemas están en equilibrio térmico si y sólo si tienen la misma temperatura.

En esto radica la utilidad de los termómetros; un termómetro realmente mide *su propia* temperatura, pero cuando está en equilibrio térmico con otro cuerpo, las temperaturas deben ser iguales. Si difieren las temperaturas de dos sistemas, *no pueden* estar en equilibrio térmico.

Evalúe su comprensión de la sección 17.1 Si se introduce un termómetro en una olla de agua caliente y se registra la lectura de aquél, ¿qué temperatura se registrará? i) la temperatura del agua; ii) la temperatura del termómetro; iii) un promedio igual de las temperaturas del agua y el termómetro; iv) un promedio ponderado de las temperaturas del agua y del termómetro, con mayor énfasis en la temperatura del agua; v) un promedio ponderado del agua y del termómetro, con mayor énfasis en la temperatura del termómetro.



17.2 Termómetros y escalas de temperatura

Para que el dispositivo de líquido en un tubo de la figura 17.1a sea un termómetro útil, necesitamos marcar una escala numerada en la pared del tubo. Esos números son arbitrarios, e históricamente se han usado muchos esquemas diferentes. Suponga que marcamos con “0” el nivel del líquido del termómetro a la temperatura de congelación del agua pura, y con “100” el nivel a la temperatura de ebullición, y luego dividimos la distancia entre ambos puntos en cien intervalos iguales llamados *grados*. El resultado es la **escala de temperatura Celsius** (antes llamada *centígrada*). La tempe-

ratura en la escala Celsius para un estado más frío que el agua al momento de congelarse es un número negativo. La escala Celsius se usa, tanto en la vida cotidiana como en la ciencia y la industria, en casi todo el mundo.

Otro tipo de termómetro común usa una *tira bimetalica*, que se fabrica pegando tiras de dos metales distintos (figura 17.3a). Al aumentar la temperatura de la tira compuesta, un metal se expande más que el otro y la tira se dobla. La tira usualmente se moldea en espiral, con el extremo exterior anclado a la caja y el interior unido a un puntero (figura 17.3c). El puntero gira en respuesta a cambios de temperatura.

En un *termómetro de resistencia*, se mide el cambio en la resistencia eléctrica de una bobina de alambre fino, un cilindro de carbono o un cristal de germanio. Puesto que la resistencia puede medirse con gran precisión, los termómetros de resistencia suelen ser más precisos que los de otro tipo.

Algunos termómetros detectan la cantidad de radiación infrarroja emitida por un objeto. (En la sección 17.7 veremos que *todos* los objetos emiten radiación electromagnética, incluyendo la infrarroja, lo cual es consecuencia de su temperatura. Un ejemplo moderno es un *termómetro para la arteria temporal* (figura 17.4). Una enfermera lo coloca sobre la frente de un paciente cerca de la arteria temporal, y un sensor infrarrojo en el termómetro mide la radiación desde la piel. Las pruebas demuestran que este dispositivo brinda valores más precisos de la temperatura corporal que los termómetros orales o de oído.

En la **escala de temperatura Fahrenheit**, aún usada en la vida cotidiana en Estados Unidos, la temperatura de congelación del agua es de 32 °F (32 grados Fahrenheit) y la de ebullición es de 212 °F, ambas a presión atmosférica estándar. Hay 180 grados entre la congelación y la ebullición, en vez de 100 como en la escala Celsius, así que 1 °F representa un cambio de temperatura sólo $\frac{100}{180}$, o $\frac{5}{9}$ de 1 °C.

Para convertir temperaturas de Celsius a Fahrenheit, observamos que una temperatura Celsius T_C es el número de grados Celsius arriba de la temperatura de congelación del agua; el número de grados Fahrenheit arriba de dicha temperatura es $\frac{9}{5}$ de esa cantidad, pero la temperatura de congelación del agua en la escala Fahrenheit ocurre a 32 °F, así que, para obtener la temperatura Fahrenheit T_F , multiplicamos el valor Celsius por $\frac{9}{5}$ y le sumamos 32°. Con símbolos,

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ \quad (17.1)$$

Para convertir de Fahrenheit a Celsius, despejamos T_C de esta ecuación:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^\circ) \quad (17.2)$$

Es decir, restamos 32° para obtener el número de grados Fahrenheit arriba de la temperatura de congelación y luego multiplicamos por $\frac{5}{9}$ para obtener el número de grados Celsius, esto es, la temperatura Celsius.

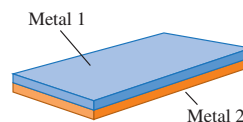
No recomendamos memorizar las ecuaciones (17.1) y (17.2). En vez de ello, trate de entender el razonamiento que condujo a ellas para deducirlas cuando las necesite, verificando su razonamiento con la relación $100^\circ\text{C} = 212^\circ\text{F}$.

Conviene distinguir entre una temperatura real y un *intervalo* de temperatura (una diferencia o cambio de temperatura). Una temperatura real de 20° se escribe 20 °C (veinte grados Celsius), y un *intervalo* de temperatura de 10° se escribe 10 C° (diez grados Celsius). Un vaso de agua que se calienta de 20 °C a 30 °C tiene un cambio de temperatura de 10 C°.

Evalúe su comprensión de la figura 17.2 ¿Cuáles de los siguientes tipos de termómetro tienen que estar en equilibrio térmico con el objeto que se mide, con la finalidad de dar lecturas exactas? i) una tira bimetalica; ii) un termómetro de resistencia; iii) un termómetro para la arteria temporal; iv) tanto i) como ii); todos: i), ii) y iii).

17.3 Uso de una tira bimetalica como termómetro.

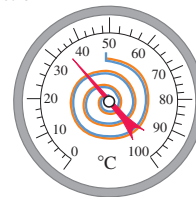
a) Una tira bimetalica



b) La tira se dobla al aumentar su temperatura



c) Una tira bimetalica usada en un termómetro



17.4 El termómetro para arteria temporal mide la radiación infrarroja de la piel que cubre una de las arterias más importantes de la cabeza. Aunque la tapa del termómetro toca la piel, el detector infrarrojo dentro de ésta no lo hace.



17.3 Termómetros de gas y la escala Kelvin

Cuando calibramos dos termómetros, como un sistema de líquido en tubo o un termómetro de resistencia, de modo que coincidan en $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, podrían no coincidir exactamente a temperaturas intermedias. Cualquier escala de temperatura definida de este modo siempre depende un tanto de las propiedades específicas del material empleado. Idealmente, nos gustaría definir una escala de temperatura que *no* dependa de las propiedades de un material específico. Para establecer una escala en verdad independiente del material, necesitamos desarrollar algunos principios de termodinámica. Volveremos a este problema fundamental en el capítulo 20. Aquí veremos un termómetro que se acerca al ideal, el *termómetro de gas*.

El principio de un termómetro de gas muestra que la presión de un gas a volumen constante aumenta con la temperatura. Una cantidad de gas se coloca en un recipiente de volumen constante (figura 17.5a) y se mide su presión con uno de los dispositivos descritos en la sección 14.2. Para calibrar dicho termómetro, medimos la presión a dos temperaturas, digamos $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, graficamos esos puntos y trazamos una recta entre ellos. Así, podemos leer de la gráfica la temperatura correspondiente a cualquier otra presión. La figura 17.5b muestra los resultados de tres experimentos de este tipo, utilizando en cada caso distintas clase y cantidad de gas.

Si extrapolamos la línea, veremos que hay una temperatura hipotética, $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, en la que la presión absoluta del gas sería cero. Podríamos esperar que tal temperatura fuera diferente para diferentes gases, pero resulta ser la *misma* para muchos gases distintos (al menos cuando el límite de densidad del gas es muy bajo). Actualmente no podemos observar esta condición de ausencia de presión; los gases se licuan y solidifican a temperaturas muy bajas, y la presión deja de ser proporcional a la temperatura.

Usamos esta temperatura extrapolada a presión cero como base para una escala de temperatura, con su cero en esta temperatura: la **escala de temperatura Kelvin**, así llamada por el físico inglés Lord Kelvin (1824-1907). Las unidades tienen el mismo tamaño que las de la escala Celsius, pero el cero se desplaza de modo que $0\text{ K} = -273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $273.15\text{ K} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; es decir,

$$T_{\text{K}} = T_{\text{C}} + 273.15 \quad (17.3)$$

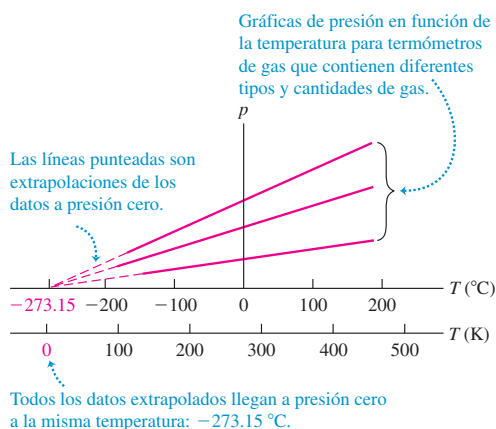
Esta escala se muestra en la figura 17.5b. Una temperatura ambiente común, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($= 68\text{ }^{\circ}\text{F}$), es $20 + 273.15$ o aproximadamente 293 K .

17.5 a) Uso del termómetro de gas con volumen constante para medir temperatura. b) Cuanto mayor sea la cantidad de gas en el termómetro, más alta será la gráfica de presión p contra temperatura T .

a) Termómetro de gas con volumen constante

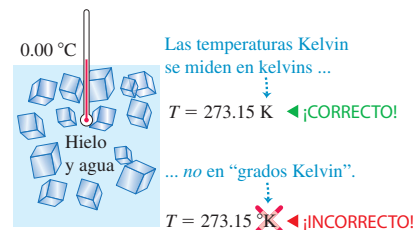


b) Gráfica de presión contra temperatura a volumen constante para tres distintos tipos y cantidades de gas



CUIDADO Nunca diga “grados kelvin”. En la nomenclatura del SI, no se usa “grado” con la escala Kelvin; la temperatura anterior se lee “293 kelvin”, no “grados Kelvin” (figura 17.6). Kelvin con mayúscula se refiere a la escala de temperatura; pero la *unidad* de temperatura es el *kelvin*, con minúscula (aunque se abrevia K). ■

17.6 Usos correcto e incorrecto de la escala Kelvin.



Ejemplo 17.1 Temperatura corporal

Imagine que coloca un trozo de hielo en la boca. En algún momento, toda el agua pasa de hielo a $T_1 = 32.00 \text{ °F}$ a la temperatura corporal $T_2 = 98.60 \text{ °F}$. Expresé estas temperaturas como °C y K, y calcule $\Delta T = T_2 - T_1$ en ambos casos.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Nuestras incógnitas son las temperaturas T_1 y T_2 expresadas en grados Celsius y en kelvins, así como la diferencia entre estas dos temperaturas.

PLANTEAR: Convertiremos las temperaturas Fahrenheit a Celsius con la ecuación (17.2), y las Celsius a Kelvin con la ecuación (17.3).

EJECUTAR: Primero calculamos las temperaturas Celsius. Sabemos que $T_1 = 32.00 \text{ °F} = 0.00 \text{ °C}$, y 98.60 °F es $98.60 - 32.00 = 66.60 \text{ °F}$

por arriba de la temperatura de congelación; multiplicamos esto por $(5 \text{ °C}/9 \text{ °F})$ para obtener 37.00 °C por arriba de la temperatura de congelación, es decir, $T_2 = 37.00 \text{ °C}$.

Para obtener las temperaturas Kelvin, sumamos 273.15 a cada una de las temperaturas Celsius: $T_1 = 273.15 \text{ K}$ y $T_2 = 310.15 \text{ K}$. La temperatura “normal” del cuerpo es 37.0 °C , pero si su doctor le dice que su temperatura es 310 K , no se asuste.

La diferencia de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ es $37.00 \text{ °C} = 37.00 \text{ K}$.

EVALUAR: Las escalas Celsius y Kelvin tienen diferentes ceros pero grados del mismo tamaño. Por lo tanto, cualquier diferencia de temperatura es la *misma* en las escalas Celsius y Kelvin, pero no en la escala Fahrenheit.

La escala Kelvin y temperatura absoluta

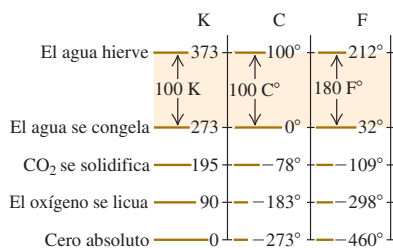
La escala Celsius tiene dos puntos fijos, los puntos de congelación y ebullición normales del agua. No obstante, podemos definir la escala Kelvin usando un termómetro de gas con sólo una temperatura de referencia. Definimos el cociente de cualesquiera dos temperaturas T_1 y T_2 en la escala Kelvin, como el cociente de las presiones correspondientes de termómetro de gas p_1 y p_2 :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (\text{termómetro de gas de volumen constante, } T \text{ en kelvins}) \quad (17.4)$$

La presión p es directamente proporcional a la escala de temperatura Kelvin, como se muestra en la figura 17.5b. Para completar la definición de T , sólo necesitamos especificar la temperatura Kelvin de un solo estado específico. Por razones de precisión y de capacidad de reproducción, el estado elegido es el *punto triple* del agua. Ésta es una combinación única de temperatura y presión en la que pueden coexistir agua sólida (hielo), agua líquida y vapor de agua. Esto ocurre a una temperatura de 0.01 °C con una presión de vapor de agua de 610 Pa (cerca de 0.006 atm). (Ésta es la presión del *agua*; nada tiene que ver directamente con la presión del gas del *termómetro*.) La temperatura del punto triple del agua es, *por definición*, $T_{\text{triple}} = 273.16 \text{ K}$, que corresponden a 0.01 °C . Por la ecuación (17.4), si p_{triple} es la presión en un termómetro de gas a la temperatura T_{triple} y p es la presión a otra temperatura T , entonces T está dada en la escala Kelvin por

$$T = T_{\text{triple}} \frac{p}{p_{\text{triple}}} = (273.16 \text{ K}) \frac{p}{p_{\text{triple}}} \quad (17.5)$$

17.7 Relaciones entre las escalas de temperatura Kelvin (K), Celsius (C) y Fahrenheit (F). Las temperaturas se redondearon al grado más cercano.



Se ha comprobado que termómetros de diversos gases a baja presión coinciden con gran precisión, pero son grandes y voluminosos, y tardan mucho en llegar al equilibrio térmico; se usan básicamente para establecer estándares de alta precisión y calibrar otros termómetros.

Las relaciones entre las tres escalas de temperatura que hemos visto se muestran gráficamente en la figura 17.7. La escala Kelvin se denomina **escala de temperatura absoluta** y su cero [$T = 0 \text{ K} = -273.15^\circ \text{C}$, la temperatura en que $p = 0$ en la ecuación (17.5)] se llama **cero absoluto**. En el cero absoluto, un sistema de moléculas (como una cantidad de gas, líquido o sólido) tiene su energía total (cinética + potencial) mínima posible; sin embargo, por efectos cuánticos, *no* es correcto decir que en cero absoluto todos los movimientos moleculares cesan. Para definir de forma más completa el cero absoluto, necesitaremos los principios termodinámicos que veremos en los siguientes capítulos. Volveremos a este concepto en el capítulo 20.

