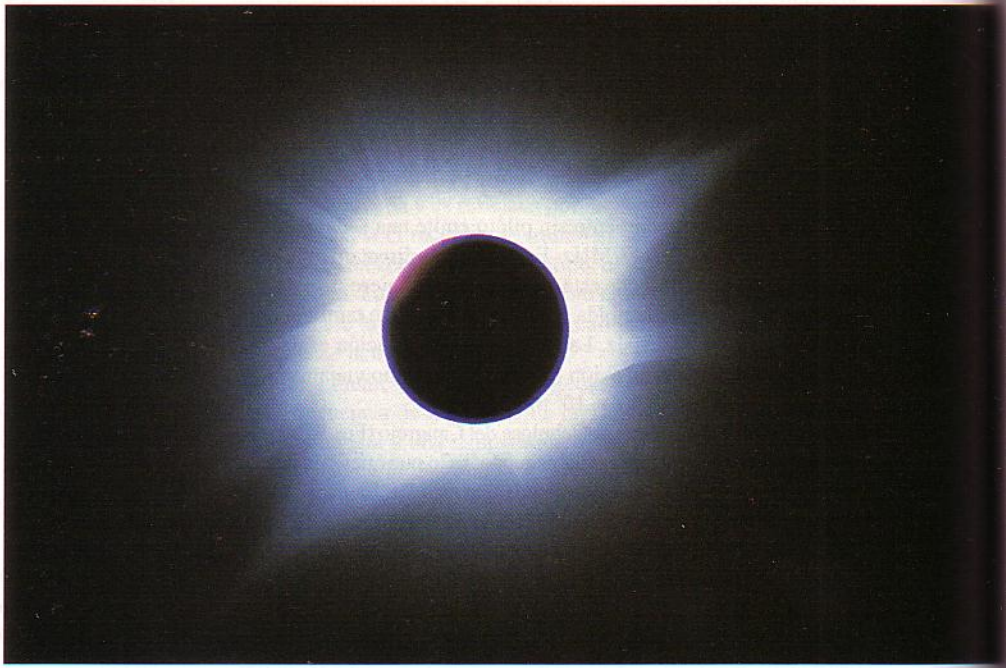
# 17 TEMPERATURA Y CALOR

Tal vez el material a más alta temperatura que jamás verá el lector es la atmósfera exterior del Sol, llamada corona. La corona, que está a una temperatura aproximada de 2,000,000°C, emite una luz que literalmente está fuera de este mundo. Sin embargo, por ser muy delgada la corona, su luz es más bien tenue y sólo podemos verla durante un eclipse solar total, cuando la Luna cubre el disco del Sol, como en esta fotografía.



**? ¿Es correcto decir que la corona contiene calor?**

Tanto en un caluroso 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, pero 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, quizá 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, en cambio, 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**, el estudio de las transformaciones de energía en las que intervienen: el calor, el 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, y sus aplicaciones aparecen en cosas como: motores de autos, 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

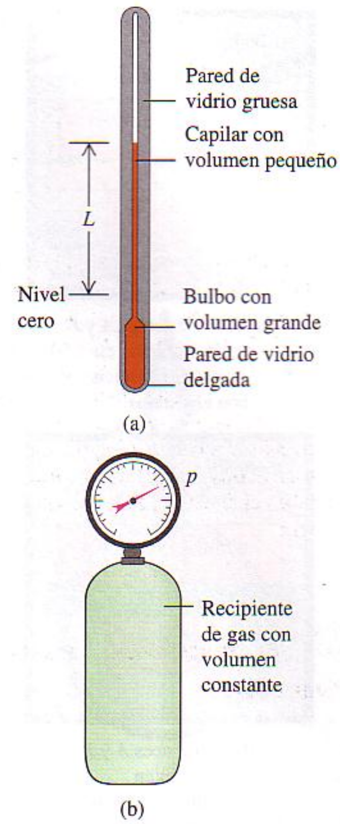
El concepto de **temperatura** se origina en las ideas cualitativas de "caliente" y "frío" basadas en el sentido del tacto. Un cuerpo que se siente caliente suele tener una temperatura más alta que un cuerpo similar que se siente frío. Esto es un tanto vago y los sentidos pueden engañarse. Sin embargo, 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 las energías cinéticas 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. Sin embargo, 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.

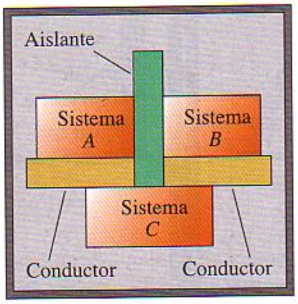
Para usar la temperatura como medida de calidez o de frialdad, necesitamos construir una escala de temperatura. Para ello, podemos usar cualquier propiedad medible de un sistema que varíe con su "calidez" o "frialdad". La figura 17.1a muestra un sistema común para medir la temperatura. Cuando el sistema se calienta, el líquido colorido (usualmente mercurio o etanol) se expande y sube en el tubo, y el valor de $L$ aumenta. Otro sistema sencillo es una cantidad de gas en un recipiente de volumen constante (Fig. 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 de 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 que la interacción entre el termómetro y el café ya no causa un cambio en el sistema. Llamamos **equilibrio térmico** a este estado.

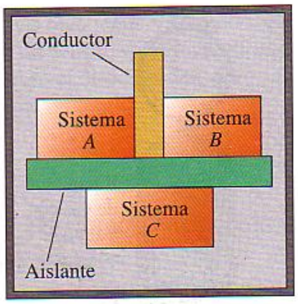
Si dos sistemas están separados por un material **aislante**, como madera, espuma de plástico o fibra de vidrio, se afectan mutuamente con más lentitud. Las hieleras para acampar se fabrican con materiales aislantes para retardar el calentamiento del hielo y de la comida fría en su interior que tratan de lograr 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 se calentará el contenido de la hielera.




**17.1** (a) Sistema cuya temperatura se especifica con el valor de la longitud $L$. (b) Sistema cuya temperatura está dada por el valor de la presión $p$.




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




(b) ...entonces $A$ y $B$ están en equilibrio térmico entre sí.

**17.2** Ley cero de la termodinámica. Las barras verdes representan paredes aislantes; las amarillas, paredes conductoras.

Podemos descubrir una propiedad importante del equilibrio térmico considerando tres sistemas, $A$, $B$ y $C$, que inicialmente no están en equilibrio térmico (Fig. 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 Fig. 17.2a), pero dejamos que $C$ interactúe con $A$ y $B$. Esta interacción se indica en la figura con una barra amarilla que representa un **conductor** térmico, un material que *permite* la interacción térmica a través suyo. Esperamos hasta que se establece el equilibrio térmico; $A$ 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 (Fig. 17.2b) y sustituimos la pared aislante entre $A$ y $B$ por una *conductora* que permite a $A$ y $B$ interactuar. ¿Qué sucede? Los experimentos indican que *nada* sucede; no hay cambios adicionales en $A$ ni en $B$. Concluimos que **si $C$ inicialmente 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 apropiado.)

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 $B$. En equilibrio térmico, cuando la lectura del termómetro se estabiliza, el termómetro mide la temperatura tanto de $A$ como de $B$; por 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**

¿Por qué cuando una enfermera toma la temperatura de un paciente espera a que la lectura del termómetro deje de cambiar? ¿La temperatura de cuál objeto está leyendo la enfermera?

## 17.2 | Termómetros y escalas de temperatura

Para que el dispositivo de líquido en un tubo de la figura 17.1 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 dividimos la distancia entre ambos puntos en cien intervalos iguales llamados *grados*. El resultado es la **escala de temperatura Celsius** (antes llamada *centígrada*). La temperatura Celsius para un estado más frío que el agua en el 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 bimetálica*, que se fabrica pegando tiras de dos metales distintos (Fig. 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 (Fig. 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 no necesitan estar en contacto físico con el objeto cuya temperatura están midiendo. Un ejemplo es el termómetro de oído (Fig. 17.4) que usa un dispositivo llamado *termopila* para medir la cantidad de radiación infrarroja emitida por el tímpano, lo cual indica su temperatura. (En la sección 17.7, veremos que *todos* los objetos emiten radiación electromagnética como consecuencia de su temperatura.) La ventaja de esta técnica es que no requiere tocar el tímpano, que es frágil y podría dañarse fácilmente.

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 congelación; el número de grados Fahrenheit arriba de la congelación es $\frac{9}{5}$ de esa cantidad, pero la congelación en la escala Fahrenheit es a 32°F, así que, para obtener la temperatura Fahrenheit $T_F$, multiplicamos $T_C$ por $\frac{9}{5}$ y le sumamos 32°. Con símbolos,

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32° \qquad (17.1)$$

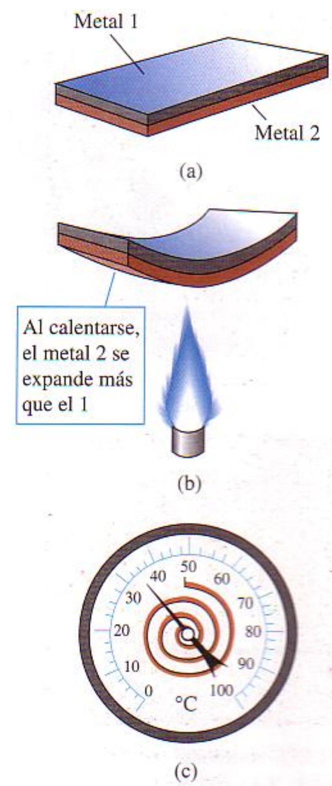
Para convertir de Fahrenheit a Celsius, despejamos $T_C$ de esta ecuación:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32°) \qquad (17.2)$$

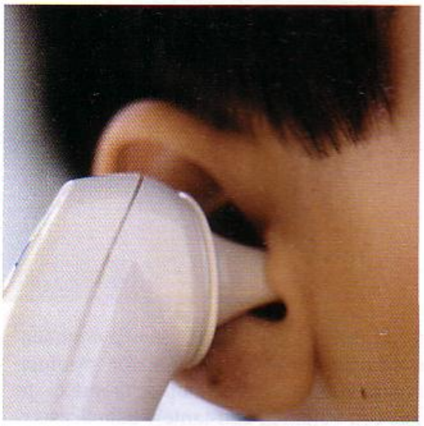
Es decir, restamos 32° para obtener el número de grados Fahrenheit arriba de la congelación y multiplicamos por $\frac{5}{9}$ para obtener el número de grados Celsius arriba de la congelación, esto es, la temperatura Celsius.

No recomendamos memorizar las ecuaciones (17.1) y (17.2). En vez de ello, trate de entender el razonamiento que condujo a ellas para poder deducirlas cuando las necesite, verificando su razonamiento con la relación 100°C = 212°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, 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°.




**17.3** (a) Una tira bimetálica. (b) La tira se dobla al aumentar su temperatura. (b) Tira bimetálica empleada como termómetro.



**17.4** El termómetro de oído mide radiación infrarroja del tímpano, que está situado a suficiente distancia dentro de la cabeza como para dar una indicación excelente de la temperatura interna del cuerpo.

**Evalúe su comprensión**

Calcule la temperatura Fahrenheit media del planeta Venus (temperatura Celsius media 460°C) y además encuentre la temperatura en la que coinciden las escalas Fahrenheit y Celsius.

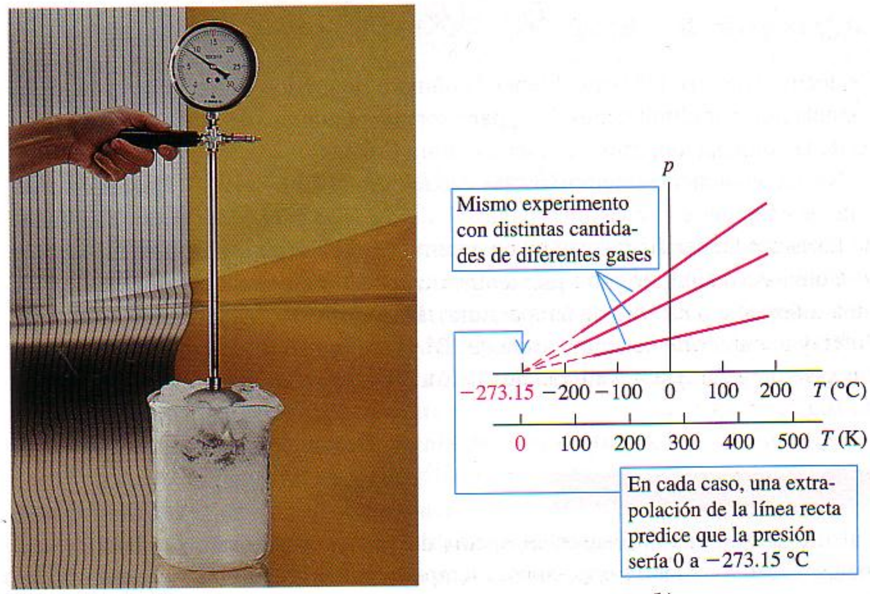
## 17.3 | Termómetros de gas y la escala Kelvin

Cuando calibramos dos termómetros, como un sistema de líquido en tubo o un termómetro de resistencia, de modo que coincidan en 0°C y 100°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 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 (Fig. 17.5a) y se mide su presión con uno de los dispositivos descritos en la sección 14.2. Para calibrar el termómetro, medimos la presión a dos temperaturas, digamos 0°C y 100°C, graficamos esos puntos y trazamos una línea 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 una clase y cantidad distintas de gas.

Si extrapolamos la línea, veremos que hay una temperatura hipotética, –273.15°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). No podemos observar realmente esta condición de cero presión; los gases se licúan 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 Kel-**




(a) (b)

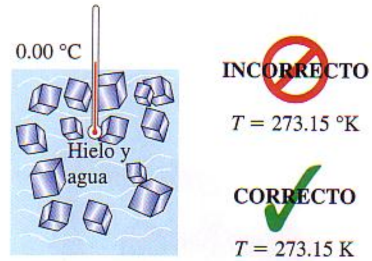
**17.5** (a) Termómetro de gas con volumen constante. (b) Gráfica de presión absoluta contra temperatura para un termómetro de gas con volumen constante y baja densidad. Las tres gráficas corresponden a experimentos con distintos tipos y cantidades de gas: cuanto mayor es la cantidad de gas, es más alta la gráfica. Las líneas punteadas son extrapolaciones de los datos a baja temperatura.

**vin**, 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 K = –273.15°C y 273.15 K = 0°C; es decir,

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

Esta escala se muestra en la figura 17.5b. Una temperatura ambiente común, 20°C, es 20 + 273.15 ≈ 293 K.