Evalúe su comprensión de la sección 17.3 Ordene de mayor a menor las siguientes temperaturas: i) 0.00°C ; ii) 0.00°F ; iii) 260.00 K ; iv) 77.00 K ; v) -180.00°C .

17.4 Expansión térmica

Casi todos los materiales se expanden al aumentar su temperatura. El aumento en la temperatura hace que el líquido se expanda en los termómetros de líquido en un tubo (figura 17.1a) y que las tiras bimetalicas se doblen (figura 17.3b). Las cubiertas de puentes necesitan articulaciones y soportes especiales que den margen a la expansión. Una botella totalmente llena de agua y tapada se revienta al calentarse; pero podemos aflojar la tapa metálica de un frasco vertiendo agua caliente sobre ella. Éstos son ejemplos de *expansión térmica*.

Expansión lineal

Suponga que una varilla de material tiene longitud L_0 a una temperatura inicial T_0 . Si la temperatura cambia en ΔT , la longitud cambia en ΔL . Se observa experimentalmente que si ΔT no es muy grande (digamos, menos de 100°C), ΔL es *directamente proporcional* a ΔT . Si dos varillas del mismo material tienen el mismo cambio de temperatura, pero una es dos veces más larga que la otra, su *cambio* de longitud también será del doble. Por lo tanto, ΔL también debe ser proporcional a L_0 (figura 17.8b). Si introducimos una constante de proporcionalidad α (diferente para cada material), expresaremos estas relaciones en una ecuación:

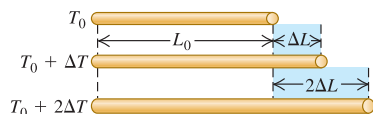
$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (\text{expansión térmica lineal}) \quad (17.6)$$

Si un cuerpo tiene longitud L_0 a la temperatura T_0 , su longitud L a la temperatura $T = T_0 + \Delta T$ es

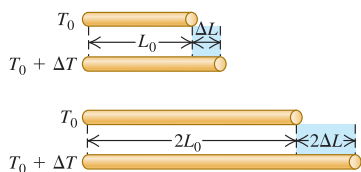
$$L = L_0 + \Delta L = L_0 + \alpha L_0 \Delta T = L_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad (17.7)$$

17.8 Cómo cambia la longitud de una varilla con un cambio en su temperatura. (Por claridad, se exageraron los cambios de longitud.)

a) Para cambios de temperatura moderados, ΔL es directamente proporcional a ΔT .

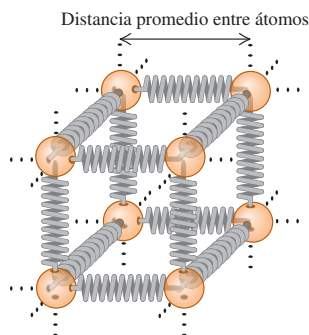
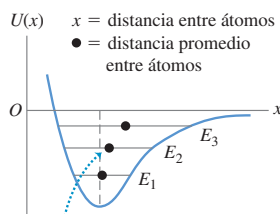


b) ΔL también es directamente proporcional a L_0 .



La constante α , que describe las propiedades de expansión térmica de un material dado, se denomina **coeficiente de expansión lineal**. Las unidades de α son K^{-1} , o bien, $(^\circ \text{C})^{-1}$. (Recuerde que un *intervalo* de temperatura es igual en las escalas Kelvin y Celsius.) En muchos materiales, todas las dimensiones lineales cambian según la ecuación (17.6) o la (17.7). Así, L podría ser el espesor de una varilla, la longitud del lado de una lámina cuadrada o el diámetro de un agujero. Algunos materiales, como la madera o los monocristales, se expanden de diferente forma en diferentes direcciones. No consideraremos esta complicación.

a) Modelo de las fuerzas entre átomos vecinos de un sólido

b) Gráfica de la energía potencial del "resorte" $U(x)$ 

Al aumentar la energía de E_1 a E_2 a E_3 , se incrementa la distancia media entre los átomos.

Podemos entender la expansión térmica cualitativamente desde una perspectiva molecular. Imaginemos las fuerzas interatómicas en un sólido como resortes (figura 17.9). (Ya exploramos la analogía entre las fuerzas de resortes e interatómicas en la sección 13.4.) Cada átomo vibra alrededor de su posición de equilibrio. Al aumentar la temperatura, también se incrementan la energía y la amplitud de la vibración. Las fuerzas de resorte interatómicas no son simétricas alrededor de la posición de equilibrio; suelen comportarse como un resorte que es más fácil de estirar que de comprimir. En consecuencia, al aumentar la amplitud de las vibraciones, también se incrementa la distancia *media* entre las moléculas. Al separarse los átomos, todas las dimensiones aumentan.

CUIDADO **Calentamiento de un objeto que tiene un agujero** Si un objeto sólido tiene un agujero, ¿qué sucede con el tamaño del agujero al aumentar la temperatura del objeto? Un error común consiste en suponer que si el objeto se expande, el agujero se encoge porque el material se expande hacia el agujero; no obstante, la verdad es que el agujero también se expande (figura 17.10); como dijimos antes, *todas* las dimensiones lineales de un objeto cambian del mismo modo al cambiar la temperatura. Si no está convencido, imagine que los átomos de la figura 17.9a delimitan un agujero cúbico. Al expandirse el objeto, los átomos se separan y el tamaño del agujero aumenta. La única situación en que un "agujero" se llena debido a la expansión térmica es cuando dos secciones de un objeto separadas se expanden y reducen dicha separación (figura 17.11). ■

La proporcionalidad directa expresada por la ecuación (17.6) no es exacta; sólo es *aproximadamente* correcta para cambios de temperatura pequeños. Para un material dado, α varía un poco con la temperatura inicial T_0 y el tamaño del intervalo de temperatura. Aquí ignoraremos tal complicación. En la tabla 17.1 de la página 578, se dan valores promedio de α para varios materiales. Dentro de la precisión de estos valores, no necesitamos preocuparnos si T_0 es 0°C o bien 20°C o alguna otra temperatura. Observe que los valores típicos de α son muy pequeños; aun para un cambio de temperatura de 100°C , el cambio de longitud fraccionario $\Delta L/L_0$ es del orden de $1/1000$ para los metales de la tabla.

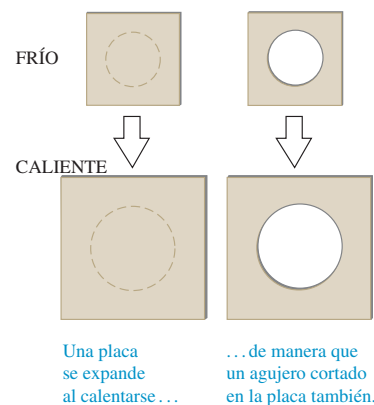
Expansión de volumen

Un aumento de temperatura suele aumentar el *volumen* de materiales tanto líquidos como sólidos. Al igual que en la expansión lineal, se ha visto experimentalmente que, si el cambio de temperatura ΔT no es muy grande (menos de 100°C), el aumento de volumen ΔV es aproximadamente proporcional al cambio de temperatura ΔT y al volumen inicial V_0 :

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (\text{expansión térmica de volumen}) \quad (17.8)$$

17.9 a) Podemos modelar los átomos en un sólido como si estuvieran unidos por "resortes", que son más fáciles de estirar que de comprimir. b) La curva de la energía potencial de "resorte" $U(x)$ contra distancia x entre átomos vecinos *no* es simétrica (compare con la figura 13.20b). Al aumentar la energía, los átomos oscilan con mayor amplitud y se incrementa la distancia promedio.

17.10 Cuando un objeto sufre una expansión térmica, todos los agujeros que contiene también se expanden. (Se exageró la expansión.)



17.11 Cuando este avión SR-71 está en tierra, los paneles de sus alas embonan de forma tan holgada que hay fugas de combustible de las alas al suelo. Sin embargo, una vez que el avión está en vuelo a más del triple de la rapidez del sonido, la fricción del aire calienta tanto los paneles que se expanden y embonan perfectamente. (El abastecimiento de combustible durante el vuelo compensa la pérdida de combustible en tierra.)



Tabla 17.1 Coeficientes de expansión lineal

Material	α [K^{-1} o $(^\circ\text{C})^{-1}$]
Aluminio	2.4×10^{-5}
Latón	2.0×10^{-5}
Cobre	1.7×10^{-5}
Vidrio	$0.4\text{--}0.9 \times 10^{-5}$
Invar (aleación níquel-hierro)	0.09×10^{-5}
Cuarzo (fundido)	0.04×10^{-5}
Acero	1.2×10^{-5}

La constante β caracteriza las propiedades de expansión de volumen de un material dado; se llama **coeficiente de expansión de volumen**. Las unidades de β son K^{-1} , o bien, $(^\circ\text{C})^{-1}$. Al igual que en la expansión lineal, β varía un poco con la temperatura, y la ecuación (17.8) es una relación aproximada válida sólo para cambios de temperatura pequeños. En muchas sustancias, β disminuye a bajas temperaturas. En la tabla 17.2 se dan algunos valores de β a temperatura ambiente. Observe que, en general, los valores para los líquidos son mucho mayores que para los sólidos.

Para materiales sólidos, hay una relación sencilla entre el coeficiente de expansión de volumen β y el coeficiente de expansión lineal α . Para deducir esta relación, consideramos un cubo de material con longitud de lado L y volumen $V = L^3$. En la temperatura inicial, los valores son L_0 y V_0 . Al aumentar la temperatura en dT , la longitud del lado aumenta en dL y el volumen aumenta en una cantidad dV dada por

$$dV = \frac{dV}{dL} dL = 3L^2 dL$$

Ahora sustituimos L y V por los valores iniciales L_0 y V_0 . Por la ecuación (17.6), dL es

$$dL = \alpha L_0 dT$$

Puesto que $V_0 = L_0^3$, esto implica que dV también puede expresarse como

$$dV = 3L_0^2 \alpha L_0 dT = 3\alpha V_0 dT$$

Lo cual es congruente con la forma infinitesimal de la ecuación (17.8), $dV = \beta V_0 dT$, sólo si

$$\beta = 3\alpha \quad (17.9)$$

Verifique esta relación para algunos de los materiales de las tablas 17.1 y 17.2.

Tabla 17.2 Coeficientes de expansión de volumen

Sólidos	β [K^{-1} o $(^\circ\text{C})^{-1}$]	Líquido	β [K^{-1} o $(^\circ\text{C})^{-1}$]
Aluminio	7.2×10^{-5}	Etanol	75×10^{-5}
Latón	6.0×10^{-5}	Disulfuro de carbono	115×10^{-5}
Cobre	5.1×10^{-5}	Glicerina	49×10^{-5}
Vidrio	$1.2\text{--}2.7 \times 10^{-5}$	Mercurio	18×10^{-5}
Invar	0.27×10^{-5}		
Cuarzo (fundido)	0.12×10^{-5}		
Acero	3.6×10^{-5}		

Estrategia para resolver problemas 17.1

Expansión térmica



IDENTIFICAR los conceptos importantes: Decida si el problema implica cambios de longitud (expansión térmica lineal) o de volumen (expansión térmica de volumen).

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. Elija la ecuación (17.6) para la expansión lineal y la ecuación (17.8) para la expansión de volumen.
2. Identifique las cantidades conocidas y desconocidas en la ecuación (17.6) o (17.8).

EJECUTAR la solución como sigue:

1. Despeje las incógnitas. Muchas veces se dan dos temperaturas y hay que calcular ΔT ; o se da una temperatura inicial T_0 y hay que

determinar la temperatura final que corresponde a un cambio de volumen o longitud dado. En este caso, obtenga ΔT primero; así, la temperatura final será $T_0 + \Delta T$.

2. La consistencia de unidades es crucial, como siempre. L_0 y ΔL (o bien, V_0 y ΔV) deben tener las mismas unidades, y si usa un valor de α o de β en K^{-1} o de $(^\circ\text{C})^{-1}$, ΔT debe estar en kelvins o grados Celsius ($^\circ\text{C}$). Pero se pueden usar K y $^\circ\text{C}$ indistintamente.

EVALUAR la respuesta: Compruebe que sus resultados sean lógicos. Recuerde que los tamaños de los agujeros en un material se expanden con la temperatura como cualquier otra dimensión lineal, y el volumen de una cavidad (como el volumen de un recipiente) se expande igual que la forma sólida correspondiente.

Ejemplo 17.2 Cambio de longitud por cambio de temperatura I

Un evaluador usa una cinta métrica de acero que tiene exactamente 50.000 m de longitud a una temperatura de 20 °C. ¿Qué longitud tiene en un día caluroso de verano en el que la temperatura es de 35 °C?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Se trata de un problema de expansión lineal. Se nos dan la longitud y la temperatura iniciales de la cinta, y nuestra incógnita es la longitud de la cinta a la temperatura final.

PLANTEAR: Usamos la ecuación (17.6) para calcular el cambio ΔL en la longitud de la cinta. Tenemos $L = 50.000$ m, $T_0 = 20$ °C y $T = 35$ °C, y obtenemos el valor de α de la tabla 17.1. La incógnita es la nueva longitud $L = L_0 + \Delta L$.

EJECUTAR: El cambio de temperatura es $\Delta T = T - T_0 = 15$ °C, así que, por la ecuación (17.6), el cambio de longitud ΔL y la longitud final $L = L_0 + \Delta L$ son

$$\begin{aligned}\Delta L &= \alpha L_0 \Delta T = (1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})(50 \text{ m})(15 \text{ K}) \\ &= 9.0 \times 10^{-3} \text{ m} = 9.0 \text{ mm} \\ L &= L_0 + \Delta L = 50.000 \text{ m} + 0.009 \text{ m} = 50.009 \text{ m}\end{aligned}$$

Así, la longitud a 35 °C es de 50.009 m.

EVALUAR: Observe que L_0 se da con 5 cifras significativas, pero sólo necesitamos dos de ellas para calcular ΔL . Observe también que ΔL es proporcional a la longitud inicial L_0 : una cinta de 50 m se expandiría 9 mm; y una de 0.50 m (50 cm) tan sólo se expandiría 0.090 mm.

Este ejemplo muestra que los metales se expanden muy poco cuando el cambio de temperatura es moderado. Aún una bandeja metálica para hornear en un horno a 200 °C (392 °F) no es mucho mayor que a temperatura ambiente.

Ejemplo 17.3 Cambio de longitud por cambio de temperatura II

En el ejemplo 17.2, el evaluador usa la cinta para medir una distancia cuando la temperatura es de 35 °C; el valor que lee es 35.794 m. Determine la distancia real. Suponga que la cinta está calibrada para usarse a 20 °C.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Como vimos en el ejemplo 17.2, a 35 °C la cinta se expandió un poco. La distancia entre dos marcas sucesivas de metro es un poco más de un metro, así que la escala subestima la distancia real.

PLANTEAR: Por lo tanto, la distancia verdadera (nuestra incógnita) es *mayor* que la leída, por un factor igual al cociente entre la longitud L de la cinta a 35 °C y su longitud L_0 a 20 °C.

EJECUTAR: La tasa L/L_0 es (50.009 m)/(50.000 m), así que la distancia verdadera es

$$\frac{50.009 \text{ m}}{50.000 \text{ m}} (35.794 \text{ m}) = 35.800 \text{ m}$$

EVALUAR: Aunque la diferencia de 0.008 m = 8 mm entre la lectura de la escala y la distancia real parece pequeña, puede ser importante en trabajos de precisión.

Ejemplo 17.4 Cambio de volumen por cambio de temperatura

Un frasco de vidrio con volumen de 200 cm³ se llena hasta el borde con mercurio a 20 °C. ¿Cuánto mercurio se desbordará si la temperatura del sistema se eleva a 100 °C? El coeficiente de expansión lineal del vidrio es de $0.40 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este problema implica la expansión de volumen del vidrio y del mercurio. La cantidad derramada depende de la *diferencia* entre los cambios de volumen de estos dos materiales.

PLANTEAR: La cantidad que se desborda es igual a la diferencia entre los valores de ΔV para el mercurio y el vidrio, ambos dados por la ecuación (17.8). Para que el mercurio se derrame, su coeficiente de expansión de volumen β debe ser mayor que el del vidrio. El valor para el mercurio $\beta_{\text{mercurio}} = 18 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, tomado de la tabla 17.2; el valor de β para este tipo de vidrio lo obtenemos con la ecuación (17.9), $\beta = 3\alpha$.

EJECUTAR: El coeficiente de expansión de volumen para el vidrio es

$$\beta_{\text{vidrio}} = 3\alpha_{\text{vidrio}} = 3(0.40 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}) = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

continúa

El aumento de volumen del frasco de vidrio es

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{vidrio}} &= \beta_{\text{vidrio}} V_0 \Delta T \\ &= (1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})(200 \text{ cm}^3)(100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \\ &= 0.19 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

El aumento de volumen del mercurio es

$$\begin{aligned}\Delta V_{\text{mercurio}} &= \beta_{\text{mercurio}} V_0 \Delta T \\ &= (18 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})(200 \text{ cm}^3)(100^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \\ &= 2.9 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

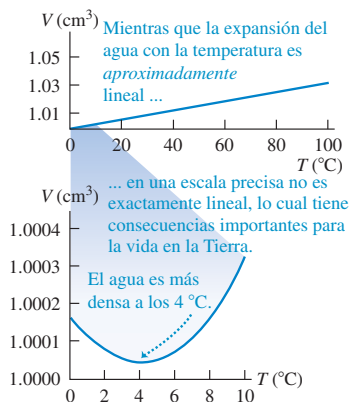
El volumen de mercurio que se desborda es

$$\Delta V_{\text{mercurio}} - \Delta V_{\text{vidrio}} = 2.9 \text{ cm}^3 - 0.19 \text{ cm}^3 = 2.7 \text{ cm}^3$$

EVALUAR: Básicamente, así es como funciona un termómetro de mercurio en vidrio, excepto que, en vez de dejar que el mercurio se derrame, se deja que suba dentro de un tubo sellado al aumentar T .

Como muestran las tablas 17.1 y 17.2, el vidrio tiene coeficientes de expansión α y β menores que la mayoría de los metales. Por ello, podemos usar agua caliente para aflojar la tapa metálica de un frasco de vidrio: el metal se expande más que el vidrio.

17.12 Volumen de un gramo de agua en el intervalo de temperaturas de 0°C a 10°C . A los 100°C , el volumen ha aumentado a 1.034 cm^3 . Si el coeficiente de expansión de volumen fuera constante, la curva sería una línea recta.



17.13 Los dientes de una articulación de expansión de un puente. Se requieren estas articulaciones para dar cabida a los cambios de longitud resultado de la expansión térmica.



Expansión térmica del agua

El agua, en el intervalo de temperaturas de 0°C a 4°C , se *contrae* al aumentar la temperatura. En este intervalo, su coeficiente de expansión es *negativo*. Por arriba de 4°C , el agua se expande al calentarse (figura 17.12). Por lo tanto, el agua tiene su mayor densidad a 4°C . El agua también se expande al congelarse, lo cual explica por qué se forman jorobas en el centro de los compartimentos de una charola para cubitos de hielo. En cambio, la mayoría de los materiales se contraen al congelarse.

Este comportamiento anómalo del agua tiene un efecto importante sobre la vida vegetal y animal en los lagos. Un lago se enfría de la superficie hacia abajo; por arriba de los 4°C , el agua enfriada en la superficie se hunde por su mayor densidad; sin embargo, cuando la temperatura superficial baja de 4°C , el agua cerca de la superficie es menos densa que la de abajo, que es más caliente. Por lo tanto, el flujo hacia abajo cesa y el agua cerca de la superficie sigue siendo más fría que en el fondo. Al congelarse la superficie, el hielo flota porque es menos denso que el agua. El agua en el fondo sigue a 4°C hasta que casi todo el lago se congela. Si el agua se comportara como la mayoría de las sustancias, contrayéndose continuamente al enfriarse y congelarse, los lagos se helarían de abajo hacia arriba. La circulación por diferencias de densidad haría subir continuamente el agua más caliente para un enfriamiento más eficiente, y los lagos se congelarían por completo con mucha mayor facilidad. Esto destruiría todas las plantas y animales que no resisten el congelamiento. Si el agua no tuviera esta propiedad especial, la evolución de la vida habría seguido un curso muy diferente.

Esfuerzo térmico

Si sujetamos rígidamente los extremos de una varilla para evitar su expansión o contracción y luego variamos la temperatura, aparecerán esfuerzos de tensión o compresión llamados **esfuerzos térmicos**. La varilla quiere expandirse o contraerse, pero las abrazaderas no la dejan. Los esfuerzos pueden ser tan grandes que deformen irreversiblemente la varilla o incluso la rompan. (Quizá sea conveniente repasar la explicación de esfuerzo y deformación en la sección 11.4.)

Los ingenieros deben tomar en cuenta el esfuerzo térmico al diseñar estructuras. Las autopistas de hormigón y las cubiertas de puentes suelen tener espacios entre secciones, llenos con material flexible o salvados por dientes que embonan (figura 17.13), con la finalidad de permitir la expansión y contracción del hormigón. Las tuberías de vapor largas tienen juntas de expansión o secciones con forma de U para evitar que se pandeen o estiren al cambiar la temperatura. Si un extremo de un puente de acero está fijo rígidamente a su estribo, el otro por lo regular descansa en rodillos.

Para calcular los esfuerzos térmicos en una varilla sujeta, calculamos qué tanto se *expandiría* (o *contraería*) si no estuviera sujeta, y luego calculamos el esfuerzo nece-

sario para comprimirla (o estirarla) a su longitud original. Suponga que una varilla de longitud L_0 y área transversal A se mantiene con longitud constante, mientras se reduce la temperatura (ΔT negativo), causando un esfuerzo de tensión. El cambio fraccional de longitud si la varilla estuviera libre sería

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{térmico}} = \alpha \Delta T \quad (17.10)$$

Tanto ΔL como ΔT son negativos. La tensión debe aumentar en una cantidad F apenas suficiente para producir un cambio fraccional de longitud igual y opuesto $(\Delta L/L_0)_{\text{tensión}}$. Por la definición del módulo de Young, ecuación (11.10),

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \quad \text{así que} \quad \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{tensión}} = \frac{F}{AY} \quad (17.11)$$

Si la longitud tiene que ser constante, el cambio fraccional *total* de longitud debe ser cero. Por las ecuaciones (17.10) y (17.11), esto implica que

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{térmico}} + \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)_{\text{tensión}} = \alpha \Delta T + \frac{F}{AY} = 0$$

Despejando el esfuerzo de tensión F/A necesario para mantener constante la longitud de la varilla:

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha \Delta T \quad (\text{esfuerzo térmico}) \quad (17.12)$$

Si la temperatura disminuye, ΔT es negativo, así que F y F/A son positivos; esto implica que se requieren una fuerza y un esfuerzo *de tensión* para mantener la longitud. Si ΔT es positivo, F y F/A son negativos, y la fuerza y el esfuerzo requeridos son *de compresión*.

Si hay diferencias de temperatura dentro de un cuerpo, habrá expansión o contracción no uniformes, y pueden inducirse esfuerzos térmicos. Es factible romper un tazón de vidrio vertiendo en él agua muy caliente; el esfuerzo térmico entre las partes caliente y fría excede el esfuerzo de rotura del vidrio, agrietándolo. El mismo fenómeno hace que se rompa un cubo de hielo si se deja caer en agua tibia. Los vidrios resistentes al calor, como Pyrex^{MR}, tienen coeficientes de expansión excepcionalmente bajos y una resistencia elevada.

Ejemplo 17.5 Esfuerzo térmico

Un cilindro de aluminio de 10 cm de longitud, con área transversal de 20 cm², se usará como espaciador entre dos paredes de acero. A 17.2 °C, el cilindro apenas se desliza entre las paredes. Si se calienta a 22.3 °C, ¿qué esfuerzo habrá en el cilindro y qué fuerza total ejercerá éste sobre cada pared, suponiendo que las paredes son perfectamente rígidas y están separadas por una distancia constante?

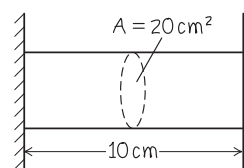
SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Las incógnitas son el esfuerzo térmico del cilindro y la fuerza asociada que éste ejerce sobre cada una de las paredes que lo sostienen.

PLANTEAR: La figura 17.14 muestra un diagrama de la situación. Usaremos la ecuación (17.12) para relacionar el esfuerzo con el cam-

bio de temperatura. Los valores necesarios para el módulo de Young Y y el coeficiente de expansión lineal α son los del aluminio, el material de que está hecho el cilindro. Obtendremos esos valores de las tablas 11.1 y 17.1, respectivamente.

17.14 Nuestro diagrama de este problema.



continúa

EJECUTAR: Para el aluminio, $Y = 7.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ y $\alpha = 2.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. El cambio de temperatura es $\Delta T = 22.3^\circ\text{C} - 17.2^\circ\text{C} = 5.1^\circ\text{C} = 5.1 \text{ K}$. El esfuerzo es F/A ; por la ecuación (17.12),

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha\Delta T = -(0.70 \times 10^{11} \text{ Pa})(2.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1})(5.1 \text{ K}) \\ = -8.6 \times 10^6 \text{ Pa} \text{ (o } -1200 \text{ lb/in}^2\text{)}$$

El signo negativo indica que se requiere un esfuerzo de compresión, no de tensión, para mantener constante la longitud del cilindro. Este esfuerzo es independiente de la longitud y del área de sección transversal

del cilindro. La fuerza total F es el área transversal multiplicada por el esfuerzo:

$$F = A\left(\frac{F}{A}\right) = (20 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(-8.6 \times 10^6 \text{ Pa}) \\ = -1.7 \times 10^4 \text{ N}$$

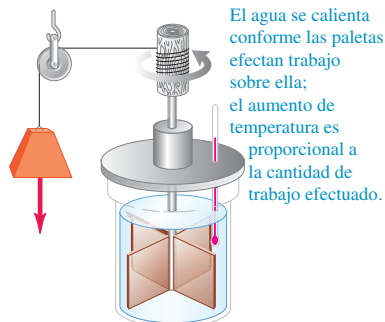
es decir, casi 2 toneladas. El signo negativo indica compresión.

EVALUAR: El esfuerzo en el cilindro y la fuerza que ejerce sobre cada pared son inmensos. Esto destaca la importancia de contemplar tales esfuerzos térmicos en ingeniería.

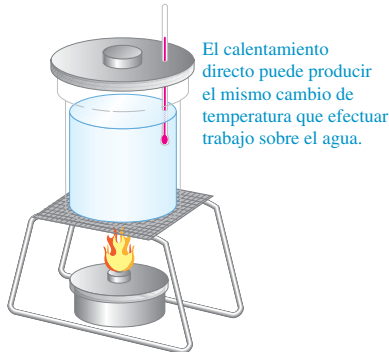
Evalúe su comprensión de la sección 17.4 En la tira bimetalica de la figura 17.3a, el metal 1 es cobre. ¿Cuál de los siguientes materiales podría usarse como metal 2. (Quizás haya más de una respuesta correcta.) i) acero; ii) latón; iii) aluminio.

17.15 El mismo cambio de temperatura del mismo sistema puede lograrse a) realizando trabajo sobre él o b) agregándole calor.

a) Aumento de la temperatura del agua al efectuar trabajo sobre ella



b) Incremento de la temperatura del agua transfiriéndole directamente calor



17.5 Cantidad de calor

Si metemos una cuchara fría en una taza con café caliente, la cuchara se calienta y el café se enfría para establecer el equilibrio térmico. La interacción que causa estos cambios de temperatura es básicamente una transferencia de *energía* de una sustancia a otra. La transferencia de energía que se da exclusivamente por una diferencia de temperatura se denomina *flujo de calor* o *transferencia de calor*, en tanto que la energía así transferida se llama **calor**.

Durante los siglos XVIII y XIX, se fue entendiendo poco a poco la relación entre el calor y las otras formas de energía. Sir James Joule (1818-1889) estudió cómo puede calentarse el agua por agitación vigorosa con una rueda de paletas (figura 17.15a), la cual agrega energía al agua realizando un *trabajo* sobre ella, Joule observó que *el aumento de temperatura es directamente proporcional a la cantidad de trabajo realizado*. Es posible lograr el mismo cambio de temperatura poniendo el agua en contacto con un cuerpo más caliente (figura 17.15b); por lo tanto, esta interacción también debe implicar un intercambio de energía. Exploraremos la relación entre calor y energía mecánica con mayor detalle en los capítulos 19 y 20.

CUIDADO **Temperatura contra calor** Es absolutamente indispensable tener bien clara la distinción entre *temperatura* y *calor*. La temperatura depende del estado físico de un material y es una descripción cuantitativa de su calidez o frialdad. En física, el término “calor” siempre se refiere a transferencia de energía de un cuerpo o sistema a otro, a causa de una diferencia de temperatura, nunca a la cantidad de energía contenida en un sistema dado. Podemos modificar la temperatura de un cuerpo agregándole o quitándole calor, o agregándole o quitándole energía de otras formas, como trabajo mecánico (figura 17.15a). Si cortamos un cuerpo a la mitad, cada mitad tiene la misma temperatura que el todo; no obstante, para elevar la temperatura de una mitad un intervalo dado, le agregamos la *mitad* del calor que agregáramos al todo.

Podemos definir una *unidad* de cantidad de calor con base en el cambio de temperatura de un material específico. La **caloría** (abreviada cal) se define como la *cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5 °C a 15.5 °C*. También se usa la kilocaloría (kcal), igual a 1000 cal; las calorías de valor alimentario son en realidad kilocalorías (figura 17.16). Una unidad correspondiente de calor que usa grados Fahrenheit y unidades inglesas es la **unidad térmica británica**

o Btu. Una Btu es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra (peso) de agua 1 °F, de 63 °F a 64 °F.

Puesto que el calor es una transferencia de energía, debe haber una relación definida entre estas unidades y las de energía mecánica que conocemos, como el joule. Experimentos similares en concepto al de Joule han demostrado que

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 4186 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} \cdot \text{lb} = 252 \text{ cal} = 1055 \text{ J}$$

La caloría no es una unidad fundamental del SI. El Comité Internacional de Pesos y Medidas recomienda usar el joule como unidad básica de energía en todas sus formas, incluido el calor. Seguiremos esa recomendación en este libro.