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




**17.6** Las temperaturas Kelvin se miden en kelvin (K), *no* en "grados 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 $T_1 = 32.00°F$ a la temperatura corporal $T_2 = 98.60°F$. Exprese estas temperaturas como °C y K, y calcule $\Delta T = T_2 - T_1$ en ambos casos.

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y 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 $T_1 = 32.00°F = 0.00°C$, y 98.60°F es 98.60 – 32.00 = 66.60 F° por arriba de la congelación; multiplicamos esto por (5 C°/9 F°) para obtener 37.00 C° por arriba de la congelación, o sea, $T_2 = 37.00°C$.

Para obtener las temperaturas Kelvin, sumamos 273.15 a las temperaturas Celsius: $T_1 = 273.15$ K y $T_2 = 310.15$ 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.

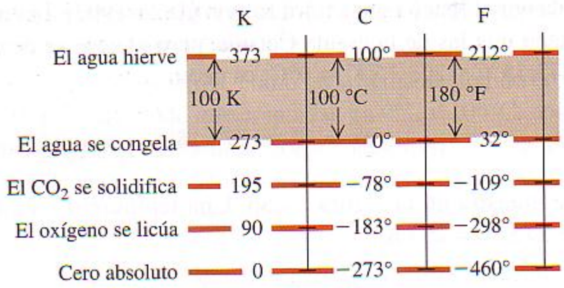
La *diferencia* de temperatura $\Delta T = T_2 - T_1$ es 37.00 C° = 37.00 K.

**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 esas escalas pero no en la Fahrenheit.

La escala Celsius tiene dos puntos fijos, los puntos de congelación y ebullición normales del agua, pero podemos definir la escala Kelvin usando un termómetro de gas con sólo una temperatura de referencia. Definimos el cociente de cualesquier 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 $p_2$:

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

La presión $p$ es directamente proporcional a la 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




**17.7** Relaciones entre las escalas de temperatura: Kelvin, Celsius y Fahrenheit. Las temperaturas se han redondeado al grado más cercano.

y reproducibilidad, el estado escogido 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 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 de punto triple del agua es, por definición, $T_{\text{triple}} = 273.16$ K, que corresponde a 0.01°C. Por la ecuación (17.4), si $p_{\text{triple}}$ es la presión en un termómetro de gas a la temperatura $T_{\text{triple}}$ y $p$ es la presión a otra temperatura $T$, entonces $T$ está dada en la escala Kelvin por

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

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 principalmente 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 ($T = 0$ K $= -273.15$°C, la temperatura en que $p = 0$ en la ecuación (17.5)) se llama **cero absoluto**. En el cero absoluto, un sistema de moléculas (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 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**

La temperatura de la corona solar (véase la fotografía inicial del capítulo) es de $2.0 \times 10^7$ °C, y la temperatura a la que el helio se licúa a presión estándar es de −268.93°C. Exprese estas temperaturas en kelvin y explique por qué suele usarse la escala Kelvin para expresar temperaturas muy altas y muy bajas.

## 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 (Fig. 17.1a) y que las tiras bimetálicas se doblen (Fig. 17.3). 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 virtiendo 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 $\Delta T$, la longitud cambia en $\Delta L$. Se observa experimentalmente que, si $\Delta T$ no es muy grande (digamos, menos de 100 C°), $\Delta L$ es *directamente proporcional* a $\Delta T$. 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 tanto, $\Delta L$ también debe ser proporcional a $L_0$. Si introducimos una constante de proporcionalidad $\alpha$ (diferente para cada material), podremos expresar estas relaciones en una ecuación:

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

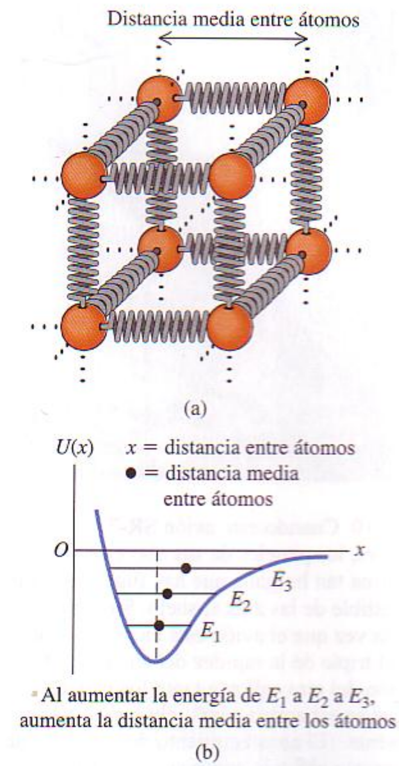
Si un cuerpo tiene longitud $L_0$ a la temperatura $T_0$, su longitud $L$ a $T = T_0 + \Delta T$ es

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

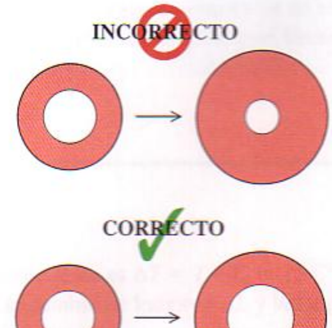
La constante $\alpha$, que describe las propiedades de expansión térmica de un material dado, se denomina **coeficiente de expansión lineal**. Las unidades de $\alpha$ son $K^{-1}$ o $(C°)^{-1}$. (Recuerde que un *intervalo* de temperatura es igual en las escalas Kelvin y Celsius.) En muchos materiales, todas las dimensiones lineales cambian según la ecuación (17.6) o (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.

Podemos entender la expansión térmica cualitativamente desde una perspectiva molecular. Imaginemos las fuerzas interatómicas en un sólido como resortes (Fig. 17.8). (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, la energía y la amplitud de la vibración aumentan. 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 aumenta la distancia *media* entre las moléculas. Al separarse los átomos, todas las dimensiones aumentan.

**CUIDADO** Si un objeto sólido tiene un agujero, ¿qué sucede con el tamaño del agujero al aumentar la temperatura del objeto? Un error común es suponer que si el objeto se expande, el agujero se encoge porque el material se expande hacia el agujero, pero la verdad es que el agujero también se expande (Fig. 17.9); 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 17.8a delimitan un agujero cúbico. Al expandirse el objeto, los átomos se separan y el tamaño del agujero aumenta. La única situación




**17.8** (a) Modelo de las fuerzas entre átomos vecinos de un sólido. Los "resortes" que son más fáciles de estirar que de comprimir. (b) Gráfica de la energía potencial de "resorte" $U$ contra distancia $x$ entre átomos vecinos (compare con la Fig. 13.19a). La curva no es simétrica: al aumentar la energía, los átomos oscilan con mayor amplitud y la distancia *media* aumenta.




**17.9** Cuando un objeto sufre expansión térmica, todos los agujeros que contiene también se expanden.

**17.10** 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 para embonar perfectamente. (El abastecimiento de combustible durante el vuelo compensa la pérdida de combustible en tierra.)

en que un "agujero" se llena debido a la expansión térmica es cuando dos objetos discretos se expanden y reducen la separación entre ellos (Fig. 17.10).

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, $\alpha$ varía un poco con la temperatura inicial $T_0$ y el tamaño del intervalo de temperatura. Aquí haremos caso omiso de esta complicación. En la tabla 17.1, se dan valores medios de $\alpha$ para varios materiales. Dentro de la precisión de estos valores, no necesitamos preocuparnos por si $T_0$ es 0°C o 20°C o alguna otra temperatura. Observe que los valores típicos de $\alpha$ 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 $\Delta T$ no es muy grande (menos de 100 C°), el aumento de volumen $\Delta V$ es aproximadamente proporcional a $\Delta T$ y al volumen inicial $V_0$:

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

La constante $\beta$ caracteriza las propiedades de expansión de volumen de un material dado; se llama **coeficiente de expansión de volumen**. Las unidades de $\beta$ son $K^{-1}$ o $(C°)^{-1}$. Al igual que en la expansión lineal, $\beta$ varía un poco con la temperatura, y la ecuación (17.18) es una relación aproximada válida sólo para cambios de temperatura pequeños. En muchas sustancias, $\beta$ disminuye a bajas temperaturas. En la tabla 17.2 se dan algunos valores de $\beta$ 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 $\beta$ y el coeficiente de expansión lineal $\alpha$. 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

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

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

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

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

**Tabla 17.1** **Coeficientes de expansión lineal**

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

**Tabla 17.2** **Coeficientes de expansión de volumen**

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

Estrategia para resolver problemas

## Expansión térmica

**IDENTIFICAR** *los conceptos relevantes:* 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. Escoja 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), así como las incógnitas.

**EJECUTAR** *la solución como sigue:*

1. Despeje las incógnitas. Muchas veces se dan dos temperaturas y hay que calcular $\Delta T$; 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 $\Delta T$ primero; la temperatura final será $T_0 + \Delta T$.
2. La consistencia de unidades es crucial, como siempre. $L_0$ y $\Delta L$ (o $V_0$ y $\Delta V$) deben tener las mismas unidades, y si usa un valor de $\alpha$ o $\beta$ en $K^{-1}$ o $(C°)^{-1}$, $\Delta T$ debe estar en kelvin o grados Celsius (C°). En cambio, se puede usar K y 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 20°C. ¿Qué longitud tiene en un caluroso día de verano en el que la temperatura es de 35°C?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** Se trata de un problema de expansión lineal, así que usamos la ecuación (17.6). Tenemos $L_0 = 50.000$ m, $T_0 = 20°C$ y $T = 35°C$, y obtenemos el valor de $\alpha$ de la tabla 17.1. La incógnita es la nueva longitud, $L$.

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

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

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 $\Delta L$. Observe también que $\Delta L$ es proporcional a la longitud inicial $L_0$: una cinta de 50 m se expande 9 mm; una de 0.50 m (50 cm) sólo se expandiría 0.090 mm.

Este ejemplo muestra que los metales se expanden muy poco cuando el cambio de temperatura es moderado. Una bandeja metálica para hornear en un horno a 200°C 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 Y PLANTEAR:** 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. Por tanto, la distancia verdadera 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 razón $L/L_0$ 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 de 200 cm$^3$ se llena al borde con mercurio a 20°C. ¿Cuánto mercurio se desborda 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 derramada es igual a la diferencia entre los valores de $\Delta V$ 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 $\beta$ debe ser mayor que el del vidrio. El valor para el mercurio, tomado de la tabla 17.2, es $\beta_{\text{mercurio}} = 18 + 10^{-5}$ $\text{K}^{-1}$; el valor de $\beta$ 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

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

El aumento de volumen del frasco es

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

El aumento de volumen del mercurio es

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

El volumen de mercurio que se desborda es

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

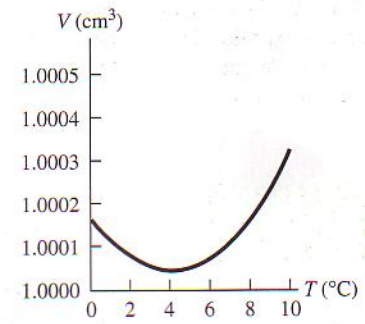
**EVALUAR:** Básicamente, así es como funciona un termómetro de mercurio en vidrio, excepto que, en lugar de dejar que el mercurio se derrame, se deja que suba dentro de un tubo sellado al aumentar $T$.

Como muestran las tablas 17.1 y 17.2, el vidrio tiene coeficientes de expansión $\alpha$ y $\beta$ menores que la mayor parte de los metales. Es por ello que podemos usar agua caliente para aflojar la tapa metálica de un frasco de vidrio; el metal se expande más que el vidrio.

## 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 $\beta$ es *negativo*. Por arriba de 4°C, el agua se expande al calentarse (Fig. 17.11). Por 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 contraste, la mayor parte 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; en cambio, 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 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 mayor parte 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.

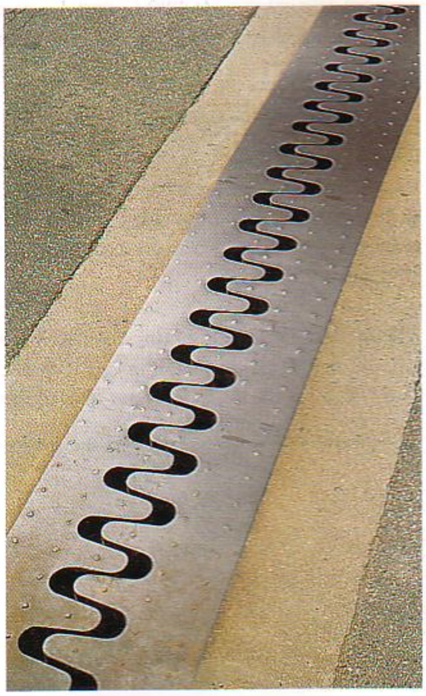



**17.11** Volumen de un gramo de agua en el intervalo de temperaturas de 0°C a 10°C. A los 100°C, el volumen ha aumentado a 1.034 $cm^3$. Si el coeficiente de expansión de volumen fuera constante, la curva sería una línea recta.

## 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 (Fig. 17.12), a fin 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.



**17.12** 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.

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 necesario para comprimirla (o estirarla) a su longitud original. Suponga que una varilla de longitud $L_0$ y área transversal $A$ se mantiene en longitud constante mientras la temperatura se reduce ($\Delta T$ negativo), causando un esfuerzo de tensión. El cambio fraccionario de longitud si la varilla estuviera libre sería

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

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

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

Si la longitud ha de ser constante, el cambio fraccionario *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, tenemos

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

Si la temperatura disminuye, $\Delta T$ es negativo, así que $F$ y $F/A$ son positivos; esto implica que se requiere una fuerza y un esfuerzo *de tensión* para mantener la longitud. Si $\Delta T$ 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. Podemos romper un tazón de vidrio virtiendo en él agua muy caliente; el esfuerzo térmico entre las partes caliente y fría excede el esfuerzo de ruptura 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 cm$^2$, 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 separadas por una distancia constante?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** Usaremos la ecuación (17.12) para relacionar el esfuerzo (la incógnita) con el cambio de temperatura. Los valores necesarios para el módulo de Young $Y$ y el coeficiente de expansión lineal $\alpha$ son los del aluminio, el material de que está hecho el cilindro. Obtendremos esos valores de las tablas 11.1 y 17.1, respectivamente.

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

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

El signo negativo indica que se requiere un esfuerzo compresivo, 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:

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

o sea, 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**

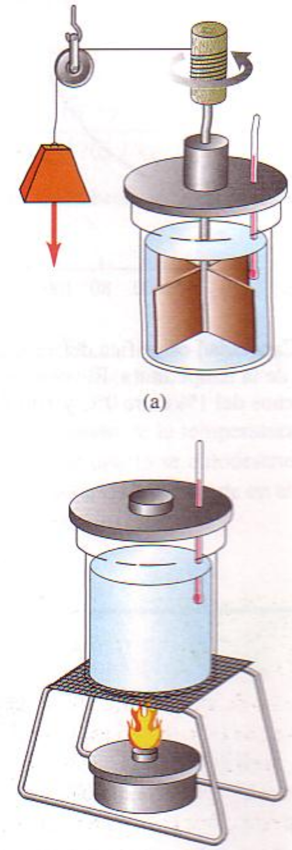
En la tira bimetálica de la figura 17.3, el metal 1 es cobre. Encuentre dos materiales que podrían usarse como metal 2.