Calor específico

Usamos el símbolo Q para cantidad de calor. Cuando el calor está asociado a un cambio de temperatura infinitesimal dT , lo llamamos dQ . Se observa que la cantidad de calor Q necesaria para elevar la temperatura de una masa m de cierto material de T_1 a T_2 es aproximadamente proporcional al cambio de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ y a la masa m del material. Si calentamos agua para hacer té, necesitamos el doble de calor para dos tazas que para una, si el intervalo de temperatura es el mismo. La cantidad de calor requerida también depende de la naturaleza del material; se requieren 4190 J de calor para elevar la temperatura de 1 kilogramo de agua 1 °C, pero sólo 910 J para elevar en 1 °C la temperatura de 1 kilogramo de aluminio.

Juntando todas estas relaciones, tenemos

$$Q = mc \Delta T \quad (\text{calor requerido para cambiar la temperatura de la masa } m) \quad (17.13)$$

donde c es una cantidad, diferente para cada material, llamada **calor específico** del material. Para un cambio infinitesimal de temperatura dT y la cantidad de calor correspondiente dQ ,

$$dQ = mc dT \quad (17.14)$$

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (\text{calor específico}) \quad (17.15)$$

En las ecuaciones (17.13), (17.14) y (17.15), Q (o dQ) y ΔT (o dT) pueden ser positivos o negativos. Si son positivos, entra calor en el cuerpo y aumenta su temperatura; si son negativos, sale calor del cuerpo y disminuye su temperatura.

CAUIDADO La definición de calor Recuerde que dQ no representa un cambio en la cantidad de calor *contenida* en un cuerpo; tal concepto carece de sentido. El calor siempre es *transferencia* de energía a causa de una diferencia de temperatura. No existe “la cantidad de calor de un cuerpo”. ■

El calor específico del agua es aproximadamente

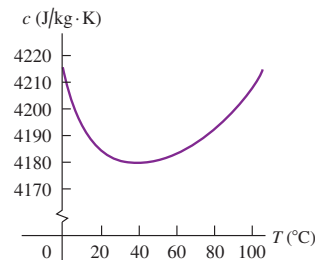
$$4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad 1 \text{ cal/g} \cdot \text{C}^\circ \quad \text{o bien,} \quad 1 \text{ Btu/lb} \cdot \text{F}^\circ$$

El calor específico de un material siempre depende un poco de la temperatura inicial y del intervalo de temperatura. La figura 17.17 muestra esta variación para el agua. En los problemas y ejemplos de este capítulo normalmente haremos caso omiso de esta pequeña variación.

17.16 El lema “Komm in Schwung mit Zucker” de este paquete de azúcar alemán puede traducirse como “El azúcar le da a usted momento lineal”. De hecho, el azúcar le da a usted *energía*: de acuerdo con la etiqueta, cada paquete tiene un contenido energético de 22 kilocalorías (22 calorías de los alimentos) o 92 kilojoules. (Analizamos la diferencia entre energía y momento lineal en la sección 8.1.)



17.17 Capacidad calorífica del agua en función de la temperatura. El valor de c varía menos del 1% entre 0 °C y 100 °C.



Ejemplo 17.6 Comer con resfriado, ayunar con fiebre

Padeciendo un cuadro de gripe, un hombre de 80 kg tuvo una fiebre de 39.0 °C (102.2 °F), en vez de la temperatura normal de 37.0 °C (98.6 °F). Suponiendo que el cuerpo humano es agua en su mayoría, ¿cuánto calor se requirió para elevar su temperatura esa cantidad?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este problema usa la relación entre calor (la incógnita), masa, calor específico y cambio de temperatura.

PLANTEAR: Nos dan los valores de $m = 80$ kg, $c = 4190$ J/kg · K y $\Delta T = 39.0$ °C – 37.0 °C = 2.0 C°. Usaremos la ecuación (17.13) para determinar el calor requerido.

EJECUTAR: Por la ecuación (17.13),

$$Q = mc \Delta T = (80 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(2.0 \text{ K}) = 6.7 \times 10^5 \text{ J}$$

EVALUAR: Esto corresponde a 160 kcal, o 160 calorías de los alimentos. (De hecho, el calor específico del cuerpo humano es de cerca de 3480 J/kg · K, alrededor de 83% del agua. La diferencia se debe a la presencia de proteínas, grasa y minerales, que tienen menor calor específico. Con este valor de c , el calor requerido es $5.6 \times 10^5 \text{ J} = 133$ kcal. Cualquiera de los resultados demuestra que, si no fuera por los sistemas reguladores de la temperatura del cuerpo, ingerir energía en forma de alimentos produciría cambios medibles en la temperatura del cuerpo. (En el caso de una persona con gripe, el aumento en la temperatura es resultado de la actividad extra del cuerpo al combatir la infección.)

Ejemplo 17.7 Circuitos sobrecalentados

Se está diseñando un elemento de circuito electrónico hecho con 23 mg de silicio. La corriente que pasa por él agrega energía a razón de 7.4 mW = 7.4×10^{-3} J/s. Si el diseño no contempla la eliminación de calor del elemento, ¿con qué rapidez aumentará su temperatura? El calor específico del silicio es de 705 J/kg · K.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La energía agregada al elemento del circuito hace que se incremente la temperatura, al igual que si el calor fluyera en el elemento a una tasa de 7.4×10^{-3} J/s. La incógnita es la *tasa* de cambio de la temperatura.

PLANTEAR: Por la ecuación (17.13), el cambio de temperatura ΔT en kelvins es proporcional al calor transferido en joules, así que la tasa de cambio de la temperatura en K/s es proporcional a la tasa de transferencia de calor en J/s.

EJECUTAR: En un segundo, $Q = (7.4 \times 10^{-3} \text{ J/s})(1 \text{ s}) = 7.4 \times 10^{-3} \text{ J}$. Por la ecuación (17.13), $Q = mc \Delta T$, el cambio de temperatura en 1 segundo es

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{7.4 \times 10^{-3} \text{ J}}{(23 \times 10^{-6} \text{ kg})(705 \text{ J/kg} \cdot \text{K})} = 0.46 \text{ K}$$

O bien, podríamos derivar ambos miembros de la ecuación (17.14) con respecto a dt y reacomodar:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} &= \frac{dQ/dt}{mc} \\ &= \frac{7.4 \times 10^{-3} \text{ J/s}}{(23 \times 10^{-6} \text{ kg})(705 \text{ J/kg} \cdot \text{K})} = 0.46 \text{ K/s} \end{aligned}$$

EVALUAR: Con esta rapidez en el aumento de la temperatura (27 K cada minuto) el elemento de circuito pronto se autodestruiría. La transferencia de calor es una consideración importante en el diseño de elementos de circuitos electrónicos.

Capacidad calorífica molar

A veces resulta más útil describir una cantidad de sustancia en términos del número de *moles* n , en vez de la *masa* m del material. Recuerde (de sus clases de química) que un mol de cualquier sustancia pura siempre contiene el mismo número de moléculas. (Veremos esto con mayor detalle en el capítulo 18.) La *masa molar* de cualquier sustancia, denotada con M , es la masa por mol. (A veces se llama a M *peso molecular*, aunque es preferible *masa molar*; la cantidad depende de la masa de una molécula, no de su peso.) Por ejemplo, la masa molar del agua es de 18.0 g/mol = 18.0×10^{-3} kg/mol; un mol de agua tiene una masa de 18.0 g = 0.0180 kg. La masa total m de material es la masa por mol M multiplicada por el número de moles n :

$$m = nM \quad (17.16)$$

Sustituyendo la masa m de la ecuación (17.13) por el producto nM , tenemos

$$Q = nMc \Delta T \quad (17.17)$$

El producto Mc se denomina **capacidad calorífica molar** (o *calor específico molar*) y se denota con C . Con esta notación, reescribimos la ecuación (17.17) de la siguiente manera:

$$Q = nC \Delta T \quad (\text{calor requerido para cambiar la temperatura de } n \text{ moles}) \quad (17.18)$$

Comparando con la ecuación (17.15), podemos expresar la capacidad calorífica molar C (calor por mol por cambio de temperatura) en términos del calor específico c (calor por masa por cambio de temperatura) y la masa molar M (masa por mol):

$$C = \frac{1}{n} \frac{dQ}{dT} = Mc \quad (\text{capacidad calorífica molar}) \quad (17.19)$$

Por ejemplo, la capacidad calorífica molar del agua es

$$C = Mc = (0.0180 \text{ kg/mol})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) = 75.4 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

En la tabla 17.3 se dan valores de calor específico y capacidad calorífica molar para varias sustancias. Note el valor extraordinariamente elevado del calor específico del agua (figura 17.18).

CUIDADO El significado de “capacidad calorífica” Es lamentable que se haya generalizado el uso del término *capacidad calorífica* porque da la impresión errónea de que un cuerpo *contiene* cierta cantidad de calor. Recuerde que el calor es transferencia de energía desde o hacia un cuerpo, no la energía que reside en el cuerpo. ■

La medición precisa de calores específicos y capacidades caloríficas molares requiere gran habilidad experimental. Lo usual es aportar una cantidad medida de energía mediante un alambre calefactor enrollado en una muestra. El cambio de temperatura ΔT se mide con un termómetro de resistencia o termopar incrustado en la muestra. Parece sencillo, pero se requiere gran cuidado para evitar o compensar una transferencia de calor no deseada entre la muestra y su entorno. Las mediciones en sólidos suelen hacerse a presión atmosférica constante; los valores correspondientes se llaman *calor específico* y *capacidad calorífica molar a presión constante*, denotados con c_p y C_p respectivamente. En el caso de un gas, suele ser más fácil mantener la sustancia en un recipiente con *volumen* constante; los valores correspondientes son *calor específico* y *capacidad calorífica molar a volumen constante*, denotados con c_v y C_v , respectivamente. Para una sustancia dada, C_v y C_p son diferentes. Si el sistema puede expandirse al agregar calor, hay un intercambio adicional de energía porque el sistema efectúa *trabajo* sobre su entorno. Si el volumen es constante, el sistema no efectúa trabajo. En los gases, la diferencia entre C_p y C_v es sustancial. Estudiaremos las capacidades caloríficas de los gases a fondo en la sección 19.7.

La última columna de la tabla 17.3 muestra algo interesante. Las capacidades caloríficas molares de la mayoría de los sólidos elementales son casi iguales, alrededor de $25 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$. Esta correlación, llamada *regla de Dulong y Petit* (por sus descubridores), es la base de una idea muy importante. El número de átomos en un mol es el mismo para todas las sustancias elementales. Esto implica que, *por átomo*, se requiere

17.18 El agua tiene un calor específico mucho más alto que el vidrio y los metales que se usan para hacer utensilios de cocina. Esto explica en parte por qué se requieren varios minutos para hervir agua en una estufa, aunque el recipiente alcanza una temperatura alta con gran rapidez.



Tabla 17.3 Valores aproximados del calor específico y capacidad calorífica molar (a presión constante)

Sustancia	Calor específico, (J/kg · K)	Masa molar, (kg/mol)	Capacidad calorífica molar (J/mol · K)
Aluminio	910	0.0270	24.6
Berilio	1970	0.00901	17.7
Cobre	390	0.0635	24.8
Etanol	2428	0.0461	111.9
Etilenglicol	2386	0.0620	148.0
Hielo (cerca de 0 °C)	2100	0.0180	37.8
Hierro	470	0.0559	26.3
Plomo	130	0.207	26.9
Mármol (CaCO ₃)	879	0.100	87.9
Mercurio	138	0.201	27.7
Sal (NaCl)	879	0.0585	51.4
Plata	234	0.108	25.3
Agua (líquida)	4190	0.0180	75.4

más o menos la misma cantidad de calor para elevar la temperatura de cada uno de estos elementos una cantidad dada, aunque las *masas* de los átomos sean muy diferentes. El calor requerido para un aumento de temperatura dado sólo depende de *cuántos* átomos haya en la muestra, no de la masa del átomo individual. Veremos por qué esta regla funciona tan bien cuando estudiemos las bases moleculares de la capacidad calorífica con detalle en el capítulo 18.

Evalúe su comprensión de la sección 17.5 Suponga que quiere elevar la temperatura, de 20 °C a 21 °C, en cada una de las siguientes muestras. Ordénelas de mayor a menor, según la cantidad de calor que se requiere para lograrlo. i) un kilogramo de mercurio; ii) un kilogramo de etanol; iii) un mol de mercurio; iv) un mol de etanol.



17.6 Calorimetría y cambios de fase

Calorimetría significa “medición de calor”. Hemos hablado de la transferencia de energía (calor) durante los cambios de temperatura. El calor también interviene en *los cambios de fase*, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. Una vez que entendamos estas otras relaciones de calor, podremos analizar diversos problemas de cantidad de calor.

Cambios de fase

Usamos el término **fase** para describir un estado específico de la materia, como sólido, líquido o gas. El compuesto H_2O existe en la *fase sólida* como hielo, en la *fase líquida* como agua y en la *fase gaseosa* como vapor de agua. (También llamamos a éstos **estados de la materia**: el estado sólido, el estado líquido y el estado gaseoso.) Una transición de una fase a otra es un **cambio de fase**. Para una presión dada, los cambios de fase se dan a una temperatura definida, generalmente acompañada por absorción o emisión de calor, y un cambio de volumen y densidad.

Un ejemplo conocido de cambio de fase es la fusión del hielo. Si agregamos calor al hielo a 0 °C y a presión atmosférica normal, la temperatura del hielo *no* aumenta. En vez de ello, parte de él se funde para formar agua líquida. Si agregamos calor lentamente, manteniendo el sistema muy cerca del equilibrio térmico, la temperatura seguirá en 0 °C hasta que todo el hielo se haya fundido (figura 17.19). El efecto de agregar calor a este sistema no es elevar su temperatura sino cambiar su *fase* de sólida a líquida.

Para convertir 1 kg de hielo a 0 °C en 1 kg de agua líquida a 0 °C y a presión atmosférica normal, necesitamos 3.34×10^5 J de calor. El calor requerido por unidad de masa se llama **calor de fusión** (o *calor latente de fusión*), denotado con L_f . Para el agua a presión atmosférica normal, el calor de fusión es

$$L_f = 3.34 \times 10^5 \text{ J/kg} = 79.6 \text{ cal/g} = 143 \text{ Btu/lb}$$

En términos más generales, para fundir una masa m de material con calor de fusión L_f se requiere una cantidad de calor Q dada por

$$Q = mL_f$$

Este proceso es *reversible*. Para congelar agua líquida a 0 °C tenemos que *quitar* calor; la magnitud es la misma, pero ahora Q es negativa porque se quita calor en vez de agregarse. Para cubrir ambas posibilidades e incluir otros tipos de cambios de fase, escribimos

$$Q = \pm mL \quad (\text{transferencia de calor en un cambio de fase}) \quad (17.20)$$

Usamos el signo más (entra calor) cuando el material se funde, y el signo menos (sale calor) cuando se congela. El calor de fusión es diferente para diferentes materiales, y también varía un poco con la presión.

17.19 El aire circundante está a temperatura ambiente, pero esta mezcla de hielo y agua se mantiene a 0 °C hasta que todo el hielo se funde y el cambio de fase es total.



Para un material dado, a una presión dada, la temperatura de congelación es la misma que la de fusión. En esta temperatura única, las fases líquida y sólida (agua líquida y hielo, por ejemplo) pueden coexistir en una condición llamada **equilibrio de fases**.

Algo similar sucede con la *ebullición* o *evaporación*, una transición de fase entre líquido y gas. El calor correspondiente (por unidad de masa) se llama **calor de vaporización** L_v . A presión atmosférica normal el calor de vaporización L_v del agua es

$$L_v = 2.256 \times 10^6 \text{ J/kg} = 539 \text{ cal/g} = 970 \text{ Btu/lb}$$

Es decir, necesitamos $2.256 \times 10^6 \text{ J}$ para convertir 1 kg de agua líquida a 100°C en 1 kg de vapor de agua a 100°C . En contraste, para elevar la temperatura de 1 kg de agua de 0°C a 100°C se requieren $Q = mc \Delta T = (1.00 \text{ kg}) (4190 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}) \times (100^\circ\text{C}) = 4.19 \times 10^5 \text{ J}$, menos de la quinta parte del calor necesario para la vaporización a 100°C . Esto concuerda con nuestra experiencia en la cocina: una olla de agua puede alcanzar la temperatura de ebullición en unos minutos, pero tarda mucho más en evaporarse por completo.

Al igual que la fusión, la ebullición es una transición reversible. Si quitamos calor a un gas a la temperatura de ebullición, el gas vuelve a la fase líquida (se *condensa*), cediendo a su entorno la misma cantidad de calor (calor de vaporización) que se necesitó para vaporizarlo. A una presión dada, las temperaturas de ebullición y condensación siempre son la misma; en ella, las fases líquida y gaseosa pueden coexistir en equilibrio de fases.

Tanto L_v como la temperatura de ebullición de un material dependen de la presión. El agua hierve a menor temperatura (cerca de 95°C) en Denver que en Pittsburgh, porque Denver está a mayor altura y la presión atmosférica promedio es menor. El calor de vaporización es un poco más alto a esta presión reducida: aproximadamente $2.27 \times 10^6 \text{ J/kg}$.

La tabla 17.4 presenta calores de fusión y vaporización para varios materiales y sus temperaturas de fusión y ebullición, a presión atmosférica normal. Muy pocos *elementos* tienen temperaturas de fusión cercanas a la temperatura ambiente; uno de ellos es el metal galio (figura 17.20).

17.20 El metal galio, que vemos aquí fundiéndose en la mano de una persona, es uno de los pocos elementos que se funden cerca de la temperatura ambiente. Su temperatura de fusión es de 29.8°C y su calor de fusión es de $8.04 \times 10^4 \text{ J/kg}$.

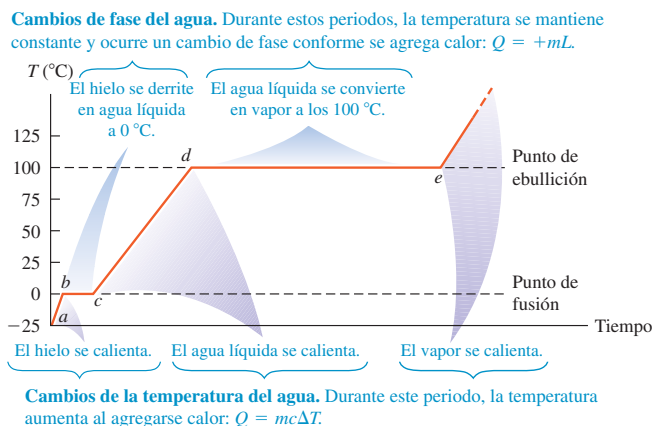


Tabla 17.4 Calores de fusión y de vaporización

Sustancia	Punto de fusión normal		Calor de fusión, L_f (J/kg)	Punto de ebullición normal		Calor de vaporización, L_v (J/kg)
	K	$^\circ\text{C}$		K	$^\circ\text{C}$	
Helio	*	*	*	4.216	-268.93	20.9×10^3
Hidrógeno	13.84	-259.31	58.6×10^3	20.26	-252.89	452×10^3
Nitrógeno	63.18	-209.97	25.5×10^3	77.34	-195.8	201×10^3
Oxígeno	54.36	-218.79	13.8×10^3	90.18	-183.0	213×10^3
Etanol	159	-114	104.2×10^3	351	78	854×10^3
Mercurio	234	-39	11.8×10^3	630	357	272×10^3
Agua	273.15	0.00	334×10^3	373.15	100.00	2256×10^3
Azufre	392	119	38.1×10^3	717.75	444.60	326×10^3
Plomo	600.5	327.3	24.5×10^3	2023	1750	871×10^3
Antimonio	903.65	630.50	165×10^3	1713	1440	561×10^3
Plata	1233.95	960.80	88.3×10^3	2466	2193	2336×10^3
Oro	1336.15	1063.00	64.5×10^3	2933	2660	1578×10^3
Cobre	1356	1083	134×10^3	1460	1187	5069×10^3

*Se requiere una presión mayor que 25 atmósferas para solidificar el helio. A presión de 1 atmósfera, el helio sigue siendo líquido hasta el cero absoluto.

17.21 Gráfica de temperatura contra tiempo para una muestra de agua que inicialmente está en la fase sólida (hielo). Se le agrega calor con tasa constante. La temperatura no cambia durante los cambios de fase, siempre y cuando la presión se mantenga constante.



La figura 17.21 muestra cómo varía la temperatura cuando agregamos calor continuamente a una muestra de hielo con una temperatura inicial menor que 0°C (punto *a*). La temperatura aumenta hasta llegar al punto de fusión (punto *b*). Al agregar más calor, la temperatura se mantiene constante hasta que se derrite todo el hielo (punto *c*). Luego, la temperatura aumenta otra vez hasta llegar al punto de ebullición (punto *d*), donde se mantiene constante otra vez hasta que toda el agua ha pasado a la fase de vapor (punto *e*). Si la tasa de aporte de calor es constante, la pendiente de la línea para la fase sólida (hielo) está más inclinada que para la fase líquida (agua). ¿Sabe por qué? (Véase la tabla 17.3.)

A veces, una sustancia puede cambiar directamente de la fase sólida a la gaseosa. Este proceso se llama *sublimación* y se dice que el sólido se *sublima*. El calor correspondiente es el *calor de sublimación* L_s . El dióxido de carbono líquido no puede existir a una presión menor que $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ (unas 5 atm), y el “hielo seco” (dióxido de carbono sólido) se sublima a presión atmosférica. La sublimación de agua de alimentos congelados causa las “quemaduras de congelador”. El proceso inverso, un cambio de fase de gas a sólido, se presenta cuando se forma escarcha en cuerpos fríos como las espiras de enfriamiento de un refrigerador.

El agua muy pura llega a enfriarse varios grados por debajo del punto de congelación sin congelarse; el estado inestable que resulta se describe como *sobreenfriado*. Si se introduce un cristal de hielo o se agita el agua, se cristalizará en un segundo o menos. El *vapor* de agua sobreenfriado se condensa rápidamente para formar neblina, si se introduce una alteración como partículas de polvo o radiación ionizante. Se usa este principio para “bombardear” las nubes que a menudo contienen vapor sobreenfriado, y causar condensación y lluvia.

A veces es posible *sobrecalentar* un líquido por encima de su temperatura de ebullición normal. Cualquier alteración pequeña, como agitación, causa ebullición local con formación de burbujas.

Los sistemas de calefacción por vapor de agua usan un proceso de ebullición-condensación para transferir calor del horno a los radiadores. Cada kilogramo de agua convertido en vapor en la caldera absorbe más de $2 \times 10^6 \text{ J}$ (el calor de vaporización L_v del agua) de la caldera y lo cede al condensarse en los radiadores. También se usan procesos de ebullición-condensación en los refrigeradores, acondicionadores de aire y bombas de calor. Veremos estos sistemas en el capítulo 20.

Los mecanismos de control de temperatura de muchos animales de sangre caliente aprovechan el calor de vaporización: eliminan calor del cuerpo usándolo para evaporar agua de la lengua (jadeo), o de la piel (sudor). El enfriamiento por evaporación permite al ser humano mantener su temperatura corporal normal en climas desérticos, donde la temperatura del aire puede alcanzar los 55°C (aprox. 130°F). La temperatura de la piel puede ser hasta 30°C menor que la del aire circundante. En estas condiciones, una persona llega a sudar varios litros al día, y debe reponer esta agua. Las “ratas de desierto” experimentadas (como uno de los autores) aseguran que, en el desierto, ¡una cantimplora de menos de un galón es sólo un juguete! El enfriamiento por

evaporación también explica por qué sentimos frío al salir de una alberca (figura 17.22).

También se usa el enfriamiento por evaporación para enfriar edificios en climas calientes y secos, para condensar y recircular vapor de agua “usado” en plantas generadoras nucleares o que queman carbón. Eso es lo que sucede en las grandes torres de enfriamiento hechas de hormigón que vemos en tales plantas.

Las reacciones químicas, como la combustión, son análogas a los cambios de fase en cuanto a que implican cantidades definidas de calor. La combustión total de 1 gramo de gasolina produce unos 46,000 J (casi 11,000 cal), así que el **calor de combustión** L_c de la gasolina es

$$L_c = 46,000 \text{ J/g} = 4.6 \times 10^7 \text{ J/kg}$$

Los valores energéticos de los alimentos se definen de forma similar. Al decir que un gramo de mantequilla de maní “contiene 6 calorías”, queremos decir que se liberan 6 kcal de calor (6000 cal o 25,000 J) cuando los átomos de carbono e hidrógeno de la mantequilla reaccionan con oxígeno (con la ayuda de enzimas) y se convierten por completo en CO_2 y H_2O . No toda esta energía puede convertirse directamente en trabajo mecánico. Estudiaremos la *eficiencia* de la utilización de la energía en el capítulo 20.

Cálculos de calor

Veamos algunos ejemplos de cálculos calorimétricos (cálculos con calor). El principio básico es sencillo: si fluye calor entre dos cuerpos aislados de su entorno, el calor perdido por un cuerpo debe ser igual al ganado por el otro. El calor es transferencia de energía, así que este principio es realmente la conservación de la energía. La calorimetría, que sólo se ocupa de una cantidad conservada, es en varios sentidos ¡la más sencilla de todas las teorías físicas!

17.22 Aunque el agua esté tibia y el día sea caluroso, estas niñas sentirán frío cuando salgan de la alberca. Ello se debe a que, al evaporarse el agua de su piel, extrae de su cuerpo el calor de vaporización que necesita. Para mantenerse calientes, tendrán que secarse de inmediato.



Estrategia para resolver problemas 17.2

Problemas de calorimetría



IDENTIFICAR los conceptos importantes: Cuando fluye calor entre dos cuerpos que están aislados de su entorno, la cantidad de calor perdido por un cuerpo debe ser igual a la ganada por el otro.

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. Identifique los objetos que intercambian calor. Para evitar confusión con los signos algebraicos, tome cada cantidad de calor *agregada* a un cuerpo como *positiva*, y cada cantidad que *sale* de un cuerpo, como *negativa*. Si interactúan dos o más cuerpos, la *suma algebraica* de las cantidades de calor transferidas a todos los cuerpos debe ser cero.
2. Cada objeto sufrirá un cambio de temperatura sin cambio de fase, un cambio de fase a temperatura constante, o ambas cuestiones. Use la ecuación (17.13) para describir los cambios de temperatura y la ecuación (17.20) para describir los cambios de fase.
3. Consulte en la tabla 17.3 valores de calor específico o de capacidad calorífica molar, y en la 17.4, calores de fusión o de vaporización.
4. Asegúrese de identificar las cantidades conocidas y las incógnitas.

EJECUTAR la solución como sigue:

1. Despeje las incógnitas de la ecuación (17.13) o de la (17.20), o de ambas. Muchas veces habrá que calcular una temperatura desconocida. Represéntela con un símbolo algebraico como T . Así, si un cuerpo tiene una temperatura inicial de 20°C y una temperatura final T desconocida, su cambio de temperatura será $\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}} = T - 20^\circ\text{C}$ (no $20^\circ\text{C} - T$).
2. En problemas donde hay cambios de fase, como hielo que se derrite, tal vez no se sepa anticipadamente si *todo* el material cambia de fase o sólo una parte. Siempre puede suponerse una cosa o la otra y, si se obtiene un resultado absurdo (como una temperatura final más alta o más baja que *todas* las temperaturas iniciales), se sabrá que el supuesto inicial era erróneo. ¡Regrese e inténtelo otra vez!

EVALUAR la respuesta: Un error común es utilizar el signo algebraico equivocado para un término en Q o en ΔT . Vuelva a revisar sus cálculos y asegúrese de que los resultados finales sean físicamente lógicos.

Ejemplo 17.8 Cambio de temperatura sin cambio de fase

En el campo una geóloga bebe su café matutino de una taza de aluminio. La taza tiene una masa de 0.120 kg e inicialmente está a 20.0°C cuando se vierte en ella 0.300 kg de café que inicialmente estaba a 70.0°C . ¿A qué temperatura alcanzarán la taza y el café el equilibrio térmico? (Suponga que el calor específico del café es el mismo del agua y que no hay intercambio de calor con el entorno.)

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Los dos objetos que se deben considerar son la taza y el café, en tanto que la incógnita es su temperatura final.

PLANTEAR: No hay cambios de fase en esta situación, así que sólo necesitamos la ecuación (17.13).

continúa

EJECUTAR: Usando la tabla 17.3, el calor (negativo) ganado por el café es

$$\begin{aligned} Q_{\text{café}} &= m_{\text{café}} c_{\text{agua}} \Delta T_{\text{café}} \\ &= (0.300 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(T - 70.0^\circ \text{C}) \end{aligned}$$

El calor (positivo) ganado por la taza de aluminio es

$$\begin{aligned} Q_{\text{aluminio}} &= m_{\text{aluminio}} c_{\text{aluminio}} \Delta T_{\text{aluminio}} \\ &= (0.120 \text{ kg})(910 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(T - 20.0^\circ \text{C}) \end{aligned}$$

Igualemos a cero la suma de estas dos cantidades de calor, obteniendo una ecuación algebraica para T :

$$\begin{aligned} Q_{\text{café}} + Q_{\text{aluminio}} &= 0 \quad \text{o bien,} \\ (0.300 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(T - 70.0^\circ \text{C}) \\ &+ (0.120 \text{ kg})(910 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(T - 20.0^\circ \text{C}) = 0 \end{aligned}$$

La solución de esta ecuación da $T = 66.0^\circ \text{C}$.

EVALUAR: La temperatura final es mucho más cercana a la temperatura inicial del café que a la de la taza; el agua tiene un calor específico mucho mayor que el aluminio, y tenemos más del doble de masa de agua. También podemos calcular las cantidades de calor sustituyendo el valor $T = 66.0^\circ \text{C}$ en las ecuaciones originales. Vemos que $Q_{\text{café}} = -5.0 \times 10^3 \text{ J}$ y $Q_{\text{aluminio}} = +5.0 \times 10^3 \text{ J}$; $Q_{\text{café}}$ es negativo, lo que implica que el café pierde calor.

Ejemplo 17.9 Cambios tanto de temperatura como de fase

Una estudiante de física desea enfriar 0.25 kg de Diet Omni-Cola (casi pura agua), que está a 25°C , agregándole hielo que está a -20°C . ¿Cuánto hielo debería ella agregar para que la temperatura final sea 0°C con todo el hielo derretido, si puede despreciarse la capacidad calorífica del recipiente?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El hielo y la Omni-Cola son los objetos que intercambian calor. La Omni-Cola sufre sólo un cambio de temperatura; en tanto que el hielo sufre tanto un cambio de temperatura como un cambio de fase, de sólido a líquido. La incógnita es la masa de hielo, m_{hielo} .