## 17.5 | Cantidad de calor

Si metemos una cuchara fría en una taza de café caliente, la cuchara se calienta y el café se enfría para acercarse al 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 llama *flujo de calor* o *transferencia de calor*, y 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 otras formas de energía. Sir James Joule (1818-1889) estudió cómo puede calentarse el agua por agitamiento vigoroso con una rueda de paletas (Fig. 17.13a). Las paletas agregan energía al agua realizando *trabajo* sobre ella, y Joule observó que *el aumento de temperatura es directamente proporcional a la cantidad de trabajo realizado*. Se puede lograr el mismo cambio de temperatura poniendo el agua en contacto con un cuerpo más caliente (Fig. 17.13b); 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** 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 energía en tránsito 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 (Fig. 17.13a). Si cortamos un cuerpo a la mitad, cada mitad tiene la misma temperatura que el todo; sin embargo, para elevar la temperatura de una *mitad* un intervalo dado, le agregamos la mitad del calor que agregaríamos al todo.



(a)

(b)

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

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. 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.

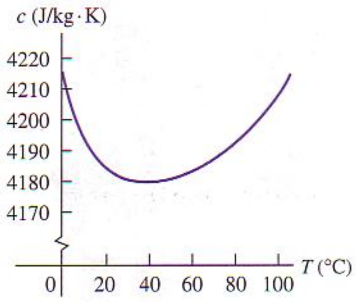
Dado que el calor es energía en tránsito, debe haber una relación definida entre estas unidades y las de energía mecánica que conocemos, como el joule. Experimentos similares en concepto al de Joule han demostrado que

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$
$$1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} = 4186 \text{ J}$$
$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft}\cdot\text{lb} = 252 \text{ cal} = 1055 \text{ J}$$

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 $m$ de material. Si calentamos agua para hacer té, necesitamos




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

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 kg de agua 1 C°, pero sólo 910 J para elevar en 1 C° la temperatura de 1 kg de aluminio.

Juntando todas estas relaciones, tenemos

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

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

$$dQ = mc\,dT \tag{17.14}$$

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

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

**CUIDADO** 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 energía *en tránsito* a causa de una diferencia de temperatura. No existe "la cantidad de calor de un cuerpo".

El calor específico del agua es aproximadamente

$$4190\ \text{J/kg}\cdot\text{K} \qquad 1\ \text{cal/g}\cdot\text{C°} \qquad \text{o } 1\ \text{Btu/lb}\cdot\text{F°}$$

El calor específico de un material siempre depende un poco de la temperatura inicial y del intervalo de temperatura. La figura 17.14 muestra esta variación para el agua. En los problemas y ejemplos de este capítulo normalmente haremos caso omiso de esta variación.

## Ejemplo 17.6 Comer con resfriado, ayunar con fiebre

Presa de la gripe, un hombre de 80 kg tuvo 2.0 C° de fiebre, es decir, tuvo una temperatura corporal de 39.0°C en lugar de la normal de 37.0°C. Suponiendo que el cuerpo humano es en su mayor parte agua, ¿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 (para el agua) y $\Delta T$ = 39.0°C – 37.0°C = 2.0 C° = 2.0 K. Usaremos la ecuación (17.13) para calcular 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 alimentos. (De hecho, el calor específico del cuerpo humano es de cerca de 3480 J/kg · K, alrededor de 83% del 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 $5.6 \times 10^5$ 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 = $7.4 \times 10^{-3}$ 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 Y PLANTEAR:** La incógnita es la *razón* de cambio de la temperatura. Por la ecuación (17.14), el cambio de temperatura $\Delta T$ en kelvin es proporcional al calor transferido en joules, así que la razón de cambio de la temperatura en K/s es proporcional a la razón de transferencia de calor en J/s.

**EJECUTAR:** En un segundo, $Q = (7.4 \times 10^{-3}\ \text{J/s})(1\ \text{s}) = 7.4 \times 10^{-3}$ J. Por la ecuación (17.13), $Q = mc\,\Delta T$, el cambio de temperatura en un 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, podemos dividir ambos miembros de la ecuación (17.14) entre $dt$ y reacomodar:

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

**EVALUAR:** Con esta rapidez de 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 lugar 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*, pero 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 = $18.0 \times 10^{-3}$ 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 $n$:

$$m = nM \tag{17.16}$$

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

$$Q = nMc\,\Delta T \tag{17.17}$$

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) así:

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

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):

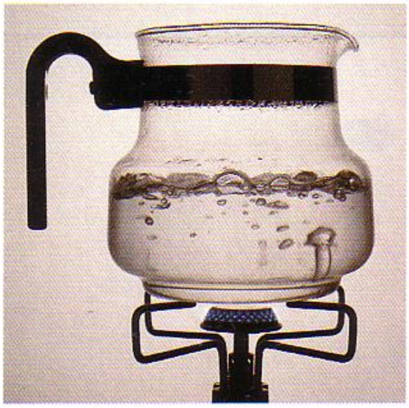
$$C = \frac{1}{n}\frac{dQ}{dT} = Mc \quad \text{(capacidad calorífica molar)} \tag{17.19}$$

Por ejemplo, la capacidad calorífica molar del agua es

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

**Tabla 17.3 Capacidades caloríficas específica y molar aproximadas (a presión constante)**

| Sustancia | Calor específico, $c$ (J/kg · K) | $M$ (kg/mol) | Capacidad calorífica molar, $C$ (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 |
| Etilén glicol | 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 |



**17.15** 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.

En la tabla 17.3 se dan valores de capacidad calorífica molar para varias sustancias. Tome nota del extraordinariamente elevado calor específico del agua (Fig. 17.15).

**CUIDADO** 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 energía en tránsito 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 $\Delta T$ 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 $C_p$. 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 $C_V$. 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 mayor parte de los sólidos elementales son casi iguales, alrededor de 25 J/mol • 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 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 hay 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**

Suponga que quiere usar el aparato de la figura 17.13a para calentar agua y preparar una taza de té. ¿Qué distancia tendría que caer un bloque de 1.00 kg para elevar la temperatura de 0.250 kg de agua de 20.0°C a 90.0°C? Suponga que toda la energía potencial que el bloque pierde al caer se usa para elevar la temperatura del agua.

## 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 a hielo a 0°C y presión atmosférica normal, la temperatura del hielo *no* aumenta. En vez de ello, parte de él se funde para formar agua líquida. Si agregamos el calor lentamente, manteniendo el sistema muy cerca del equilibrio térmico, la temperatura seguirá en 0°C hasta que todo el hielo se haya fundido (Fig. 17.16). 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 presión atmosférica normal, necesitamos $3.34 \times 10^5$ 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

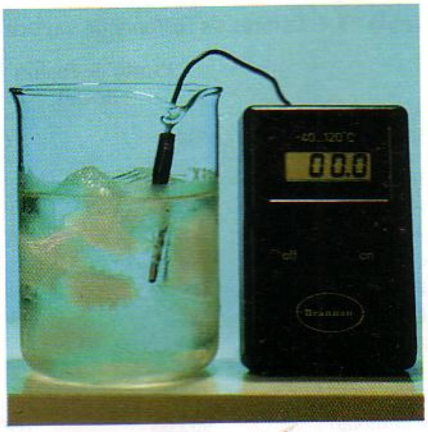
$$L_f = 3.34 \times 10^5 \text{ J/kg} = 79.6 \text{ cal/g} = 143 \text{ Btu/lb}$$

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 negativo porque se quita calor en lugar de agregarse. A fin de cubrir ambas posibilidades e incluir otros tipos de cambios de fase, escribimos

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




**17.16** 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.

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

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.

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**.

Una cosa análoga 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 $2.256 \times 10^6$ J para convertir 1 kg de agua a 100°C en 1 kg de vapor a 100°C. En contraste, para elevar la temperatura de 1 kg de agua de 0°C a 100°C se requieren $Q = mc\Delta T = (1.00 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{C°})(100 \text{ C°}) = 4.19 \times 10^5$ 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.

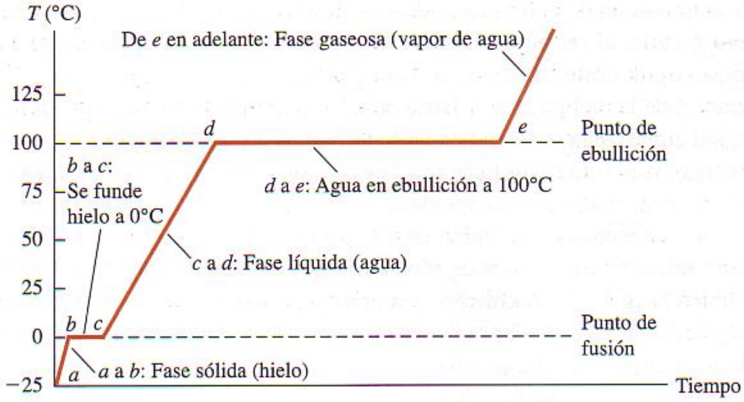
Tanto $L_v$ como la temperatura de ebullición de un material dependen de la presión. El agua hierve a menor temperatura (cerca de 95°C) en Denver que en Pittsburgh porque Denver está a mayor altura y la presión atmosférica media es menor. El calor de vaporización es un poco más alto a esta presión reducida,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

**Tabla 17.4 Calores de fusión y de vaporización**

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

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




**17.18** Gráfica de temperatura contra tiempo para una muestra de agua que inicialmente está en la fase sólida (hielo). Se agrega calor con razón constante. La temperatura no cambia durante los cambios de fase si la presión se mantiene constante.

cos *elementos* tienen temperaturas de fusión cercanas a la temperatura ambiente; uno de ellos es el metal galio (Fig. 17.17).

La figura 17.18 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 mentiene 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 hasta que toda el agua ha pasado a la fase de vapor (punto *e*). Si la razón de aporte de calor es constante, la pendiente de la línea para la fase sólida (hielo) tiene una pendiente más empinada que para la líquida. ¿Entiende por qué? (Véase la tabla 17.3.)

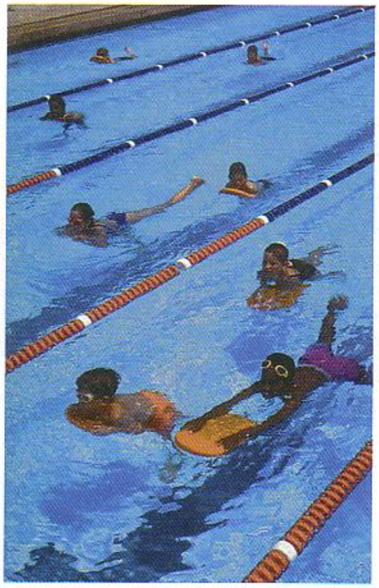
A veces, una sustancia puede cambiar directamente de la fase sólida a la gaseosa. Este proceso se llama *sublimación* y se dice que el sólido se *sublima*. El calor correspondiente es el *calor de sublimación* $L_s$. El dióxido de carbono ($CO_2$) líquido no puede existir a una presión menor que $5 \times 10^5$ Pa (unas 5 atm), y el "hielo seco" ($CO_2$ 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 puede 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 kg de agua convertido en vapor en la caldera absorbe más de $2 \times 10^6$ J (el calor de vaporizción $L_v$ 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



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

para evaporar agua de la lengua (jadeo), o de la piel (sudor). El enfriamiento evaporativo permite al ser humano mantener su temperatura corporal normal en climas desérticos donde la temperatura del aire puede alcanzar los 55°C. 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. Si no se repone esta agua, el resultado será deshidratación, fiebre térmica y la muerte. 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 evaporativo también explica por qué sentimos frío al salir de una alberca (Fig. 17.19).

También se usa el enfriamiento evaporativo para enfriar edificios en climas calientes y secos, y 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 un gramo de gasolina produce unos 46,000 J (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; la unidad de energía de alimentos, aunque llamada caloría, es una *kilocaloría* (1,000 cal = 4,186 J). Al decir que un gramo de mantequilla de maní "contiene 6 calorías", queremos decir que se liberan 6 kcal de calor (6,000 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 energía en tránsito, 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.

Estrategia para resolver problemas

### Problemas de calorimetría

**IDENTIFICAR** *los conceptos relevantes:* El principio en que se basan los cálculos de calorimetría (cálculos con calor) es muy sencillo: cuando fluye calor entre dos cuerpos que están aislados de su entorno, la cantidad de calor perdida por un cuerpo debe ser igual a la ganada por el otro. El calor es energía en tránsito, 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.

**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 varios cuerpos interactúan, 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 cosas. 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 desconocidas.

**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, el cambio de temperatura será $\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}} = T - 20°\text{C}$ (*no* $20°\text{C} - T$).
2. En problemas en los que 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 usar el signo algebraico equivocado para un término en $Q$ o en $\Delta T$. 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

Una geóloga en el campo 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. ¿En qué temperatura final alcanzan la taza y el café 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 Y PLANTEAR:** No hay cambios de fase en esta situación, así que sólo necesitamos la ecuación (17.13). Los dos objetos que debemos considerar son: la taza y el café, y la incógnita es su temperatura final.

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

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

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

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

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

$$Q_{\text{café}} + Q_{\text{aluminio}} = 0 \quad \text{o sea}$$

$$\begin{aligned} &(0.300\ \text{kg})(4190\ \text{J/kg}\cdot\text{K})(T - 70.0°\text{C}) \\ &\quad + (0.120\ \text{kg})(910\ \text{J/kg}\cdot\text{K})(T - 20.0°\text{C}) = 0 \end{aligned}$$

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

**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 este valor de $T$ en las ecuaciones originales. Vemos que $Q_{\text{café}} = -5.0 \times 10^3$ J y $Q_{\text{aluminio}} = +5.0 \times 10^3$ J; $Q_{\text{café}}$ es negativo, lo que implica que el café pierde calor.

## Ejemplo 17.9 Cambios de temperatura y 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 debe agregar para que la temperatura final sea 0°C con todo el hielo derretido, si puede despreciarse la capacidad calorífica del recipiente?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** El hielo y la gaseosa son los objetos que intercambian calor. La Omni-Cola sufre sólo un cambio de temperatura, mientras 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, $m_{\text{hielo}}$.

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

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

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

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

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

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

La suma de estas tres cantidades debe ser cero:

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

Despejando $m_{\text{hielo}}$, 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 gaseosa del problema.