PLANTEAR: Utilizamos la ecuación (17.13) para calcular la cantidad de calor necesaria para calentar el hielo a 0°C y enfriar la Omni-Cola a 0°C . Además, necesitaremos la ecuación (17.20) para calcular el calor requerido para fundir el hielo a 0°C .

EJECUTAR: La Omni-Cola pierde calor, así que el calor que se le agrega es negativo:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Omni}} &= m_{\text{Omni}} c_{\text{agua}} \Delta T_{\text{Omni}} \\ &= (0.25 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(0^\circ \text{C} - 25^\circ \text{C}) \\ &= -26,000 \text{ J} \end{aligned}$$

De la tabla 17.3, el calor específico del hielo (distinto al del agua líquida) es $2.1 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Sea la masa de hielo m_{hielo} ; el calor Q_1 necesario para calentarlo de -20°C a 0°C es

$$\begin{aligned} Q_1 &= m_{\text{hielo}} c_{\text{hielo}} \Delta T_{\text{hielo}} \\ &= m_{\text{hielo}} (2.1 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) [0^\circ \text{C} - (-20^\circ \text{C})] \\ &= m_{\text{hielo}} (4.2 \times 10^4 \text{ J/kg}) \end{aligned}$$

Por la ecuación (17.20), el calor adicional Q_2 necesario para fundir esta masa de hielo es la masa multiplicada por el calor de fusión. Usando la tabla 17.4, obtenemos

$$\begin{aligned} Q_2 &= m_{\text{hielo}} L_f \\ &= m_{\text{hielo}} (3.34 \times 10^5 \text{ J/kg}) \end{aligned}$$

La suma de estas tres cantidades debe ser cero:

$$\begin{aligned} Q_{\text{Omni}} + Q_1 + Q_2 &= -26,000 \text{ J} + m_{\text{hielo}} (42,000 \text{ J/kg}) \\ &+ m_{\text{hielo}} (334,000 \text{ J/kg}) = 0 \end{aligned}$$

Despejando m_{hielo} , obtenemos $m_{\text{hielo}} = 0.069 \text{ kg} = 69 \text{ g}$.

EVALUAR: Esta masa de hielo corresponde a tres o cuatro cubitos de hielo de tamaño mediano, lo cual parece razonable para la cantidad de Omni-Cola del problema.

Ejemplo 17.10 ¿Qué cocina?

Una olla gruesa de cobre con masa de 2.0 kg (incluida su tapa) está a una temperatura de 150°C . Usted vierte en ella 0.10 kg de agua a 25°C y rápidamente tapa la olla para que no se escape el vapor. Calcule la temperatura final de la olla y de su contenido, y determine la fase (líquido o gas) del agua. Suponga que no se pierde calor al entorno.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Los dos objetos que intercambian calor son el agua y la olla. En esta situación hay tres posibles situaciones finales: 1. nada del agua hierve y la temperatura final es menor que 100°C ; 2. parte del agua hierve, y se produce una mezcla de agua y vapor a 100°C ; 3. toda el agua hierve, y se producen 0.10 kg de vapor a una temperatura de 100°C o más.

PLANTEAR: De nuevo utilizamos la ecuación (17.13) para el calor transferido en un cambio de temperatura y la ecuación (17.20) para el calor transferido en un cambio de fase.

EJECUTAR: El caso más sencillo de calcular es el 1.; entonces, sea la temperatura final común del agua líquida y la olla de cobre T . Puesto que suponemos que no hay cambios de fase, la suma de las cantidades de calor agregadas a los dos materiales es

$$\begin{aligned} Q_{\text{agua}} + Q_{\text{cobre}} &= m_{\text{agua}} c_{\text{agua}} (T - 25^\circ \text{C}) \\ &+ m_{\text{cobre}} c_{\text{cobre}} (T - 150^\circ \text{C}) \\ &= (0.10 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(T - 25^\circ \text{C}) \\ &+ (2.0 \text{ kg})(390 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(T - 150^\circ \text{C}) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Despejando T obtenemos $T = 106^\circ\text{C}$. Sin embargo, esto rebasa el punto de ebullición del agua, ¡lo que contradice nuestro supuesto de que nada de agua hierva! Por lo tanto, el supuesto no puede ser correcto; al menos un poco de agua cambia de fase.

Si intentamos la segunda posibilidad, de que la temperatura final sea 100°C , tendremos que calcular la fracción de agua que se evapora. Sea x dicha fracción. La cantidad de calor (positiva) necesaria para vaporizar esta agua es $(xm_{\text{agua}})L_v$. Si hacemos a la temperatura final $T = 100^\circ\text{C}$, tenemos

$$\begin{aligned} Q_{\text{agua}} &= m_{\text{agua}}c_{\text{agua}}(100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) + xm_{\text{agua}}L_v \\ &= (0.10\text{ kg})(4190\text{ J/kg}\cdot\text{K})(75\text{ K}) \\ &\quad + x(0.10\text{ kg})(2.256 \times 10^6\text{ J/kg}) \\ &= 3.14 \times 10^4\text{ J} + x(2.256 \times 10^5\text{ J}) \\ Q_{\text{cobre}} &= m_{\text{cobre}}c_{\text{cobre}}(100^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}) \\ &= (2.0\text{ kg})(390\text{ J/kg}\cdot\text{K})(-50\text{ K}) = -3.90 \times 10^4\text{ J} \end{aligned}$$

El requisito de que la suma de todas las cantidades de calor sea cero da, entonces,

$$\begin{aligned} Q_{\text{agua}} + Q_{\text{cobre}} &= 3.14 \times 10^4\text{ J} + x(2.256 \times 10^5\text{ J}) \\ &\quad - 3.90 \times 10^4\text{ J} = 0 \\ x &= \frac{3.90 \times 10^4\text{ J} - 3.14 \times 10^4\text{ J}}{2.256 \times 10^5\text{ J}} = 0.034 \end{aligned}$$

Esto es razonable, y concluimos que la temperatura final del agua y el cobre es 100°C . De los 0.10 kg de agua original, $0.034(0.10\text{ kg}) = 0.0034\text{ kg} = 3.4\text{ g}$ se convirtió en vapor a 100°C .

EVALUAR: Si x hubiera resultado mayor que 1, habríamos tenido otra contradicción (la fracción de agua que se evaporó no puede ser mayor que 1). En este caso, la descripción correcta habría sido la tercera posibilidad: toda el agua se habría evaporado y la temperatura final sería mayor que 100°C . ¿Puede demostrar que esto es lo que habría sucedido si originalmente hubiéramos vertido menos de 15 g de agua a 25°C en la olla?

Ejemplo 17.11 Combustión, cambio de temperatura y cambio de fase

En cierta estufa de gasolina portátil, 30% de la energía liberada al quemar el combustible calienta el agua de la olla en la estufa. Si calentamos 1.00 L (1.00 kg) de agua, de 20°C a 100°C , y evaporamos 0.25 kg de ella, ¿cuánta gasolina habremos quemado en el proceso?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este problema, toda el agua sufre un cambio de temperatura y una parte de ella también sufre un cambio de fase de líquido a gas. Esto requiere cierta cantidad de calor, que usaremos para determinar la cantidad de gasolina que es preciso quemar (la incógnita).

PLANTEAR: Aplicamos las ecuaciones (17.13) y (17.20), así como la idea del calor de combustión.

EJECUTAR: El calor requerido para elevar la temperatura del agua de 20°C a 100°C es

$$\begin{aligned} Q_1 &= mc\Delta T = (1.00\text{ kg})(4190\text{ J/kg}\cdot\text{K})(80\text{ K}) \\ &= 3.35 \times 10^5\text{ J} \end{aligned}$$

Para hervir 0.25 kg de agua a 100°C necesitamos

$$Q_2 = mL_v = (0.25\text{ kg})(2.256 \times 10^6\text{ J/kg}) = 5.64 \times 10^5\text{ J}$$

La energía total requerida es la suma $8.99 \times 10^5\text{ J}$. Esto es sólo 0.30 del calor total de combustión, así que la energía es $(8.99 \times 10^5\text{ J})/0.30 = 3.00 \times 10^6\text{ J}$. Como dijimos antes, 1 gramo de gasolina libera 46,000 J, así que la masa de gasolina requerida es

$$\frac{3.00 \times 10^6\text{ J}}{46,000\text{ J/g}} = 65\text{ g}$$

Es decir, un volumen de cerca de 0.09 L de gasolina.

EVALUAR: Este resultado da muestra de la increíble cantidad de energía que puede liberarse quemando incluso una cantidad pequeña de gasolina. Observe que la mayoría del calor suministrado se usó para evaporar 0.25 L de agua. ¿Puede demostrar que se necesitarían otros 123 g de gasolina para evaporar el resto del agua?

Evalúe su comprensión de la sección 17.6 Si tomamos un bloque de hielo a 0°C y le añadimos calor a ritmo constante, después de un tiempo t todo el hielo se habrá convertido en vapor de agua a 100°C . ¿Qué tendrá al tiempo $t/2$? i) sólo hielo a 0°C ; ii) una mezcla de hielo y agua a 0°C ; iii) agua a una temperatura entre 0°C y 100°C ; iv) una mezcla de agua y vapor a 100°C .

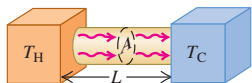


17.7 Mecanismos de transferencia de calor

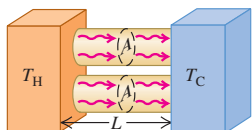
Hemos hablado de: *conductores* y *aislantes* que son, respectivamente, los materiales que permiten o impiden la transferencia de calor entre cuerpos. Veamos ahora más a fondo las *tasas* de transferencia de energía. En la cocina, usamos una olla de metal o vidrio para tener buena transferencia de calor de la estufa a lo que cocinamos, pero el refrigerador está aislado con un material que *evita* que fluya calor hacia la comida que está en el interior. ¿Cómo describimos la diferencia entre estos dos materiales?

17.23 Flujo de calor en estado estable debido a conducción en una varilla uniforme.

a) Corriente de calor H .



b) Al duplicar el área transversal del conductor, se duplica la corriente de calor (H es proporcional a A).



c) Al duplicar la longitud del conductor, se reduce a la mitad la corriente de calor (H es inversamente proporcional a L).

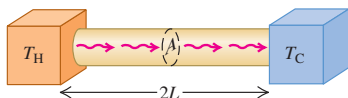


Tabla 17.5 Conductividades térmicas

Sustancia	k (W/m · K)
Metales	
Aluminio	205.0
Latón	109.0
Cobre	385.0
Plomo	34.7
Mercurio	8.3
Plata	406.0
Acero	50.2
Sólidos (valores representativos)	
Ladrillo, aislante	0.15
Tabique (ladrillo rojo)	0.6
Concreto (hormigón)	0.8
Corcho	0.04
Fieltro	0.04
Fibra de vidrio	0.04
Vidrio	0.8
Hielo	1.6
Lana mineral	0.04
Espuma de poliestireno	0.01
Madera	0.12–0.04
Gases	
Aire	0.024
Argón	0.016
Helio	0.14
Hidrógeno	0.14
Oxígeno	0.023

Los tres mecanismos de transferencia de calor son conducción, convección y radiación. Hay *conducción* dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos que están en contacto. La *convección* depende del movimiento de una masa de una región del espacio a otra. La *radiación* es transferencia de calor por radiación electromagnética, como la luz del Sol, sin que tenga que haber materia en el espacio entre los cuerpos.

Conducción

Si sujetamos el extremo de una varilla de cobre y colocamos el otro en una flama, el extremo que sostenemos se calienta cada vez más, aunque no esté en contacto directo con la flama. El calor llega al extremo más frío por **conducción** a través del material. En el nivel atómico, los átomos de las regiones más calientes tienen más energía cinética, en promedio, que sus vecinos más fríos, así que empujan a sus vecinos, transfiriéndoles algo de su energía. Los vecinos empujan a otros vecinos, continuando así a través del material. Los átomos en sí no se mueven de una región del material a otra, pero su energía sí.

La mayoría de los metales usa otro mecanismo más eficaz para conducir calor. Dentro del metal, algunos electrones pueden abandonar sus átomos originales y vagar por la red cristalina. Estos electrones “libres” pueden llevar energía rápidamente de las regiones más calientes del metal a las más frías; por ello, los metales generalmente son buenos conductores del calor. Una varilla metálica a 20 °C se siente más fría que un trozo de madera a 20 °C porque el calor puede fluir más fácilmente de la mano al metal. La presencia de electrones “libres” también hace que, en general, los metales sean buenos conductores eléctricos.

Sólo hay transferencia de calor entre regiones que están a diferente temperatura, y la dirección de flujo siempre es de la temperatura más alta a la más baja. La figura 17.23a muestra una varilla de material conductor con área transversal A y longitud L . El extremo izquierdo de la varilla se mantiene a una temperatura T_H , y el derecho, a una temperatura menor T_C , así que fluye calor de izquierda a derecha. Los costados de la varilla están cubiertos con un aislante ideal, así que no hay transferencia de calor por los lados.

Si se transfiere una cantidad de calor dQ por la varilla en un tiempo dt , la tasa de flujo de calor es dQ/dt . Llamamos a ésta la **corriente de calor**, denotada por H . Es decir, $H = dQ/dt$. Se observa experimentalmente que la corriente de calor es proporcional al área transversal A de la varilla (figura 17.23b) y a la diferencia de temperatura ($T_H - T_C$), e inversamente proporcional a la longitud de la varilla L (figura 17.23c). Introduciendo una constante de proporcionalidad k llamada **conductividad térmica** del material, tenemos

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L} \quad (\text{corriente de calor en conducción}) \quad (17.21)$$

La cantidad $(T_H - T_C)/L$ es la diferencia de temperatura *por unidad de longitud*, llamada **gradiente de temperatura**. El valor numérico de k depende del material de la varilla. Los materiales con k grande son buenos conductores del calor; aquellos con k pequeña son conductores o aislantes deficientes. La ecuación (17.21) también da la corriente de calor que pasa a través de una plancha, o por *cualquier* cuerpo homogéneo con área transversal A uniforme y perpendicular a la dirección de flujo; L es la longitud de la trayectoria de flujo del calor.

Las unidades de corriente de calor H son unidades de energía por tiempo, es decir, potencia; la unidad SI de corriente de calor es el watt (1 W = 1 J/s). Podemos determinar las unidades de k despejándola de la ecuación (17.21). Verifique que las unidades sean W/m · K. En la tabla 17.5 se dan algunos valores de k .

La conductividad térmica del aire “muerto” (inmóvil) es muy baja. Un suéter de lana nos mantiene calientes porque atrapa aire entre las fibras. En realidad, muchos

materiales aislantes como la espuma de poliestireno y la fibra de vidrio son en su mayoría aire muerto. La figura 17.24 muestra un material cerámico con propiedades térmicas muy poco comunes, entre ellas una conductividad muy baja.

Si la temperatura varía de manera no uniforme a lo largo de la varilla conductora, introducimos una coordenada x a lo largo y generalizamos el gradiente de temperatura como dT/dx . La generalización correspondiente de la ecuación (17.21) es

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (17.22)$$

El signo negativo indica que el calor siempre fluye en la dirección de temperatura *decreciente*.