## Ejemplo 17.10 ¿Qué cocina?

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

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** Los dos objetos que intercambian calor son: el agua y la olla. 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 produce 0.10 kg de vapor a 100°C o más.

**EJECUTAR:** El caso más sencillo de calcular es el (1), así que probemos eso primero. Sea la temperatura final común del agua líquida y la olla $T$. Puesto que suponemos que no hay cambios de fase, la suma de las cantidades de calor agregadas a los dos materiales es

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

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

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

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

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

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

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 kg) = 0.0034 kg = 3.4 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 habría sido mayor que 100°C. ¿Puede demostrar que esto es lo que habría sucedido si hubiéramos vertido originalmente 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 para acampar, 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?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** En este problema, aplicamos las ecuaciones (17.13) y (17.20) al agua, toda la cual sufre un cambio de temperatura y una parte de la cual 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).

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

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

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

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

o sea, 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 mayor parte 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**

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. Calcule la temperatura del (hielo,agua,vapor,) después de un tiempo $t/2$, e indique su fase.

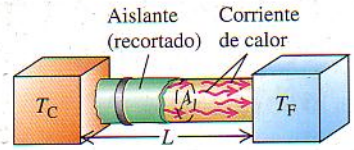
## 17.7 | Mecanismos de transferencia de calor

Hemos hablado de: *conductores* y *aislantes*, materiales que permiten o impiden la transferencia de calor entre cuerpos. Veamos ahora más a fondo las *razones* de transferencia de energía. En la cocina, usamos una olla de aluminio 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?

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 de 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 más y más, aunque no está 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




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

energía cinética, en promedio, que sus vecinos más fríos, así que empujan a sus vecinos, dándoles algo de su energía. Los vecinos empujan a *sus* 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 mayor parte 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, y es por ello que 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 los metales en general 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 17.20 muestra una varilla de material conductor con área transversal $A$ y longitud $L$. El extremo izquierdo se mantiene a una temperatura $T_C$, y el derecho, a una temperatura menor $T_F$, 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 razón 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 y a la diferencia de temperatura ($T_C - T_F$), e inversamente proporcional a la longitud de la varilla $L$. Introduciendo una constante de proporcionalidad $k$ llamada **conductividad térmica** del material, tenemos

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

La cantidad $(T_C - T_F)/L$ es la diferencia de temperatura *por unidad de longitud*, llamada **gradiente de temperatura**. El valor numérico de $k$ depende del material. Los materiales con $k$ grande son buenos conductores del calor; aquellos con $k$ pequeña son malos conductores o aislantes. 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 del camino de flujo del calor.

Las unidades de corriente de calor $H$ son unidades de energía por tiempo, o sea, 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 son 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. De hecho, muchos materiales aislantes como la espuma de poliestireno y la fibra de vidrio son en su mayor parte aire muerto. La figura 17.21 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

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA\frac{dT}{dx} \tag{17.22}$$

**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 |
| *Diversos sólidos (valores representativos)* | |
| Tabique (ladrillo) aislante | 0.15 |
| Tabique (ladrillo) rojo | 0.6 |
| 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 |

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

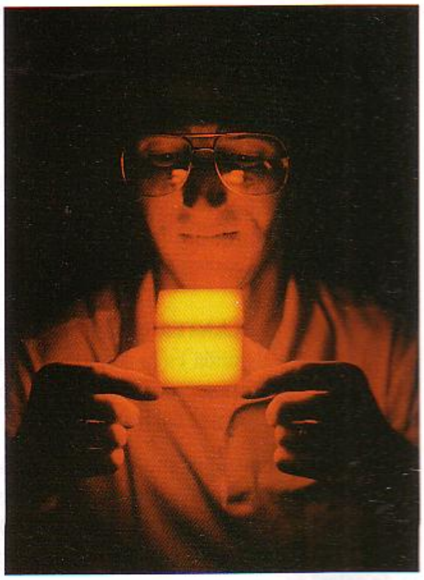
En el campo del aislamiento térmico de edificios, los ingenieros usan el concepto de **resistencia térmica**, denotada con $R$. La resistencia térmica de una placa de material con área $A$ se define de modo que la corriente de calor $H$ que atraviesa la placa es

$$H = \frac{A(T_C - T_F)}{R} \tag{17.23}$$

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

$$R = \frac{L}{k} \tag{17.24}$$

donde $L$ es el espesor de la placa. La unidad SI para $R$ es $1\ \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$. En las unidades empleadas para materiales aislantes comerciales en EE.UU., $H$ se da en Btu/h, $A$ en $\text{ft}^2$, y $T_C - T_F$ en F°. (1 Btu/h = 0.293 W.) Las unidades de $R$ son entonces $\text{ft}^2 \cdot \text{F}° \cdot \text{h/Btu}$, aunque los valores de $R$ suelen citarse sin unidades; una capa de 6 pulg de espesor de fibra de vidrio tiene un valor $R$ de 19 (o sea, $19\ \text{ft}^2 \cdot \text{F}° \cdot \text{h/Btu}$), una placa de 2 pulg de espuma de poliuretano tiene un valor de 12, etc. Al duplicarse el espesor, 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. ¿Entiende por qué? (Véase el problema 17.110.)



**17.21** Ésta placa protectora, creada 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 es tan alta que emite la luz que se observa en esta fotografía.

Estrategia para resolver problemas

## Conducción de calor

**IDENTIFICAR** *los conceptos relevantes:* 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 materiales es intermedia entre $T_C$ y $T_F$; represéntela con un símbolo como $T$. Las diferencias de temperatura para los dos materiales son entonces: $(T_C - T)$ y $(T - T_F)$. El flujo de calor en estado estable, el mismo calor debe pasar por ambos materiales en sucesión, así que la corriente de calor $H$ debe ser la *misma* en ambos materiales.
3. Si hay dos caminos para el flujo de calor *paralelos*, y fluye calor por ambos, la $H$ total es la suma de las cantidades $H_1$ y $H_2$ para los caminos 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 ambos caminos, pero $L$, $A$ y $k$ podrían ser diferentes.
4. Como siempre, es vital usar unidades consistentes. Si $k$ está expresado en W/m · K, ¡no use distancias en cm, 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

Una caja de espuma de poliuretano para mantener frías las bebidas 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 razón de flujo de calor hacia el interior si la temperatura exterior es de 30°C. ¿Cuánto hielo se derrite en un día?

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** 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.

**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 cm = 0.020 m de espesor (Figura 17.22). Obtenemos $k$ de la tabla 17.5. Por la ecuación (17.21) la corriente de calor (razón de flujo de calor) es

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

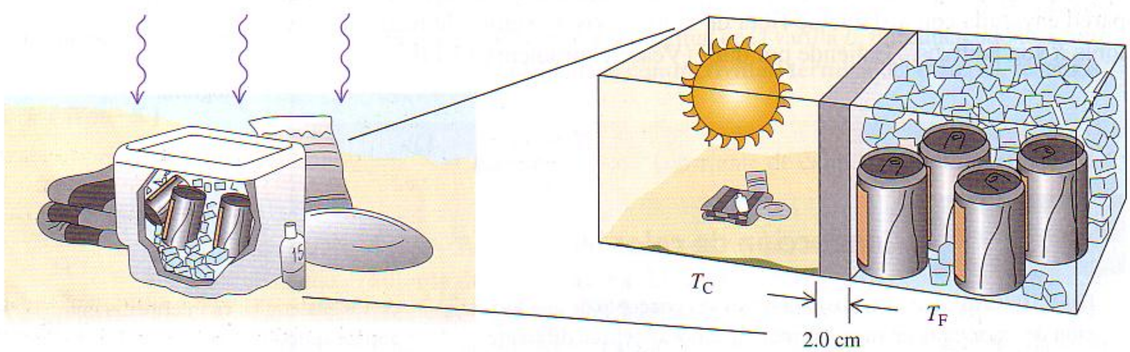
El flujo total de calor $Q$ en un día (86,400 s) es

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

El calor de fusión del hielo es de $3.34 \times 10^5$ 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 poliuretano. En 24 horas, fluye una cantidad considerable de calor, pero la cantidad de hielo que se derrite es relativamente pequeña porque el calor de fusión es elevado.



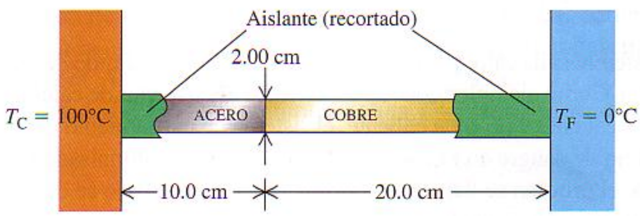

**17.22** Conducción de calor. Podemos aproximar el flujo de calor a través de las paredes de una hielera con el flujo a través de una sola plancha de espuma de poliuretano.

## Ejemplo 17.13 Conducción a través de dos barras I

Una barra de acero de 10.0 cm de longitud se suelda a tope con una de cobre de 20.0 cm de longitud (Fig. 17.23). 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 colocándolo en contacto con vapor de agua, y el de la barra de cobre se mantiene a 0°C colocándolo en contacto con hielo. Calcule la temperatura en la unión de las dos barras y la razón de flujo de calor total.

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** Como señalamos en la Estrategia para resolver problemas, las corrientes de calor en las dos barras deben ser iguales; ésta es la clave para la solución. 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.




**17.23** Flujo de calor por dos barras metálicas, una de acero y otra de cobre, conectadas a tope.

**EJECUTAR:** Igualando las dos corrientes de calor,

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

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

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

Reacomodando y despejando $T$, obtenemos

$$T = 20.7°C$$

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

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

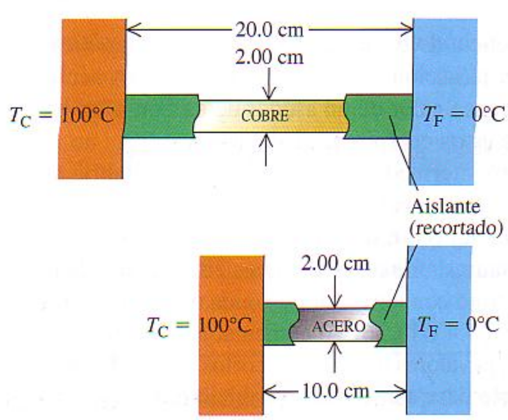
o bien

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

**EVALUAR:** Aunque la barra de acero es más corta, la caída de temperatura a través suyo (de 100°C a 20.7°C) es mucho mayor que en la barra de cobre (de 20.7°C a 0°C) 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 (Fig. 17.24). Determine la razón *total* de flujo de calor en las dos barras.




**17.24** Flujo de calor por dos barras de metal, una de acero y otra de cobre, paralelas y separadas.

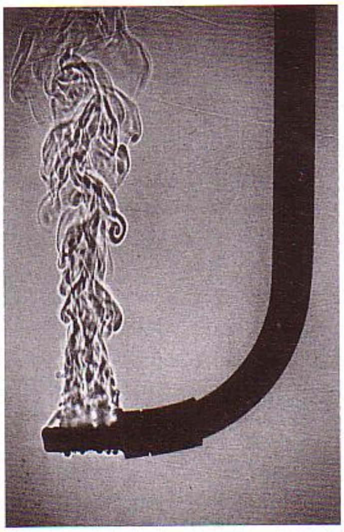
**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** 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, y para cada una, $T_C - T_F = 100°C - 0°C = 100$ K.

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

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

**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 existe el gradiente completo de 100 K en cada barra.



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

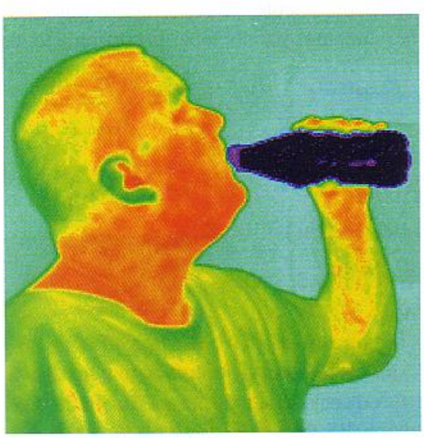
## Convección

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 coche 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* (Fig. 17.25).

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. He aquí 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 la razón 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.
3. 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 promedio del fluido.



17.26 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.

## 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 un hogar. Casi todo el calor de estos cuerpos tan calientes nos llega no por conducción ni 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 Fig. 17.4 y 17.26). Al aumentar la temperatura, las longitudes de onda se desplazan hacia valores mucho más cortos. A 800°C, un cuerpo emite suficiente radiación visible para convertirse en objeto luminoso "al rojo vivo", aunque aun a esta temperatura la mayor parte de la energía se transporta en ondas de infrarrojo. A 3,000°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 razón de radiación de energía de una superficie es proporcional a su área $A$, y aumenta rápidamente con la temperatura, según la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Kelvin). La razón 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 razón 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 $A$ con emisividad $e$ a la temperatura absoluta $T$ se puede expresar como

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

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

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

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.

## 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 800°C. Si su emisividad es de 0.60, calcule la razón total de emisión de energía por radiación.

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** Usaremos la ecuación (17.5). La incógnita es $H$, la razón de emisión de energía por radiación. Todas las demás cantidades son datos.

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

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

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

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 razones de radiación y absorción deben ser iguales. Para ello, la razón de absorción debe estar dada en general por $H = Ae\sigma T_s^4$. La razón *neta* de radiación de un cuerpo a temperatura $T$ con un entorno a temperatura $T_s$ es entonces

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

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 1.2 m$^2$ y la temperatura superficial es de 30°C = 303 K, calcule la razón total de radiación de energía del cuerpo. Si el entorno está a 20°C, calcule la razón *neta* de pérdida de calor del cuerpo por radiación. La emisividad del cuerpo es muy cercana a la unidad, sea cual sea la pigmentación de la piel.

**SOLUCIÓN**

**IDENTIFICAR Y PLANTEAR:** La razón de radiación de energía del cuerpo está dada por la ecuación (17.25); la razón 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

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

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

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

**EVALUAR:** El valor de $H_{\text{neto}}$ es positivo porque el cuerpo pierde calor a un entorno más frío.

La transferencia de calor por radiación es importante en algunos lugares sorprendentes. Un bebé prematuro en una incubadora se puede enfriar peligrosamente por radiación si 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.

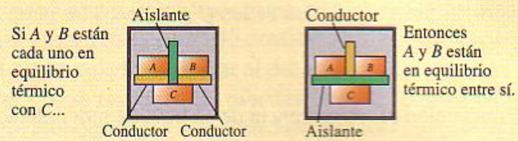
A esto se debe el recubrimiento plateado de las botellas de vacío ("Termos") inventadas por Sir James Dewar (1842-1923). Estas botellas tienen pared de vidrio doble, y se extrae el aire del espacio entre las paredes; esto elimina casi toda la transferencia de calor por conducción y convección. El plateado 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 en el mismo principio.

**Evalúe su comprensión**

El termómetro de oído de la figura 17.4 mide la radiación emitida por el tímpano. ¿En qué porcentaje aumenta la razón de radiación si la temperatura del tímpano aumenta de 37.00°C a 37.10°C?

## RESUMEN

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




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

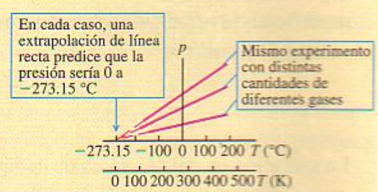
$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32° \qquad (17.1)$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32°) \qquad (17.2)$$

La escala Kelvin tiene su cero en la temperatura extrapolada de presión cero para un termómetro de gas, –273.15°C = 0 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.

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

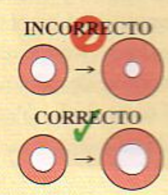
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \qquad (17.4)$$




Un cambio de temperatura $\Delta T$ causa un cambio en toda dimensión lineal $L_0$ de un cuerpo sólido. El cambio $\Delta L$ es aproximadamente proporcional a $L_0$ y $\Delta T$. Análogamente, un cambio de temperatura $\Delta T$ causa un cambio $\Delta V$ en el volumen $V_0$ de cualquièr material; líquido o sólido, el cual es aproximadamente proporcional a $V_0$ y $\Delta T$. Las cantidades $\alpha$ y $\beta$ son los coeficientes de expansión lineal y de expansión de volumen. En sólidos, $\beta = 3\alpha$. (Véanse los ejemplos 17.2 al 17.4.)

$$\Delta L = \alpha L_0 \,\Delta T \qquad (17.6)$$

$$\Delta V = \beta V_0 \,\Delta T \qquad (17.8)$$




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

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

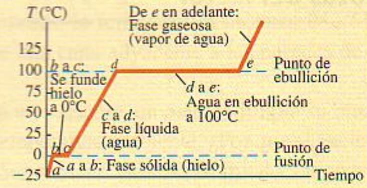
El calor es energía en tránsito de un cuerpo a otro a causa de una diferencia de temperatura. La cantidad de calor $Q$ necesaria para elevar la temperatura de una cantidad de material en una cantidad pequeña $\Delta T$ es proporcional a $\Delta T$. Esta proporcionalidad se puede expresar en términos de la masa $m$ y de la capacidad calorífica específica $c$ o en términos del número de moles y la capacidad calorífica molar $C = Mc$. Aquí, $M$ es la masa molar y $m = nM$. (Véanse los ejemplos 17.6 y 17.7.)

$$Q = mc\,\Delta T \qquad (17.13)$$

$$Q = nC\,\Delta T \qquad (17.18)$$

Para que una masa $m$ de material cambie de fase a la misma temperatura (como de líquido a vapor o de líquido a sólido) 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.

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



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.)

Conducción es transferencia de energía de movimiento molecular dentro de un material, sin movimiento de volúmenes del material. La corriente de calor $H$ en conducción depende del área $A$ por la que fluye el calor, la longitud $L$ del trayecto de flujo del calor, la diferencia de temperatura $(T_C - T_F)$ y la conductividad térmica $k$ del material. (Véanse los ejemplos 17.2 al 17.4.)

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


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 de: el área superficial, la emisividad $e$ de la superficie (un número puro adimensional entre 0 y 1) y la temperatura Kelvin $T$. También interviene una constante fundamental $\sigma$ llamada constante de Stefan-Boltzmann. Si un cuerpo a temperatura $T$ está rodeado por material a temperatura $T_s$, la corriente de calor *neta* $H_{neto}$ del cuerpo a su entorno depende tanto de $T$ como de $T_s$. (Véanse los ejemplos 17.5 y 17.16.)

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

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

## Términos clave

**aislante, 641**
**calor, 653**
**calor de combustión, 660**
**calor de fusión, 657**
**calor de vaporización, 658**
**calor específico, 654**
**caloría, 653**
**cambio de fase, 657**
**capacidad calorífica molar, 655**
**cero absoluto, 646**
**coeficiente de expansión de volumen, 648**
**coeficiente de expansión lineal, 647**
**conducción, 663**
**conductividad térmica, 664**
**conductor, 642**
**constante de Stefan-Boltzmann, 669**
**convección, 668**
**corriente de calor, 664**
**cuerpo negro, 670**
**emisividad, 668**
**equilibrio de fases, 658**
**equilibrio térmico, 641**
**escala de temperatura absoluta, 646**
**escala de temperatura Celsius, 642**
**escala de temperatura Fahrenheit, 643**
**escala de temperatura Kelvin, 644**
**esfuerzo térmico, 651**
**estados de la materia, 657**
**fase, 657**
**gradiente de temperatura, 664**
**ley cero de la termodinámica, 642**
**ley de Stefan-Boltzmann, 669**
**radiación, 668**
**resistencia térmica, 665**
**temperatura, 641**
**termodinámica, 640**
**termómetro, 641**
**unidad térmica británica, 653**

## Notas del lector

## Respuesta a la pregunta inicial del capítulo

No. "Calor" se refiere a energía en tránsito 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

**Sección 17.1** La enfermera está esperando que el termómetro y el cuerpo del paciente alcancen el equilibrio térmico. La lectura realmente indica la temperatura del termómetro; si el termómetro está en equilibrio térmico con el cuerpo, también indica la temperatura del cuerpo.

**Sección 17.2** Por la ecuación (17.1), en Venus, $T_F = \frac{9}{5}T_C + 32° = \frac{9}{5}(460°) + 32° = 860°F$. Las dos escalas coinciden cuando $T_F = T_C$; utilizando otra vez la ecuación (17.1), esto implica $T_C = \frac{9}{5}T_C + 32°$. Despejando, $\frac{4}{5}T_C = -32°$ y $T_C = \frac{5}{4}(-32°C) = -40°C$. Por lo tanto, –40°F es la misma temperatura que –40°C.

**Sección 17.3** La temperatura Kelvin de la corona es $2.0 \times 10^7 + 273.15 = 2.0 \times 10^7$ K. (Observe que la temperatura Celsius se da con sólo dos cifras significativas.) La temperatura Kelvin del punto de ebullición del helio es $-268.93 + 273.15 = 4.22$ K. La escala Kelvin es cómoda a altas temperaturas, pues la diferencia entre 0 K y 0°C es despreciable. A bajas temperaturas, el uso de la escala Kelvin da valores más pequeños y fáciles de interpretar.

**Sección 17.4** El metal 2 debe expandirse más que el metal 1 cuando se calienta, así que debe tener un mayor coeficiente de expansión lineal $\alpha$. En la tabla 17.1 vemos que dos metales con valores de $\alpha$ más grandes que el del cobre son el aluminio y el latón.

**Sección 17.5** El cambio de temperatura es $\Delta T = 70$ K, así que la cantidad requerida de calor es $Q = m_{agua}c\,\Delta T = (1.00\text{ kg})(4{,}190\text{ J/kg}\cdot\text{K})(70\text{ K}) = 2.93 \times 10^5$ J. Si el bloque cae una distancia $h$, la cantidad de energía potencial perdida será $m_{bloque}gh$, así que $h = Q/m_{bloque}g = (2.93 \times 10^5\text{ J})/(1.00\text{ kg})(9.80\text{ m/s}^2) = 2.99 \times 10^4$ m, o sea, ¡29.9 kilómetros! En vista del elevado calor específico del agua, ésta es una forma *muy poco* práctica de hacer té.

**Sección 17.6** En un tiempo $t$, el sistema va del punto $b$ al punto $e$ de la figura 17.18. Según la figura, en el tiempo $t/2$ (a la mitad de la distancia sobre el eje horizontal entre $b$ y $e$), el sistema está a 100°C y todavía está en ebullición; es decir, es una mezcla de líquido y gas. Esto implica que la mayor parte del calor añadido se invierte en evaporar el agua.

**Sección 17.7** Por la ecuación (17.25), la razón de radiación (corriente de calor) es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura Kelvin. La temperatura aumenta de $(37.00 + 273.15)\text{ K} = 310.15$ K a $(37.10 + 273.15)\text{ K} = 310.25$ K, así que la razón de radiación aumenta en un factor de $[(310.25\text{ K})/(310.15\text{ K})]^4 = 1.0013$. Por lo tanto, el aumento porcentual es del 0.13%, perfectamente detectable por un termómetro de oído.

## Preguntas para análisis

**P17.1** Si se coloca un termómetro al sol directo, ¿mide la temperatura: del aire, del Sol o de otra cosa? Explique.

**P17.2** ¿Tiene sentido decir que un cuerpo es dos veces más caliente que otro? Explique.

**P17.3** Muchos motores de coche tienen cilindros de hierro colado y pistones de aluminio. ¿Qué tipos de problemas podrían presentarse si el motor se sobrecalienta? (El coeficiente de expansión de volumen del hierro colado es similar al del acero.)

**P17.4** ¿Por qué se revientan las tuberías de agua congeladas? ¿Se rompería un termómetro de mercurio a temperaturas por debajo del punto de congelación del mercurio? ¿Por qué sí o por qué no?

**P17.5** Dos cuerpos del mismo material tienen las mismas dimensiones y aspecto exteriores, pero uno está hueco y el otro no. Si se aumenta su temperatura por igual, ¿su expansión de volumen global es la misma o distinta? ¿Por qué?

**P17.6** El interior de un horno está a 200°C. Podemos meter la mano en él sin sufrir daño, en tanto no toquemos nada. Dado que el aire dentro del horno también está a 200°C, ¿por qué no se quema la mano de todos modos?

**P17.7** Un artículo periodístico acerca del clima dice que "la temperatura de un cuerpo mide cuánto calor contiene el cuerpo". ¿Es correcta esta descripción? ¿Por qué sí o por qué no?

**P17.8** ¿Debemos agregar calor a un objeto para aumentar su temperatura? Si agregamos calor a un objeto, ¿debemos elevar su temperatura? Explique.

**P17.9** Una estudiante dijo que 1 $\text{m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{C}°$ es una unidad apropiada para capacidad calorífica específica. ¿Tiene razón? ¿Por qué sí o por qué no?

**P17.10** En algunos acondicionadores de aire caseros para climas secos, el aire se enfría soplándolo a través de un filtro saturado de agua, evaporando parte del agua. ¿Cómo enfría esto el aire? ¿Funcionaría este sistema en un clima húmedo? ¿Por qué sí o por qué no?

**P17.11** Las unidades de capacidad calorífica específica son J/kg · K, pero las de calor de fusión $L_f$ o de vaporización $L_v$ son sólo J/kg. ¿Por qué las unidades de $L_f$ y $L_v$ no incluyen el factor $\text{K}^{-1}$ para definir el cambio de temperatura?

**P17.12** Un cubo de hielo sobre una mesa permanece congelado más tiempo si se envuelve en una toalla de papel húmeda. ¿Por qué?

**P17.13** ¿Por qué se cocina la comida más rápidamente en una olla de presión que en una olla abierta con agua hirviendo?

**P17.14** Los viajeros del desierto a veces guardan agua en bolsas de lona. Algo de agua se filtra por la lona y se evapora. ¿Cómo enfría esto el agua del interior?

**P17.15** Recién que salimos de la regadera, sentimos frío, pero apenas nos secamos sentimos menos frío, aunque la temperatura del cuarto no cambió. ¿Por qué?

**P17.16** El clima de regiones adyacentes a cuerpos grandes de agua (como las costas del Pacífico o el Atlántico) suele ser más moderado que el de regiones alejadas de cuerpos grandes de agua (como las praderas). ¿Por qué?

**P17.17** ¿Por qué el agua de una bandeja de cubitos de hielo no se congela repentinamente cuando la temperatura alcanza 0°C? El agua se congela primero en una capa adyacente a las paredes de la bandeja. ¿Por qué?

**P17.18** Antes de inyectar a un paciente, un médico limpia su brazo con alcohol isopropílico a temperatura ambiente. ¿Por qué el paciente siente frío en el brazo? (*Sugerencia:* ¡*No* es por miedo a la inyección! El punto de ebullición del alcohol isopropílico es 82.4°C.)

**P17.19** Un bloque de metal frío se siente más frío que uno de madera a la misma temperatura. ¿Por qué? Un bloque de metal *caliente* se siente más caliente que uno de madera a la misma temperatura. ¿Por qué? ¿Hay alguna temperatura a la que ambos bloques se sientan igualmente calientes o fríos? ¿Cuál?

**P17.20** Una persona vierte café en una taza, pensando en beberlo 5 min después. Si desea mantener el café lo más caliente posible, ¿deberá ponerle la crema ahora o esperar hasta justo antes de beberlo? Explique.

**P17.21** Recién que sacamos una tarta de manzana del horno, la costra y el relleno están a la misma temperatura; pero, si probamos la tarta, el relleno nos quema la lengua pero la costra no. ¿A qué se debe la diferencia? (*Sugerencia:* El relleno está húmedo, la costra está seca.)

**P17.22** Se dice que las cosas se cocinan mejor (con más uniformidad y sin quemarse) en ollas de hierro colado gruesas. ¿Qué características deseables tienen tales ollas?

**P17.23** Las tierras costeras tienen mayor temperatura que el mar durante el día, pero menor durante la noche. Explique. (*Sugerencia:* La capacidad calorífica específica de la tierra es sólo de 0.2 a 0.8 veces la del agua.)

**P17.24** Es bien sabido que una papa se hornea en menos tiempo si se atraviesa con un clavo grande. ¿Por qué? ¿Sería mejor usar un clavo de aluminio? ¿Por qué sí o por qué no? (*Nota:* ¡No intente esto en un horno de microondas!) También se vende un aparato para acelerar el rostizado de carne, que consiste en un tubo metálico que contiene una mecha y un poco de agua; se dice que esto es mucho mejor que una varilla metálica sólida. ¿Cómo funciona?

**P17.25** Los pilotos de planeadores en el Medio Oeste de EE.UU. saben que son comunes las corrientes térmicas ascendentes cerca de campos recién arados. ¿Por qué?

**P17.26** Hay quienes dicen que los cubos de hielo se congelan en menos tiempo si las bandejas se llenan con agua caliente, porque ésta se enfría más rápidamente que la fría. ¿Qué opina Ud.?

**P17.27** Tenemos suerte de que la Tierra no esté en equilibrio térmico con el Sol (cuya temperatura superficial es de 5800 K). Pero, ¿por qué no lo está?