En el campo del aislamiento térmico de edificios, los ingenieros usan el concepto de **resistencia térmica**, denotada con R . La resistencia térmica R de una placa de material con área A se define de modo que la corriente de calor H que atraviesa la placa es

$$H = \frac{A(T_H - T_C)}{R} \quad (17.23)$$

donde T_H y T_C son las temperaturas a los dos lados de la placa. Comparando esto con la ecuación (17.21), vemos que R está dada por

$$R = \frac{L}{k} \quad (17.24)$$

donde L es el espesor de la placa. La unidad SI para R es $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. En las unidades empleadas para materiales aislantes comerciales en Estados Unidos, H se da en Btu/h, A en ft^2 y $T_H - T_C$ en $^\circ\text{F}$. (1 Btu/h = 0.293 W.) Las unidades de R son entonces $\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}/\text{Btu}$, aunque los valores de R suelen citarse sin unidades; una capa de 6 in de espesor de fibra de vidrio tiene un valor R de 19 (es decir, $R = 19 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}/\text{Btu}$), una placa de 2 in de espuma de poliestireno tiene un valor de 12, y así sucesivamente. Al duplicarse el espesor, también se duplica el valor R . En climas nórdicos severos, es práctica común para construcciones nuevas especificar valores R de cerca de 30 para paredes y techos exteriores. Si el material aislante está en capas, como en una pared enyesada con aislante de fibra de vidrio y vista exterior de madera, los valores R son aditivos. ¿Sabe por qué? (Véase el problema 17.110.)

17.24 Ésta placa protectora, diseñada para usarse en el transbordador espacial, tiene propiedades térmicas extraordinarias. La conductividad térmica extremadamente baja y la capacidad calorífica tan pequeña del material permiten sostener la placa por sus bordes, aunque su temperatura sea tan alta que emite la luz que se observa en esta fotografía.



Estrategia para resolver problemas 17.3

Conducción de calor



IDENTIFICAR los conceptos importantes: El concepto de conducción de calor entra en juego siempre que dos objetos a diferente temperatura están en contacto.

PLANTEAR el problema siguiendo estos pasos:

1. Identifique la dirección de flujo de calor en el problema (de caliente a frío). En la ecuación (17.21), L siempre se mide en esta dirección, y A siempre es un área perpendicular a ella. En muchos casos, una caja u otro recipiente con forma irregular pero espesor de paredes uniforme, puede aproximarse como una plancha plana con el mismo espesor y el área total de las paredes.
2. Identifique la incógnita.

EJECUTAR la solución como sigue:

1. Si fluye calor a través de un solo objeto, despeje la incógnita de la ecuación (17.21).
2. En algunos problemas, el calor fluye por dos materiales distintos en sucesión. En tal caso, la temperatura en la interfaz de los mate-

riales es intermedia entre T_H y T_C ; represéntela con un símbolo como T . Las diferencias de temperatura para los dos materiales son, entonces: $(T_H - T)$ y $(T - T_C)$. En estado estacionario el flujo de calor debe ser el mismo que pasa por ambos materiales en sucesión, así que la corriente de calor H debe ser la misma en ambos materiales.

3. Si hay dos trayectorias para el flujo de calor *paralelas*, y fluye calor por ambas, la H total es la suma de las cantidades H_1 y H_2 para las trayectorias individuales. Un ejemplo es el flujo de calor que sale de una casa, tanto por el cristal de una ventana como por su marco. En este caso, la diferencia de temperatura es la misma para ambas trayectorias, pero L , A y k podrían ser diferentes.
4. Como siempre, es vital usar unidades consistentes. Si k está expresado en $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$, ¿no use distancias en centímetros, calor en calorías ni T en grados Fahrenheit!

EVALUAR la respuesta: Como siempre, pregúntese si los resultados son físicamente lógicos.

Ejemplo 17.12 Conducción a través de una hielera portátil

Una caja de espuma de poliestireno para mantener frías las bebidas en un día de campo (figura 17.25a) tiene un área de pared total (incluida la tapa) de 0.80 m^2 y un espesor de pared de 2.0 cm , y está llena con hielo, agua y latas de Omni-Cola a 0°C . Calcule la tasa de flujo de calor hacia el interior de la caja, si la temperatura exterior es de 30°C . ¿Cuánto hielo se derrite en un día?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La primera incógnita es la corriente de calor H . La segunda es la cantidad de hielo que se derrite, que depende de la corriente de calor (calor por unidad de tiempo), el tiempo transcurrido y el calor de fusión.

PLANTEAR: Usamos la ecuación (17.21) para describir la corriente de calor y la ecuación (17.20), $Q = mL_f$, para determinar la masa m del hielo que se derrite debido al flujo de calor.

EJECUTAR: Suponemos que el flujo total de calor es aproximadamente el que habría a través de una plancha plana de 0.80 m^2 de área y $2.0 \text{ cm} = 0.020 \text{ m}$ de espesor (figura 17.25a). Obtenemos k de la tabla 17.5. Por la ecuación (17.21) la corriente de calor (tasa de flujo de calor) es

$$H = kA \frac{T_H - T_C}{L} = (0.010 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.80 \text{ m}^2) \frac{30^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}}{0.020 \text{ m}} \\ = 12 \text{ W} = 12 \text{ J/s}$$

El flujo total de calor Q en un día ($86,400 \text{ s}$) es

$$Q = Ht = (12 \text{ J/s})(86,400 \text{ s}) = 1.04 \times 10^6 \text{ J}$$

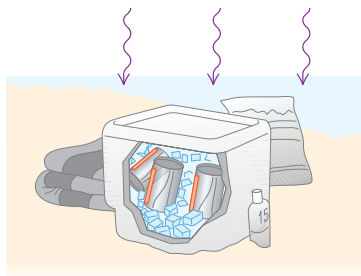
El calor de fusión del hielo es de $3.34 \times 10^5 \text{ J/kg}$, así que la cantidad de hielo fundida por ese calor es

$$m = \frac{Q}{L_f} \\ = \frac{1.04 \times 10^6 \text{ J}}{3.34 \times 10^5 \text{ J/kg}} = 3.1 \text{ kg}$$

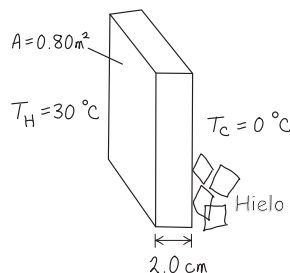
EVALUAR: La baja corriente de calor es resultado de la baja conductividad térmica de la espuma de poliestireno. En 24 horas, fluye una cantidad considerable de calor, aunque la cantidad de hielo que se derrite es relativamente pequeña, ya que el calor de fusión es elevado.

17.25 Conducción de calor por las paredes de una hielera de espuma de poliestireno.

a) Una hielera en la playa



b) Nuestro esquema para este problema

**Ejemplo 17.13 Conducción a través de dos barras I**

Una barra de acero de 10.0 cm de longitud se suelda extremo con extremo a una barra de cobre de 20.0 cm de longitud. Ambas están perfectamente aisladas por sus costados. Las barras tienen la misma sección transversal cuadrada de 2.00 cm por lado. El extremo libre de la barra de acero se mantiene a 100°C poniéndolo en contacto con vapor de agua, y el de la barra de cobre se mantiene a 0°C poniéndolo en contacto con hielo. Calcule la temperatura en la unión de las dos barras y la tasa de flujo de calor total.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este problema hay flujo de calor a través de dos barras de composiciones diferentes. Como señalamos en la Estrategia para resolver problemas 17.3, las corrientes de calor entre las dos barras deben ser iguales.

PLANTEAR: La figura 17.26 muestra la situación. Escribiremos la ecuación (17.21) dos veces, una para cada barra, e igualaremos las corrientes de calor H_{acero} y H_{cobre} . En ambas expresiones para la corriente de calor interviene la temperatura T en la unión, que es una de las incógnitas.

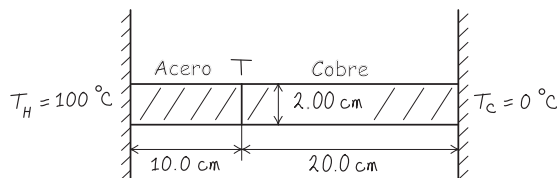
EJECUTAR: Igualando las dos corrientes de calor,

$$H_{\text{acero}} = \frac{k_{\text{acero}} A (100^\circ\text{C} - T)}{L_{\text{acero}}} = H_{\text{cobre}} = \frac{k_{\text{cobre}} A (T - 0^\circ\text{C})}{L_{\text{cobre}}}$$

Las áreas A son iguales y pueden eliminarse por división. Sustituyendo $L_{\text{acero}} = 0.100 \text{ m}$, $L_{\text{cobre}} = 0.200 \text{ m}$ y los valores numéricos de k de la tabla 17.5, obtenemos

$$\frac{(50.2 \text{ W/m} \cdot \text{K})(100^\circ\text{C} - T)}{0.100 \text{ m}} = \frac{(385 \text{ W/m} \cdot \text{K})(T - 0^\circ\text{C})}{0.200 \text{ m}}$$

17.26 Nuestro esquema para este problema.



Reacomodando y despejando T , obtenemos

$$T = 20.7^\circ\text{C}$$

Podemos calcular la corriente de calor total sustituyendo este valor de T en cualquiera de las expresiones anteriores:

$$\begin{aligned} H_{\text{acero}} &= \frac{(50.2 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.0200 \text{ m})^2(100^\circ\text{C} - 20.7^\circ\text{C})}{0.100 \text{ m}} \\ &= 15.9 \text{ W} \end{aligned}$$

o

$$H_{\text{cobre}} = \frac{(385 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.0200 \text{ m})^2(20.7^\circ\text{C})}{0.200 \text{ m}} = 15.9 \text{ W}$$

EVALUAR: Aunque la barra de acero es más corta, su caída de temperatura es mucho mayor que en la barra de cobre (de 100°C a 20.7°C en el acero contra de 20.7°C a 0°C en el cobre). La diferencia aumenta porque el acero es mal conductor en comparación con el cobre.

Ejemplo 17.14 Conducción a través de dos barras II

En el ejemplo 17.13, suponga que las dos barras se separan. Un extremo de cada una se mantiene a 100°C , y el otro, a 0°C . Determine la tasa *total* de flujo de calor en las dos barras.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este caso, las barras están en paralelo, no en serie. La corriente de calor total ahora es la *suma* de las corrientes en las dos barras.

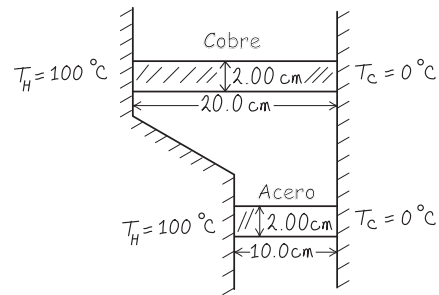
PLANTEAR: La figura 17.27 muestra la situación. Para cada barra, $T_H - T_C = 100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 100 \text{ K}$.

EXECUTAR: Escribimos individualmente las corrientes de calor para cada barra y después las sumamos para obtener la corriente de calor total:

$$\begin{aligned} H &= H_{\text{acero}} + H_{\text{cobre}} = \frac{k_{\text{acero}}A(T_H - T_C)}{L_{\text{acero}}} + \frac{k_{\text{cobre}}A(T_H - T_C)}{L_{\text{cobre}}} \\ &= \frac{(50.2 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.0200 \text{ m})^2(100 \text{ K})}{0.100 \text{ m}} \\ &\quad + \frac{(385 \text{ W/m} \cdot \text{K})(0.0200 \text{ m})^2(100 \text{ K})}{0.200 \text{ m}} \\ &= 20.1 \text{ W} + 77.0 \text{ W} = 97.1 \text{ W} \end{aligned}$$

EVALUAR: El flujo de calor en la barra de cobre es mucho mayor que en la de acero, a pesar de ser más larga, porque la conductividad térmica del cobre es mucho mayor. El flujo total de calor es mucho mayor que en el ejemplo 17.13, en parte porque la sección transversal total para el flujo es mayor y, además, porque hay un gradiente completo de 100 K en cada barra.

17.27 Nuestro esquema de este problema.



Convección

La **convección** es transferencia de calor por movimiento de una masa de fluido de una región del espacio a otra. Como ejemplos conocidos tenemos los sistemas de calefacción domésticos de aire caliente y de agua caliente, el sistema de enfriamiento de un motor de combustión y el flujo de sangre en el cuerpo. Si el fluido circula impulsado por un ventilador o bomba, el proceso se llama *convección forzada*; si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por expansión térmica, como el ascenso de aire caliente, el proceso se llama *convección natural* o *convección libre* (figura 17.28).

La convección libre en la atmósfera desempeña un papel dominante en la determinación del estado del tiempo, y la convección en los océanos es un mecanismo importante de transferencia global de calor. En una escala menor, los halcones que planean y los pilotos de planeadores, aprovechan las corrientes térmicas que suben del suelo caliente. El mecanismo de transferencia de calor más importante dentro del cuerpo humano (necesario para mantener una temperatura casi constante en diversos entornos) es la convección *forzada* de sangre, bombeada por el corazón.

La transferencia de calor convectiva es un proceso muy complejo, y no puede describirse con una ecuación simple. Veamos algunos hechos experimentales:

1. La corriente de calor causada por convección es directamente proporcional al área superficial. Esto explica las áreas superficiales grandes de los radiadores y las aletas de enfriamiento.
2. La viscosidad de los fluidos frena la convección natural cerca de una superficie estacionaria, formando una película superficial que, en una superficie vertical, suele tener el mismo valor aislante que tiene 1.3 cm de madera terciada (valor $R = 0.7$). La convección forzada reduce el espesor de esta película, aumentando

17.28 Un elemento de calefacción en la punta de este tubo sumergido calienta el agua circundante, produciendo un patrón complejo de convección libre.



la tasa de transferencia de calor. Esto explica el “factor de congelación”: nos enfriamos más rápidamente en un viento frío que en aire tranquilo a la misma temperatura.

- La corriente de calor causada por convección es aproximadamente proporcional a la potencia $\frac{5}{4}$ de la diferencia de temperatura entre la superficie y el cuerpo principal del fluido.

Radiación

La **radiación** es la transferencia de calor por ondas electromagnéticas como la luz visible, el infrarrojo y la radiación ultravioleta. Todos hemos sentido el calor de la radiación solar y el intenso calor de un asador de carbón, o las brasas de una chimenea. Casi todo el calor de estos cuerpos tan calientes no nos llega por conducción ni por convección en el aire intermedio, sino por *radiación*. Habría esta transferencia de calor aunque sólo hubiera vacío entre nosotros y la fuente de calor.

Todo cuerpo, aun a temperaturas ordinarias, emite energía en forma de radiación electromagnética. A temperaturas ordinarias, digamos 20 °C, casi toda la energía se transporta en ondas de infrarrojo con longitudes de onda mucho mayores que las de la luz visible (véanse las figuras 17.4 y 17.29). Al aumentar la temperatura, las longitudes de onda se desplazan hacia valores mucho menores. A 800 °C, un cuerpo emite suficiente radiación visible para convertirse en objeto luminoso “al rojo vivo”, aunque aun a esta temperatura la mayoría de la energía se transporta en ondas de infrarrojo. A 3000 °C, la temperatura de un filamento de bombilla incandescente, la radiación contiene suficiente luz visible para que el cuerpo se vea “al rojo blanco”.