**P17.28** Cuando hay escasez de energía, algunas revistas recomiendan mantener las casas a temperatura constante día y noche para ahorrar combustible. El argumento es que, al apagar la calefacción de noche, las paredes, techos, etc., se enfrían y deberán volver a calentarse en la mañana. Así, al mantener la temperatura constante, estas partes de la casa no se enfriarán y no tendrán que volver a calentarse. ¿Tiene sentido este argumento? ¿Realmente se ahorraría energía siguiendo ese consejo?

## Ejercicios

### Sección 17.2 Termómetros y escalas de temperatura

**17.1** Convierta las siguientes temperaturas Celsius a Fahrenheit: a) –62.8°C, la temperatura más baja registrada en Norteamérica (3 de febrero de 1947, Snag, Yukón); b) 56.7°C, la temperatura más alta registrada en EE.UU. (10 de julio de 1913, Death Valley, California); c) 31.1°C, la temperatura media anual más alta del mundo (Lugh Ferrandi, Somalia).

**17.2** Calcule las temperaturas Celsius que corresponden a: a) una noche de invierno en Seattle (41.0°F); b) un caluroso día de verano en Palm Springs (107.0°F); c) un frío día de invierno en el norte de Manitoba (–18.0°F).

**17.3** Imagine que trabaja en un laboratorio de prueba de materiales y su jefe le dice que aumente la temperatura de una muestra en 40.0 C°. El único termómetro que encuentra en su mesa de trabajo está graduado en °F. Si la temperatura inicial de la muestra es de 68.2°F, ¿qué temperatura deberá tener en °F una vez que se haya efectuado el aumento pedido?

**17.4** a) El 22 de enero de 1943, la temperatura en Spearfish, Dakota del Sur, subió de –4.0°F a 45.0°F en sólo 2 minutos. Calcule el cambio de temperatura en grados Celsius. b) La temperatura en Browning, Montana, era de 44.0°F el 23 de enero de 1916. Al día siguiente la temperatura cayó a –56.0°F. Calcule el cambio en grados Celsius.

**17.5** a) Imagine que se siente mal y le dicen que tiene una temperatura de 40.2°C. ¿Qué temperatura tiene en °F? ¿Debe preocuparse? b) El informe matutino del tiempo en Sydney cita una temperatura de 12°C. ¿Cuánto es esto en °F?

**17.6** Un "blue norther" pasa por Lubbock, Texas, una tarde de septiembre y la temperatura baja 11.8 C° en una hora. Calcule el cambio de temperatura en F°.

**17.7** Dos vasos de agua, A y B, están inicialmente a la misma temperatura. La temperatura del agua del vaso A se aumenta 10 F°, y la del vaso B, 10 K. ¿Cuál vaso está ahora a mayor temperatura? Explique.

**17.8** Se coloca una botella de refresco en un refrigerador y se deja ahí hasta que su temperatura ha bajado 10.0 K. Calcule el cambio de temperatura en: a) F° y b) C°.

### Sección 17.3 Termómetros de gas y escala Kelvin

**17.9** Convierta las siguientes temperaturas récord a la escala Kelvin: a) la temperatura más baja registrada en los 48 estados contiguos de EE.UU. (–70.0°F en Rogers Pass, Montana, el 20 de enero de 1954); b) la temperatura más alta en Australia (127.0°F en Cloncurry, Queensland, el 16 de enero de 1889); c) la temperatura más baja registrada en el hemisferio norte (–90.0°F en Verkhoyansk, Siberia, en 1892).

**17.10** Convierta las siguientes temperaturas Kelvin a las escalas Celsius y Fahrenheit: a) la temperatura al medio día en la superficie de la Luna (400 K); b) la temperatura en la parte alta de las nubes de la atmósfera de Saturno (95 K); c) la temperatura en el centro del Sol ($1.55 \times 10^7$ K).

**17.11** El punto de ebullición normal del neón líquido es –245.92°C. Exprese esta temperatura en la escala Kelvin.

**17.12** La relación de las presiones de un gas en el punto de fusión del platino y en el punto triple del agua, manteniendo el volumen del gas constante, es 7.476. ¿A qué temperatura Celsius se funde el platino?

**17.13** Un termómetro de gas registró una presión absoluta correspondiente a 325 mm de mercurio, estando en contacto con agua en el punto triple. ¿Qué presión indicará en contacto con agua en el punto de ebullición normal?

**17.14** Al igual que la escala Kelvin, la *escala Rankine* es una escala absoluta de temperatura: el cero absoluto es cero grados Rankine

(0°R). Sin embargo, las unidades de esta escala tienen el mismo tamaño que las de la escala Fahrenheit, no las de la escala Celsius. Dé el valor numérico de la temperatura del punto triple del agua en la escala Rankine.

**17.15 Termómetro de gas de volumen constante.** Usando un termómetro de gas, un experimentador determinó que la presión en el punto triple del agua (0.01°C) era $4.80 \times 10^4$ Pa, y en el punto de ebullición normal del agua (100°C), $6.50 \times 10^4$ Pa. a) Suponiendo que la presión varía linealmente con la temperatura, use estos datos para calcular la temperatura Celsius en la que la presión del gas sería cero (es decir, obtenga la temperatura Celsius del cero absoluto). b) ¿El gas de este termómetro obedece con precisión la ecuación (17.4)? Si así fuera y la presión a 100°C fuera $6.50 \times 10^4$ Pa, ¿qué presión habría medido el experimentador a 0.01°C? (Como veremos en la sección 18.1, la ecuación (17.4) sólo es exacta para gases a muy baja densidad.)

## Sección 17.4 Expansión térmica

**17.16 Fricción del aire y expansión térmica.** El avión supersónico Concorde (hecho principalmente de aluminio) tiene 62.1 m de longitud en la pista en un día ordinario (15°C). Volando al doble de la rapidez del sonido, la fricción con el aire calienta la superficie del Concorde y alarga al avión 25 cm. (La cabina de pasajeros está en rodillos; el avión se expande a su alrededor.) ¿Qué temperatura tiene la superficie del Concorde en vuelo?

**17.17** El puente Humber de Inglaterra tiene el claro individual más largo del mundo (1,410 m). Calcule el cambio de longitud de la cubierta de acero del claro si la temperatura aumenta de –5.0°C a 18.0°C.

**17.18 Ajuste estrecho.** Los remaches de aluminio para construcción de aviones se fabrican un poco más grandes que sus agujeros y se enfrían con "hielo seco" ($CO_2$ sólido) antes de insertarse. Si el diámetro de un agujero es de 4.500 mm, ¿qué diámetro debe tener un remache a 23.0°C para que su diámetro sea igual al del agujero cuando se enfría a –78.0°C, la temperatura del hielo seco? Suponga que el coeficiente de expansión es constante, con el valor dado en la tabla 17.1.

**17.19** Un centavo de dólar tiene 1.9000 cm de diámetro a 20.0°C, y está hecho de una aleación (principalmente zinc) con un coeficiente de expansión lineal de $2.6 \times 10^{-5}$ $K^{-1}$. ¿Qué diámetro tendría: a) en un día caluroso en Death Valley (48.0°C)? b) ¿en una noche fría en las montañas de Groenlandia (–53.0°C)?

**17.20** La varilla del péndulo de un reloj es de latón. Calcule su cambio fraccionario de longitud si se enfría de 19.50°C a 5.00°C.

**17.21** Una varilla metálica tiene 40.125 cm de longitud a 20.0°C, y 40.148 cm a 45.0°C. Calcule el coeficiente medio de expansión lineal para la varilla en este intervalo de temperatura.

**17.22** Un cilindro de cobre está a 20.0°C. ¿A qué temperatura aumentará su volumen en un 0.150%?

**17.23** Un tanque subterráneo con capacidad de 1,700 L (1.70 $m^3$) se llena con etanol a 19.0°C. Una vez que el etanol se enfría a la temperatura del tanque y el suelo, que es 10.0°C, ¿cuánto espacio de aire habrá sobre el etanol en el tanque? (Suponga que el volumen del tanque no cambia.)

**17.24** Un tanque de acero se llena totalmente con 2.80 $m^3$ de etanol cuando ambos el tanque como el etanol están a 32.0°C. Una vez que el tanque y el contenido se hayan enfriado a 18.0°C, ¿qué volumen adicional de etanol podrá meterse en el tanque?

**17.25** Un frasco de vidrio con volumen de 1,000.00 $cm^3$ a 0.0°C se llena al tope con mercurio a esta temperatura. Si el frasco y el mercurio se calientan a 55.0°C, se derraman 8.95 $cm^3$ de mercurio. El coeficiente de expansión de volumen ($\beta$) del mercurio es de $18.0 \times 10^{-5}$ $K^{-1}$; calcule el coeficiente de expansión de volumen del vidrio.

**17.26** a) Si un área medida en la superficie de un cuerpo sólido es $A_0$ a cierta temperatura inicial y cambia en $\Delta A$ cuando la temperatura cambia en $\Delta T$, demuestre que

$$\Delta A = (2\alpha)A_0\Delta T$$

donde $\alpha$ es el coeficiente de expansión lineal. b) Una lámina circular de aluminio tiene 55.0 cm de diámetro a 15.0°C. ¿Cuánto cambia el área de una cara de la lámina cuando la temperatura aumenta a 27.5°C?

**17.27** Un operario hace un agujero de 1.350 cm de diámetro en una placa de acero a 25°C. ¿Qué área transversal tendrá el agujero: a) a 25°C; b) si la placa se calienta a 175°C? Suponga que el coeficiente de expansión lineal es constante dentro de este intervalo. (*Sugerencia:* Véase el ejercicio 17.26.)

**17.28** Imagine que acaba de comenzar a trabajar como ingeniero mecánico en Motores, S.A. y le encargaron diseñar pistones de latón que se deslizarán dentro de cilindros de acero. Los motores en los que se usarán los pistones operarán a temperaturas entre 20°C y 150°C. Suponga que los coeficientes de expansión son constantes dentro de ese intervalo de temperaturas. a) Si el pistón apenas cabe dentro del cilindro a 20°C, ¿los motores podrán operar a temperaturas más altas? Explique. b) Si los pistones cilíndricos tienen un diámetro de 25.000 cm a 20°C, ¿qué diámetro mínimo deberán tener los cilindros a esa temperatura para que los pistones operen a 150°C?

**17.29** Las marcas de una regla de aluminio y una de latón están perfectamente alineadas a 0°C. ¿Qué separación habrá entre las marcas de 20.0 cm de las dos reglas a 100°C, si se mantiene una alineación precisa de los extremos izquierdos de las reglas?

**17.30** Una varilla de latón tiene 185 cm de longitud y 1.60 cm de diámetro. ¿Qué fuerza debe aplicarse a cada extremo para impedir que se contraiga al enfriarse de 120°C a 10°C?

**17.31** a) Un alambre con longitud de 1.50 m a 20.0°C se alarga 1.9 cm al calentarse a 420°C. Calcule su coeficiente medio de expansión lineal para este intervalo de temperatura. b) El alambre se tiende sin tensión a 420°C. Calcule el esfuerzo en él si se enfría a 20°C sin permitir que se contraiga. El módulo de Young del alambre es de $2.0 \times 10^{11}$ Pa.

**17.32** Rieles de acero para un tren se tienden en segmentos de 12.0 m de longitud colocados a tope en un día de invierno en que la temperatura es de –2.0°C. a) ¿Cuánto espacio debe dejarse entre rieles adyacentes para que apenas se toquen en verano cuando la temperatura suba a 33.0°C? b) Si los rieles se tienden en contacto, ¿a qué esfuerzo se someterán un día de verano en el que la temperatura sea 33.0°C?

## Sección 17.5 Cantidad de calor

**17.33 Pérdida de calor al respirar.** Cuando hace frío, un mecanismo importante de pérdida de calor del cuerpo humano es la energía invertida en calentar el aire que entra en los pulmones al respirar. a) En un frío día de invierno cuando la temperatura es de –20°C, ¿cuánto calor se necesita para calentar a temperatura corporal (37°C) los 0.50 L de aire intercambiados con cada respiración? Suponga que la capacidad calorífica específica del aire es de 1,020 J/kg · K y que 1.0 L de aire tiene una masa de $1.3 \times 10^{-3}$ kg. b) ¿Cuánto calor se pierde por hora si se respira 20 veces por minuto?

**17.34** Al correr, un estudiante de 70 kg genera energía térmica a razón de 1,200 W. Para mantener una temperatura corporal constante de 37°C, esta energía debe eliminarse por sudor u otros mecanismos. Si tales mecanismos fallaran y no pudiera salir calor del cuerpo, ¿cuánto tiempo podría correr el estudiante antes de sufrir un daño irreversible? (Las estructuras proteínicas del cuerpo se dañan irreversiblemente a 44°C o más. La capacidad calorífica específica del cuerpo humano es de alrededor de 3,480 J/kg · K, poco menos que la del agua; la diferencia se debe a la presencia de: proteínas, grasas y minerales, cuyo calor específico es menor que el del agua.)

**17.35** Al pintar la punta de una antena de 225 m de altura, un trabajador deja caer sin querer una botella de agua de 1.00 L de su lonchera. La botella cae en unos arbustos en el suelo y no se rompe. Si una cantidad de calor igual a la magnitud del cambio de energía mecánica del agua pasa al agua, ¿cuánto aumentará su temperatura?

**17.36** Una caja con fruta, con masa de 50.0 kg y calor específico de 3,650 J/kg · K baja deslizándose por una rampa de 8.00 m de longitud inclinada 36.9° bajo la horizontal. a) Si la caja estaba en reposo arriba de la rampa y tiene una rapidez de 2.50 m/s en la base, ¿cuánto trabajo efectuó la fricción sobre ella? b) Si una cantidad de calor igual a la magnitud de dicho trabajo pasa a la fruta y ésta alcanza una temperatura final uniforme, ¿qué magnitud tiene el cambio de temperatura?

**17.37** Un ingeniero trabaja en un diseño de motor nuevo. Una de las piezas móviles contiene 1.60 kg de aluminio y 0.30 kg de hierro, y está diseñada para operar a 210°C. ¿Cuánto calor se requiere para elevar su temperatura de 20°C a 210°C?

**17.38** Un clavo que se clava en una tabla sufre un aumento de temperatura. Si suponemos que el 60% de la energía cinética de un martillo de 1.80 kg que se mueve a 7.80 m/s se transforma en calor que fluye hacia el clavo y no sale de él, ¿cuánto aumentará la temperatura de un clavo de aluminio de 8.00 g golpeado 10 veces?

**17.39** Una tetera de aluminio de 1.50 kg que contiene 1.80 kg de agua se pone en la estufa. Si no se pierde calor al entorno, ¿cuánto calor debe agregarse para elevar la temperatura de 20.0°C a 85.0°C?

**17.40** Tratando de mantenerse despierto para estudiar toda la noche, un estudiante prepara una taza de café colocando una resistencia eléctrica de inmersión de 200 W en 0.320 kg de agua. a) ¿Cuánto calor debe agregarse al agua para elevar su temperatura de 20.0°C a 80.0°C? b) ¿Cuánto tiempo se requiere? Suponga que toda la potencia se invierte en calentar el agua.

**17.41** Un técnico mide el calor específico de un líquido desconocido sumergiendo en él una resistencia eléctrica. La energía eléctrica se convierte en calor transferido al líquido durante 120 s con razón constante de 65.0 Watts. La masa del líquido es de 0.780 kg y su temperatura aumenta de 18.55°C a 22.54°C. a) Calcule el calor específico medio del líquido en este intervalo de temperatura. Suponga que la cantidad de calor que se transfiere al recipiente es despreciable y que no se transfiere calor al entorno. b) Suponga que no es posible despreciar la transferencia de calor del líquido al recipiente o al entorno en este experimento. ¿El resultado de (a) es: *mayor* o *menor* que el calor específico medio real del líquido? Explique.

**17.42** Imagine que le dan una muestra de metal y le piden determinar su calor específico. Pesa la muestra y obtiene un valor de 28.4 N. Añade con mucho cuidado $1.25 \times 10^4$ J de energía calorífica a la muestra y observa que su temperatura aumenta 18.0 C°. ¿Qué calor específico tiene la muestra?

**17.43** Se añaden 8,950 J de calor a 3.00 moles de hierro. a) Determine el aumento de temperatura del hierro. b) Si se añade la misma cantidad de calor a 3.00 kg de hierro, ¿cuánto subirá su temperatura? c) Compare los resultados de las partes (a) y (b) y explique la diferencia.

### Sección 17.6 Calorimetría y cambios de fase

**17.44** Imagine que trabaja como físico e introduce calor en una muestra sólida de 500 g a razón de 10.0 kJ/min mientras registra su temperatura en función del tiempo. La gráfica de sus datos se muestra en la figura 17.27. a) Calcule el calor latente de fusión del sólido. b) Determine los calores específicos de los estados sólido y líquido del material.

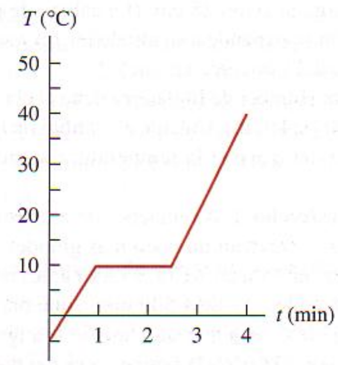



**Figura 17.27** Ejercicio 17.44.

**17.45** Un trozo de 500 g de un metal desconocido, que ha estado en agua hirviente durante varios minutos, se deja caer rápidamente en un vaso de espuma de poliestireno aislante que contiene 1.00 kg de agua a temperatura ambiente (20.0°C). Después de esperar y agitar suavemente durante 5.00 minutos, se observa que la temperatura del agua ha alcanzado un valor constante de 22.0°C. a) Suponiendo que el vaso absorbe una cantidad despreciable de calor y que no se pierde calor al entorno, ¿qué calor específico tiene el metal? b) ¿Qué es más útil para almacenar calor, este metal o un peso igual de agua? Explique. c) Suponga que el calor absorbido por el vaso no es despreciable. ¿Qué tipo de error tendría el calor específico calculado en la parte (a) (sería demasiado grande, demasiado pequeño o correcto)? Explique.

**17.46** Antes de someterse a su examen médico anual, un hombre de 70.0 kg cuya temperatura corporal es de 37°C consume una lata entera de 0.355 L de gaseosa (principalmente agua) que está a 12.0°C. a) Determine su temperatura corporal una vez alcanzado el equilibrio. Desprecie cualquier calentamiento por el metabolismo del hombre. El calor específico del cuerpo del hombre es de 3,480

J/kg • K. b) ¿El cambio en su temperatura corporal es lo bastante grande como para medirse con un termómetro médico?

**17.47** En la situación descrita en el ejercicio 17.46, el metabolismo del hombre hará que, en algún momento, la temperatura de su cuerpo (y del refresco que consumió) vuelva a 37.0°C. Si su cuerpo desprende energía a razón de $7.00 \times 10^3$ kJ/día (la *tasa metabólica basal*, TMB), ¿cuánto tardará en hacerlo? Suponga que toda la energía desprendida se invierte en elevar la temperatura.

**17.48** Una bandeja para hacer hielo con masa despreciable contiene 0.350 kg de agua a 18.0°C. ¿Cuánto calor (en: J, cal y Btu) debe extraerse para enfriar el agua a 0.0°C y congelarla?

**17.49** ¿Cuánto calor (en: J, cal y Btu) se requiere para convertir 12.0 g de hielo a –10.0°C en vapor a 100.0°C?

**17.50** Un recipiente abierto con masa despreciable contiene 0.550 kg de hielo a –15.0°C. Se aporta calor al recipiente a una razón constante de 800 J/min durante 500 min. a) ¿Después de cuántos minutos *comienza* a fundirse el hielo? b) ¿Cuántos minutos después de iniciado el calentamiento la temperatura comienza a elevarse por encima de 0°C? c) Dibuje una curva que indique horizontalmente el tiempo transcurrido y verticalmente la temperatura.

**17.51** La capacidad de los acondicionadores de aire comerciales a veces se expresa en "toneladas": las toneladas inglesas de hielo (1 ton = 2,000 lb) que la unidad puede congelar a partir de agua a 0°C en 24 h. Exprese la capacidad de un acondicionador de 1 ton en Btu/h y en Watts.

**17.52 Quemaduras de vapor vs. quemaduras de agua.** ¿Cuánto calor entra en su piel si recibe el calor liberado por: a) 25.0 g de vapor de agua que inicialmente está a 100.0°C, al enfriarse a la temperatura de la piel (34.0°C)? b) 25.0 g de agua que inicialmente está a 100.0°C al enfriarse a 34.0°C? c) ¿Qué le dice esto acerca de la severidad relativa de las quemaduras con vapor y con agua caliente?

**17.53** ¿Qué rapidez inicial debe tener una bala de plomo a 25°C para que el calor desarrollado cuando se detiene sea apenas suficiente para derretirla? Suponga que toda la energía mecánica inicial de la bala se convierte en calor y que no fluye calor de la bala a su entorno. (Un rifle ordinario tiene una rapidez de salida mayor que la rapidez del sonido en aire, que es de 347 m/s a 25°C.)

**17.54** La evaporación del sudor es un mecanismo importante para controlar la temperatura de algunos animales de sangre caliente. a) ¿Qué masa de agua debe evaporarse de la piel de un hombre de 70.0 kg para enfriar su cuerpo 1.00 C°? El calor de vaporización del agua a la temperatura corporal de 37°C es de $2.42 \times 10^6$ J/kg • K. La capacidad calorífica específica del cuerpo humano es de 3,480 J/kg • K (véase el ejercicio 17.34). b) ¿Qué volumen de agua debe beber el hombre para reponer la que evaporó? Compárelo con el volumen de una lata de gaseosa (355 $cm^3$).

**17.55 "El barco del desierto."** Los camellos necesitan muy poca agua porque pueden tolerar cambios relativamente grandes en su temperatura corporal. Mientras que las personas mantienen su temperatura corporal constante dentro de un intervalo de 1-2 C°, un camello deshidratado deja que su temperatura corporal baje a 34.0°C de noche y suba a 40.0°C de día. Para ver lo eficaz que es este mecanismo para ahorrar agua, calcule cuántos litros de agua tendría que beber un camello de 400 kg si tratara de mantener su temperatura corporal en 34.0°C mediante evaporación de sudor durante el día (12 h) en lugar de dejar que suba a 40.0°C. (La capacidad calorífica específica de un camello u otro mamífero es la de una persona representativa, 3,480 J/kg • K. El calor de vaporización del agua a 34°C es de $2.42 \times 10^6$ J/kg.)

**17.56** En un experimento de laboratorio de física, una estudiante sumergió 200 centavos (cada uno con masa de 3.00 g) en agua hirviendo. Una vez alcanzado el equilibrio térmico, ella los sacó y los puso en 0.240 kg de agua a 20°C en un recipiente aislado con masa despreciable. Calcule la temperatura final de las monedas (hechas con una aleación de zinc con capacidad calorífica de 390 J/kg • K).

**17.57** Una olla de cobre de 0.500 kg contiene 0.170 kg de agua a 20.0°C. Un bloque de hierro de 0.250 kg a 85.0°C se mete en la olla. Calcule la temperatura final, suponiendo que no se pierde calor al entorno.

**17.58** Un técnico de laboratorio pone una muestra de 0.0850 kg de un material desconocido, que está a 100.0°C, en un calorímetro cuyo recipiente, inicialmente a 19.0°C, está hecho con 0.150 kg de cobre y contiene 0.200 kg de agua. La temperatura final del calorímetro es de 26.1°C. Calcule el calor específico de la muestra.

**17.59** Un vaso aislado con masa despreciable contiene 0.250 kg de agua a 75.0°C. ¿Cuántos kilogramos de hielo a –20.0°C deben ponerse en el agua para que la temperatura final del sistema sea 30.0°C?

**17.60** Un frasquito de vidrio (capacidad calorífica = 2,800 J/kg • K) de 6.0 g que contiene una muestra de 16.0 g de una enzima con capacidad calorífica de 2,250 J/kg • K se enfría en un baño de hielo que contiene agua y 0.120 kg de hielo. ¿Cuánto hielo se derrite para enfriar la muestra de temperatura ambiente (19.5°C) a la temperatura del baño de hielo?

**17.61** Un lingote de plata de 4.00 kg se saca de un horno a 750°C y se coloca sobre un gran bloque de hielo a 0°C. Suponiendo que todo el calor cedido por la plata se usa para fundir hielo, ¿cuánto hielo se funde?

**17.62** Un calorímetro de cobre de 0.100 kg contiene 0.160 kg de agua y 0.018 kg de hielo en equilibrio térmico a presión atmosférica. Si 0.750 kg de plomo a 255°C se dejan caer en el calorímetro, ¿qué temperatura final se alcanza? Suponga que no se pierde calor al entorno.

**17.63** Un recipiente con paredes térmicamente aisladas contiene 2.40 kg de agua y 0.450 kg de hielo, todo a 0.0°C. El tubo de salida de una caldera en la que hierve agua a presión atmosférica se inserta en el agua del recipiente. ¿Cuántos gramos de vapor deben condensarse dentro del recipiente (que también está a presión atmosférica) para elevar la temperatura del sistema a 28.0°C? Desprecie el calor transferido al recipiente.

## Sección 17.7 Mecanismos de transferencia de calor

**17.64** Use la ecuación (17.21) para demostrar que las unidades SI de la conductividad térmica son: W/m • K.

**17.65** Suponga que la varilla de la figura 17.20 es de cobre, tiene 45.0 cm de longitud y área transversal de 1.25 $cm^2$. Sea $T_C$ = 100°C y $T_F$ = 0.0°C. a) Calcule el gradiente de temperatura final en estado estable a lo largo de la varilla. b) Calcule la corriente de calor en la varilla en el estado estable final. c) Calcule la temperatura final en estado estable en la varilla a 12.0 cm de su extremo izquierdo.

**17.66** Un extremo de una varilla metálica aislada se mantiene a 100°C, y el otro se mantiene a 0°C con una mezcla hielo-agua. La varilla tiene 60.0 cm de longitud y área transversal de 1.25 cm$^2$. El calor conducido por la varilla funde 8.50 g de hielo en 10.00 min. Calcule la conductividad térmica $k$ del metal.

**17.67** Un carpintero construye una pared exterior con una capa de madera ($k = 0.080$ W/m · K) de 3.0 cm de espesor afuera y una capa de espuma de poliestireno ($k = 0.010$ W/m · K) de 2.2 cm de espesor adentro. La temperatura de la superficie interior es de 19.0°C, y la exterior, −10.0°C. a) Calcule la temperatura en la unión entre la madera y la espuma de poliestireno. b) Calcule la razón de flujo de calor por m$^2$ a través de esta pared.

**17.68** Un horno de cocina eléctrico tiene un área de pared total de 1.40 m$^2$ y está aislado con una capa de fibra de vidrio de 4.0 cm de espesor. La superficie interior de la fibra de vidrio está a 175°C, y la exterior, a 35°C. La fibra tiene una conductividad térmica de 0.040 W/m · K. a) Calcule la corriente de calor en el aislante, tratándolo como una plancha con un área de 1.40 m$^2$. b) ¿Qué aporte de potencia eléctrica requiere el elemento calentador para mantener esta temperatura?

**17.69** El cielo falso de un cuarto tiene un área de 125 ft$^2$, y está aislado con un valor $R$ de 30 (ft$^2$ · F° · h/Btu). La superficie que da al cuarto se mantiene a 69°F, y la que da al desván, a 35°F. Calcule el flujo de calor (en Btu y joules) al desván a través del cielo falso en 5.0 h.

**17.70** Una varilla, larga y aislada para evitar pérdidas de calor por sus costados, está en contacto térmico perfecto con agua hirviendo (a presión atmosférica) en un extremo y con una mezcla agua-hielo en el otro (Fig. 17.28). La varilla consiste en un tramo de 1.00 m de cobre (un extremo en vapor) unido a tope con un tramo $L_2$ de acero (un extremo en hielo). Ambos tramos tienen área transversal de 4.00 cm$^2$. La temperatura en la unión cobre-acero es de 65°C una vez que se alcanza el estado estable. a) ¿Cuánto calor por segundo fluye del baño de vapor a la mezcla hielo-agua? b) ¿Qué longitud $L_2$ tiene el tramo de acero?

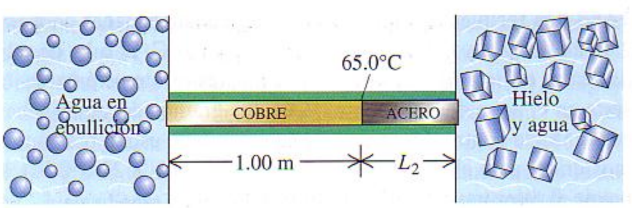



**Figura 17.28** Ejercicio 17.70.

**17.71** Una olla con base de acero de 8.50 mm de espesor y área de 0.150 m$^2$ descansa en una estufa caliente. El agua dentro de la olla está a 100°C y se evaporan 0.390 kg cada 3.00 min. Calcule la temperatura de la superficie inferior de la olla, que está en contacto con la estufa.

**17.72** Imagine que le piden diseñar una varilla cilíndrica de acero de 50.0 cm de longitud, con sección transversal circular, que conducirá 150 J/s desde un horno a 400°C a un recipiente con agua hirviente que está a una atmósfera. ¿Qué diámetro debe tener la varilla?