La tasa de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área superficial A , y aumenta rápidamente con la temperatura, según la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin). La tasa también depende de la naturaleza de la superficie; esta dependencia se describe con una cantidad e llamada **emisividad**: un número adimensional entre 0 y 1 que representa la relación entre la tasa de radiación de una superficie dada y la de un área igual de una superficie radiante ideal a la misma temperatura. La emisividad también depende un poco de la temperatura. Así, la corriente de calor $H = dQ/dt$ debida a radiación de un área superficial A con emisividad e a la temperatura absoluta T se puede expresar como

$$H = Ae\sigma T^4 \quad (\text{corriente de calor por radiación}) \quad (17.25)$$

donde σ es la constante física fundamental llamada **constante de Stefan-Boltzmann**. Esta relación se llama **ley de Stefan-Boltzmann** en honor de sus descubridores de finales del siglo XIX. El mejor valor numérico actual de σ es

$$\sigma = 5.670400(40) \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Verifique la consistencia de unidades de la ecuación (17.25). La emisividad e suele ser mayor para superficies oscuras que claras. La emisividad de una superficie de cobre lisa es del orden de 0.3, pero e para una superficie negra opaca puede ser cercana a la unidad.



17.29 Esta fotografía infrarroja de colores falsos revela la radiación emitida por diversas partes del cuerpo de este hombre. La emisión más intensa (color rojo) proviene de las áreas más calientes, mientras que la bebida fría casi no produce emisión.

Ejemplo 17.15 Transferencia de calor por radiación

Una placa de acero delgada cuadrada, de 10 cm por lado, se calienta en una forja de herrero a una temperatura de 800 °C. Si su emisividad es de 0.60, calcule la tasa total de emisión de energía por radiación.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La incógnita es H , la tasa de emisión de energía.

PLANTEAR: Usaremos la ecuación (17.5) para calcular H a partir de los valores proporcionados.

EJECUTAR: El área superficial total, incluidos ambos lados, es de $2(0.10 \text{ m})^2 = 0.020 \text{ m}^2$. Debemos convertir la temperatura a la escala Kelvin; $800 \text{ °C} = 1073 \text{ K}$. La ecuación (17.25) da, entonces,

$$\begin{aligned} H &= Ae\sigma T^4 \\ &= (0.020 \text{ m}^2)(0.60)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1073 \text{ K})^4 \\ &= 900 \text{ W} \end{aligned}$$

EVALUAR: Un herrero parado cerca de la placa fácilmente sentirá el calor que ésta radia.

Radiación y absorción

Si bien un cuerpo a temperatura T está radiando, su entorno a temperatura T_s también lo hace, y el cuerpo *absorbe* parte de esta radiación. Si el cuerpo está en equilibrio térmico con su entorno, $T = T_s$ y las tasas de radiación y absorción deben ser iguales. Para ello, la tasa de absorción debe estar dada en general por $H = Ae\sigma T_s^4$. La tasa *neta* de radiación de un cuerpo a temperatura T con un entorno a temperatura T_s es entonces

$$H_{\text{net}} = Ae\sigma T^4 - Ae\sigma T_s^4 = Ae\sigma(T^4 - T_s^4) \quad (17.26)$$

En esta ecuación, un valor positivo de H implica *salida* neta de calor del cuerpo. La ecuación (17.26) indica que, para la radiación, igual que para la conducción y la convección, la corriente de calor depende de la *diferencia* de temperatura entre dos cuerpos.

Ejemplo 17.16 Radiación del cuerpo humano

Si el área superficial total del cuerpo humano es de 1.20 m^2 y la temperatura superficial es de $30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$, calcule la tasa total de radiación de energía del cuerpo. Si el entorno está a una temperatura de 20°C , calcule la tasa *neta* de pérdida de calor del cuerpo por radiación. La emisividad del cuerpo es muy cercana a la unidad, sea cual fuere la pigmentación de la piel.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Debemos tomar en cuenta tanto la radiación que emite el cuerpo, como la radiación que éste absorbe de su ambiente.

PLANTEAR: La tasa de radiación de energía proveniente del cuerpo está dada por la ecuación (17.25); la tasa neta de pérdida de calor está dada por la ecuación (17.26).

EJECUTAR: Con $e = 1$ en la ecuación (17.25), tenemos que el cuerpo radia a razón de

$$\begin{aligned} H &= Ae\sigma T^4 \\ &= (1.20 \text{ m}^2)(1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(303 \text{ K})^4 \\ &= 574 \text{ W} \end{aligned}$$

Esta pérdida se compensa en parte por absorción de radiación, que depende de la temperatura del entorno. La tasa *neta* de transferencia de energía por radiación está dada por la ecuación (17.26):

$$\begin{aligned} H_{\text{net}} &= Ae\sigma(T^4 - T_s^4) \\ &= (1.20 \text{ m}^2)(1)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4) \\ &\quad \times [(303 \text{ K})^4 - (293 \text{ K})^4] = 72 \text{ W} \end{aligned}$$

EVALUAR: El valor de H_{net} es positivo ya que el cuerpo pierde calor hacia un entorno más frío.

Aplicaciones de la radiación

La transferencia de calor por radiación es importante en algunos lugares sorprendentes. Un bebé prematuro en una incubadora se puede enfriar peligrosamente por radiación, cuando las paredes de la incubadora están frías, aunque el *aire* de la incubadora esté tibio. Algunas incubadoras regulan la temperatura del aire midiendo la temperatura de la piel del bebé.

Un cuerpo que es buen absorbedor debe ser buen emisor. Un radiador ideal, con emisividad de 1, también es un absorbedor ideal, y absorbe *toda* la radiación que incide en él. Tal superficie ideal se denomina cuerpo negro ideal o simplemente **cuerpo negro**. En cambio, un *reflector* ideal, que *no* absorbe radiación, también es un radiador muy poco eficaz.

A esto se debe el recubrimiento plateado de las botellas de vacío (“termos”) inventadas por Sir James Dewar (1842-1923). Dichas botellas tienen doble pared de vidrio, y se extrae el aire del espacio entre las paredes; esto elimina casi toda la transferencia de calor por conducción y convección. El plateado de las paredes refleja casi toda la radiación del contenido de vuelta al recipiente, y la pared en sí es muy mal emisor. Así, la botella puede mantener café caliente durante varias horas. El frasco Dewar, empleado para almacenar gases licuados muy fríos, se basa exactamente en el mismo principio.

Evalúe su comprensión de la sección 17.7 Una habitación tiene una pared hecha de concreto, otra de cobre, y otra más de acero. Todas las paredes son del mismo tamaño y tienen la misma temperatura de 20°C . ¿Qué pared se sentirá más fría al tocarla? i) la pared de concreto; ii) la pared de cobre; iii) la pared de acero; iv) las tres paredes se sentirán igual de frías al tocarlas.

CAPÍTULO 17 RESUMEN

Temperatura y escalas de temperatura: Un termómetro mide la temperatura. Dos cuerpos en equilibrio térmico deben tener la misma temperatura. Un material conductor entre dos cuerpos permite una interacción que conduce a equilibrio térmico; un material aislante evita o dificulta esa interacción.

Las escalas de temperatura Celsius y Fahrenheit se basan en las temperaturas de congelación ($0^\circ\text{C} = 32^\circ\text{F}$) y de ebullición ($100^\circ\text{C} = 212^\circ\text{F}$) del agua. Un grado Celsius es igual a $\frac{9}{5}$ grados Fahrenheit. (Véase el ejemplo 17.1.)

La escala Kelvin tiene su cero en la temperatura extrapolada de presión cero para un termómetro de gas, $-273.15^\circ\text{C} = 0\text{ K}$. En la escala de un termómetro de gas, el cociente de dos temperaturas T_1 y T_2 es igual por definición al cociente de las dos presiones correspondientes del termómetro de gas, p_1 y p_2 . La temperatura de punto triple del agua (0.01°C) se define como 273.16 K .

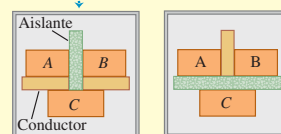
$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ \quad (17.1)$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^\circ) \quad (17.2)$$

$$T_K = T_C + 273.15 \quad (17.3)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad (17.4)$$

Si los sistemas A y B están cada uno en equilibrio térmico con el sistema C ...



... entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.

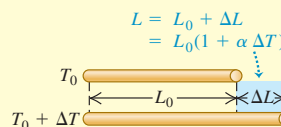
Expansión térmica y esfuerzo térmico: Un cambio de temperatura ΔT provoca un cambio en toda dimensión lineal L_0 de un cuerpo sólido. El cambio ΔL es aproximadamente proporcional a L_0 y ΔT . Asimismo, un cambio de temperatura ΔT causa un cambio ΔV en el volumen V_0 de cualquier material líquido o sólido, el cual es aproximadamente proporcional a V_0 y ΔT . Las cantidades α y β son los coeficientes de expansión lineal y de expansión de volumen, respectivamente. En sólidos, $\beta = 3\alpha$. (Véanse los ejemplos 17.2 a 17.4.)

Si un material se enfría o se calienta sujetándolo de modo que no pueda contraerse ni expandirse, está sometido a un esfuerzo de tensión F/A . (Véase el ejemplo 17.5.)

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (17.6)$$

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (17.8)$$

$$\frac{F}{A} = -Y\alpha \Delta T \quad (17.12)$$



Calor, cambios de fase y calorimetría: El calor es transferencia de energía de un cuerpo a otro a causa de una diferencia de temperatura. La cantidad de calor Q necesaria para elevar la temperatura de una cantidad de material en una cantidad pequeña ΔT es proporcional a ΔT . Esta proporcionalidad se puede expresar en términos de la masa m y del calor específico c , o bien, en términos del número de moles n y la capacidad calorífica molar $C = Mc$. Aquí, M es la masa molar y $m = nM$. (Véanse los ejemplos 17.6 y 17.7.)

Para que una masa m de material cambie de fase a la misma temperatura (como de líquido a sólido o de líquido a vapor) hay que agregarle o quitarle una cantidad de calor. Esa cantidad es igual al producto de m y L , el calor de fusión, vaporización o sublimación.

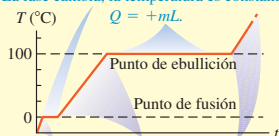
Si se agrega calor a un cuerpo, el Q correspondiente es positivo; si se le quita, Q es negativo. El principio básico de la calorimetría es la conservación de la energía. En un sistema aislado, cuyas partes interactúan intercambiando calor, la suma algebraica de los Q para todas las partes del sistema debe ser cero. (Véanse los ejemplos 17.8 a 17.11.)

$$Q = mc \Delta T \quad (17.13)$$

$$Q = nC \Delta T \quad (17.18)$$

$$Q = \pm mL \quad (17.20)$$

La fase cambia, la temperatura es constante:



La temperatura aumenta, la fase no cambia:
 $Q = mc\Delta T$

Conducción, convección y radiación: La conducción es transferencia de energía debido al movimiento molecular dentro de un material, sin movimiento del material. La corriente de calor H o conducción depende del área A por la que fluye el calor, la longitud L del trayecto de flujo del calor, la diferencia de temperatura ($T_H - T_C$) y la conductividad térmica k del material. (Véanse ejemplos 17.12 a 17.14.)

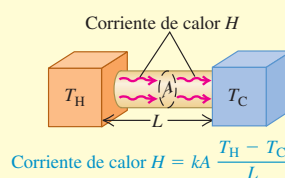
La convección es un proceso complejo de transferencia de calor, que implica movimiento de masa de una región a otra. Depende del área superficial, la orientación y la diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno.

La radiación es transferencia de energía por radiación electromagnética. La corriente de calor H causada por radiación depende del área superficial A , la emisividad e de la superficie (un número puro adimensional entre 0 y 1) y la temperatura T en Kelvin. También interviene una constante fundamental σ llamada constante de Stefan-Boltzmann. Si un cuerpo a temperatura T está rodeado por material a temperatura T_s , la corriente de calor *neta* H_{net} del cuerpo a su entorno depende tanto de T como de T_s . (Véanse los ejemplos 17.15 y 17.16.)

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L} \quad (17.21)$$

$$H = Ae\sigma T^4 \quad (17.25)$$

$$H_{\text{net}} = Ae\sigma(T^4 - T_s^4) \quad (17.26)$$



Términos clave

termodinámica, 570
temperatura, 571
termómetro, 571
equilibrio térmico, 571
aislante, 571
conductor, 571
ley cero de la termodinámica, 572
escala de temperatura Celsius, 572
escala de temperatura Fahrenheit, 573
escala de temperatura Kelvin, 574
escala de temperatura absoluta, 576
cero absoluto, 576
coeficiente de expansión lineal, 576

coeficiente de expansión de volumen, 578
esfuerzo térmico, 580
calor, 582
caloría, 582
unidad térmica británica, 583
calor específico, 583
capacidad calorífica molar, 584
fase, 586
estados de la materia, 586
cambio de fase, 586
calor de fusión, 586
equilibrio de fases, 587
calor de vaporización, 587

calor de combustión, 589
conducción, 592
corriente de calor, 592
conductividad térmica, 592
gradiente de temperatura, 592
resistencia térmica, 593
convección, 595
radiación, 596
emisividad, 596
constante de Stefan-Boltzmann, 596
ley de Stefan-Boltzmann, 596
cuerpo negro, 597

Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

No. “Calor” se refiere a transferencia de energía de un cuerpo a otro, debido a una diferencia de temperatura entre los cuerpos. Los cuerpos no *contienen* calor.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

17.1 Respuesta: ii) Un termómetro de líquido en tubo en realidad mide su propia temperatura. Si el termómetro permanece en agua caliente suficiente tiempo, llegará al equilibrio térmico con el agua y su temperatura será la misma que la del agua.

17.2 Respuesta: iv) Tanto una banda bimetalica como un termómetro de resistencia miden su propia temperatura. Para que ésta sea igual a la temperatura del objeto que se está midiendo, el termómetro y el objeto deben estar en contacto y en equilibrio térmico. Un termómetro arterial temporal detecta la radiación infrarroja en la piel de una persona. Así que no hay necesidad de que el detector y la piel estén a la misma temperatura.

17.3 Respuestas: i), iii), ii), v), iv) Para comparar estas temperaturas, conviértalas todas a la escala Kelvin. Para i) la temperatura Kelvin es $T_K = T_C + 273.15 = 0.00 + 273.15 = 273.15$ K; para ii) $T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^\circ) = \frac{5}{9}(0.00^\circ - 32^\circ) = -17.78^\circ\text{C}$ y $T_K = T_C + 273.15 = -17.78 + 273.15 = 255.37$ K; para iii) $T_K = 260.00$ K; para iv) $T_K = 77.00$; y para v) $T_K = T_C + 273.15 = -180.00 + 273.15 = 93.15$ K.

17.4 Respuestas: ii) y iii) El metal 2 debe expandirse más que el metal 1 cuando se calienta, así que debe tener un mayor coeficiente de expansión lineal α . En la tabla 17.1 vemos que dos metales con valores de α más grandes que el del cobre son el aluminio y el latón, aunque no el acero.

17.5 Respuestas: ii), i), iv), iii) En los casos i) y ii), la cantidad relevante es el calor específico c de la sustancia, que es la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de 1 kilogramo de esa sustancia en 1 K (1 $^\circ\text{C}$). De acuerdo con la tabla 17.3, estos valores son i) 138 J para el mercurio y ii) 2428 J para el etanol. En los casos iii) y iv) necesitamos la capacidad calorífica molar C , que es la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de 1 mol de esa sustancia en 1 $^\circ\text{C}$. De nuevo, a partir de la tabla 17.3, estos valores son iii) 27.7 J para el