**17.73** Una varilla de 1.300 m de longitud consiste en un tramo de 0.800 m de aluminio unido a tope con un tramo de 0.500 m de latón. El extremo libre de la sección de aluminio se mantiene a 150°C y el extremo libre de la pieza de latón se mantiene a 20.0°C. No se pierde calor a través de los costados de las varillas. En estado estable, ¿a qué temperatura $T$ está el punto de unión de los dos metales?

**17.74** Calcule la razón de radiación de energía por unidad de área de un cuerpo negro a: a) 273 K. b) 2,730 K.

**17.75** Calcule la razón neta de pérdida de calor por radiación en el ejemplo 17.16 (sección 17.7) si la temperatura del entorno es de 5.0°C.

**17.76** La emisividad del tungsteno es de 0.35. Una esfera de tungsteno con radio de 1.50 cm se suspende dentro de una cavidad grande evacuada cuyas paredes están a 290 K. ¿Qué aporte de potencia se requiere para mantener la esfera a 3,000 K si se desprecia la conducción de calor por los soportes?

**17.77 Tamaño de un filamento de bombilla.** La temperatura de operación del filamento de tungsteno de una lámpara incandescente es de 2,450 K, y su emisividad es de 0.35. Calcule el área superficial del filamento de una lámpara de 150 W si toda la energía eléctrica consumida por la lámpara es radiada por el filamento en forma de ondas electromagnéticas. (Sólo una fracción de la radiación aparece como luz visible.)

**17.78 El tamaño de las estrellas.** La superficie caliente luminosa de las estrellas emite energía en forma de radiación electromagnética. Es una buena aproximación suponer $e = 1$ para estas superficies. Calcule los radios de las estrellas siguientes (supóngalas esféricas): a) Rigel, la estrella azul brillante de la constelación de Orión, que radia energía a razón de $2.7 \times 10^{32}$ W y tiene una temperatura superficial de 11,000 K; b) Proción B (visible sólo con un telescopio), que radia energía a razón de $2.1 \times 10^{23}$ W y tiene temperatura superficial de 10,000 K. c) Compare sus respuestas con el radio de la Tierra, el del Sol y la distancia entre la Tierra y el Sol. (Rigel es un ejemplo de estrella *supergigante*; Proción B es un ejemplo de *enana blanca*.)

## Problemas

**17.79** Imagine que propone una nueva escala de temperatura en la que las temperaturas se dan en °M. Define 0.0°M como el punto de fusión normal del mercurio, y 100.0°M, como el punto de ebullición normal del mercurio. a) Exprese el punto de ebullición normal del agua en °M. b) ¿A cuántos C° corresponde un cambio de temperatura de 10.0 M°?

**17.80** Suponga que pudiera construirse un aro de acero ajustado al ecuador terrestre a una temperatura de 20.0°C. ¿Cuánto se separaría el aro del suelo si su temperatura aumentara 0.50 C°?

**17.81** A una temperatura absoluta $T_0$, un cubo tiene lados de longitud $L_0$ y su densidad es $\rho_0$. El cubo está hecho de un material con coeficiente de expansión de volumen $\beta$. a) Demuestre que, si la temperatura aumenta a $T_0 + \Delta T$, la densidad del cubo es aproximadamente

$$\rho \approx \rho_0(1 - \beta\Delta T)$$

(*Sugerencia:* Use la expresión $(1 + x)^n \approx 1 + nx$, válida para $|x| \ll 1$.) Explique por qué este resultado aproximado sólo es válido si $\Delta T$ es mucho menor que $1/\beta$, y por qué cabe esperar que así suceda en general. b) Un cubo de cobre mide 1.25 cm por lado a 20.0°C. Calcule su cambio de volumen y densidad cuando su temperatura aumenta a 70.0°C.

**17.82** Un peso de 250 kg cuelga del techo atado con un alambre delgado de cobre. En su modo fundamental, este alambre vibra a la frecuencia del La de concierto (440 Hz). Después se incrementa la temperatura del alambre en 40 C°. a) Cuánto cambiará la frecuencia fundamental? Aumentará o disminuirá? b) Calcule el cambio porcentual de la rapidez de la onda en el alambre. c) Calcule el cambio porcentual de la longitud de la onda estacionaria fundamental en el alambre. ¿Aumentará o disminuirá?

**17.83** Imagine que está preparando un aderezo para pasta y tiene una taza medidora cilíndrica de 10.0 cm de altura hecha de vidrio ordinario ($\beta = 2.7 \times 10^{-5}$ (C°)$^{-1}$) llena con aceite de oliva ($\beta = 6.8 \times 10^{-4}$ (C°)$^{-1}$) hasta una altura 1.00 mm por debajo del borde de la taza. En un principio, la taza y el aceite están a temperatura ambiente (22.0°C). El teléfono suena y usted se olvida del aceite de oliva, que por descuido dejó calentando sobre la estufa encendida. La taza y el aceite se calientan lentamente, y tienen la misma temperatura. ¿A qué temperatura comenzará a derramarse el aceite?

**17.84** Use la figura 17.11 para hallar el coeficiente de expansión de volumen aproximado del agua a 2.0°C y a 8°C.

**17.85** Como en el problema 17.90, una varilla de acero y una de aluminio se colocan a tope entre soportes rígidos, pero ahora se ha recortado cada varilla 0.20 cm a lo largo, de modo que la de acero mide 0.348 m, la de aluminio mide 0.248 m y hay una separación de 0.40 cm entre ellas. Inicialmente, las dos varillas están a 20.0°C. Si ambas se calientan o enfrían de modo que tengan la misma temperatura final, ¿a qué temperatura se cerrará apenas el claro?

**17.86** A 20.0°C el volumen de cierto matraz de vidrio, tiene una marca de referencia en su largo cuello, marca exactamente 100 cm$^3$. El matraz se llena hasta esta marca con un líquido cuyo coeficiente de expansión de volumen ($\beta$) es de $8.00 \times 10^{-4}$ K$^{-1}$, con el líquido y el matraz a 20.0°C. Para el vidrio, $\beta = 2.00 \times 10^{-5}$ K$^{-1}$. El área transversal del cuello es de 50.0 mm$^2$ y puede considerarse constante. a) Explique por qué es una buena aproximación despreciar el cambio del área transversal del cuello. b) ¿Cuánto subirá o bajará el líquido en el cuello si aumenta la temperatura a 50.0°C?

**17.87** Una varilla metálica de 30.0 cm de longitud se expande 0.0650 cm cuando se calienta de 0°C a 100°C. Una varilla de otro metal con la misma longitud se expande 0.0350 cm con el mismo aumento de temperatura. Una tercera varilla, también de 30.0 cm, se compone de tramos de los metales anteriores unidos a tope y se expande 0.0580 cm entre 0°C y 100°C. Calcule la longitud de cada tramo de la barra compuesta.

**17.88** Una fresca (4.0°C) mañana de sábado, una piloto llena los tanques de su Pitts S-2C (un avión biplaza para acrobacias) hasta su capacidad de 106.0 L. Antes de volar el domingo por la mañana cuando la temperatura es otra vez de 4°C, la piloto revisa el nivel de combustible y encuentra sólo 103.4 L de gasolina en los tanques. Se da cuenta de que el sábado en la tarde hizo calor, y que la expansión térmica de la gasolina hizo que el combustible faltante saliera por la ventila del tanque. a) ¿Qué temperatura máxima (en °C) alcanzaron: el combustible y el tanque esa tarde? El coeficiente de expansión de volumen de la gasolina es de $9.5 \times 10^{-4}$ K$^{-1}$, y el tanque es de aluminio. b) Si quería tener el máximo de combustible disponible para su vuelo el domingo, ¿con cuántos litros debió la piloto llenar el tanque?

**17.89** a) La ecuación (17.12) da el esfuerzo requerido para mantener constante la longitud de una varilla cuando su temperatura cambia. Demuestre que, si se permite que la longitud cambie una cantidad $\Delta L$ cuando la temperatura cambia una cantidad $\Delta T$, el esfuerzo será igual a

$$\frac{F}{A} = Y\left(\frac{\Delta L}{L_0} - \alpha \Delta T\right)$$

donde $F$ es la tensión en la varilla, $L_0$ es su longitud original, $A$ es el área de la sección transversal, $\alpha$ es su coeficiente de expansión lineal y $Y$ es su módulo de Young. b) Una barra de latón gruesa tiene proyecciones en sus extremos (Fig. 17.29). Dos alambres finos de acero, tendidos entre las proyecciones, tienen cero tensión cuando el sistema está a 20°C. Calcule el esfuerzo de tensión en los alambres si el sistema se calienta a 140°C. Haga supuestas simplificaciones si es necesario, pero especifíquelas.

**Figura 17.29** Problema 17.89.

**17.90** Una varilla de acero con 0.350 m de longitud y una de aluminio con 0.250 m de longitud, ambas con el mismo diámetro, se colocan a tope entre soportes rígidos sin esfuerzo inicial en ellas. Ahora se incrementa 60.0 C° su temperatura. Calcule el esfuerzo en cada varilla. (*Sugerencia:* La longitud de la varilla combinada no cambia, pero las longitudes de las varillas individuales sí. Véase el problema 17.89.)

**17.91** Un anillo de acero con diámetro interior de 2.5000 pulg a 20.0°C se calienta y se ensambla alrededor de un eje de latón con diámetro exterior de 2.5020 pulg a 20.0°C. a) ¿A qué temperatura debe calentarse el anillo? b) Si el anillo y el eje se enfrían juntos, digamos con aire líquido, ¿a qué temperatura se saldrá el anillo del eje?

**17.92 Esfuerzo de volumen por un aumento de temperatura.** a) Demuestre que, si un objeto sometido a presión se calienta sin dejar que se expanda, el aumento de presión es

$$\Delta p = B\beta\Delta T$$

donde se supone que el módulo de volumen $B$ y el coeficiente medio de expansión de volumen $\beta$ son positivos y constantes. b) ¿Qué presión se necesita para evitar que un bloque de acero se expanda si se calienta de 20.0°C a 35.0°C?

**17.93** Un líquido se encierra en un cilindro metálico provisto de un pistón del mismo metal. El sistema está a una presión de 1.00 atm ($1.013 \times 10^5$ Pa) y a 30.0°C. Se empuja el pistón hacia abajo hasta que la presión sobre el líquido se incrementa en 50.0 atm y se fija en esta posición. Calcule la nueva temperatura a la que la presión del líquido será otra vez 1.00 atm. Suponga que el cilindro tiene resistencia suficiente para que su volumen no se altere por los cambios de presión, sólo por los de temperatura. Use el resultado del problema 17.92. (*Sugerencia:* Véase la sección 11.4.)

Compresibilidad del líquido: $k = 8.50 \times 10^{-10}\ Pa^{-1}$.

Coeficiente de expansión de volumen del líquido: $\beta = 4.80 \times 10^{-4}\ K^{-1}$.

Coeficiente de expansión de volumen del metal: $\beta = 3.90 \times 10^{-5}\ K^{-1}$.

**17.94** Un mecánico sediento enfría una botella de 2.00 L de refresco (agua en su mayor parte) virtiéndola en un tarro de aluminio grande de 0.257 kg y agregándole 0.120 kg de hielo a −15.0°C. Si el refresco y el tarro estaban a 20.0°C, ¿qué temperatura final alcanza el sistema si no se pierde calor?

**17.95 Reingreso de naves espaciales**. Una nave espacial de aluminio tiene una rapidez orbital de 7,700 m/s. a) Calcule la relación entre su energía cinética y la energía requerida para elevar su temperatura de 0°C a 600°C. (El punto de fusión del aluminio es de 660°C. Suponga una capacidad calorífica constante de 910 J/kg · K.) b) Analice la importancia de su respuesta para el problema del reingreso de una nave tripulada en la atmósfera terrestre.

**17.96** Un cabrestante es un tambor o cilindro giratorio sobre el que desliza una cuerda a fin de amplificar mucho su tensión al tiempo que se mantienen libres sus extremos (Fig. 17.30). Puesto que la tensión adicional es causada por fricción, se genera energía térmica. a) Si la diferencia de tensión entre los extremos de la cuerda es de 520 N y el cabrestante tiene 10.0 cm de diámetro y gira una vez cada 0.900 s, calcule la razón de generación de energía térmica. ¿Por qué no importa el número de vueltas? b) Si el cabrestante es de hierro y tiene una masa de 6.00 kg, ¿con qué rapidez aumenta su temperatura? Suponga que la temperatura en el cabrestante es uniforme y que toda la energía térmica generada fluye hacia él.

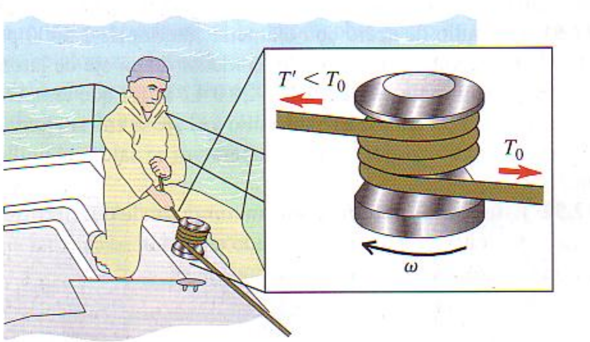



**Figura 17.30** Problema 17.96.

**17.97 Ley $T^3$ de Debye**. A temperaturas muy bajas, la capacidad calorífica molar de la sal de roca varía con la temperatura según la ley $T^3$ de Debye:

$$C = k\frac{T^3}{\Theta^3}$$

donde $k = 1{,}940$ J/mol · K y $\Theta = 281$ K. a) ¿Cuánto calor se requiere para elevar la temperatura de 1.50 mol de sal de roca de 10.0 K a 40.0 K? (*Sugerencia:* Use la ecuación (17.18) en la forma $dQ = nC\,dT$ e integre.) b) Calcule la capacidad calorífica molar media en este intervalo. c) Calcule la capacidad calorífica molar verdadera a 40.0 K.

**17.98** Una persona de 70.0 kg está sentada en una tina de 190 cm por 80 cm. Antes de entrar ella, el agua tenía 10 cm de profundidad. El agua está a 37.0°C. Suponga que el agua se enfriara espontáneamente para formar hielo a 0.0°C y que toda la energía liberada se usara para lanzar al pobre bañista verticalmente hacia arriba. ¿Qué altura alcanzaría él? (Como veremos en el capítulo 20, la conservación de la energía permite este suceso pero lo prohíbe la segunda ley de la termodinámica.)

**17.99 Aire caliente en una clase de física**. a) Un estudiante representativo que escucha atentamente una clase de física produce 100 W de calor. ¿Cuánto calor desprende un grupo de 90 estudiantes de física en un aula durante una clase de 50 min? b) Suponga que toda la energía térmica de la parte (a) se transfiere a los 3,200 $m^3$ de aire del aula. El aire tiene un calor específico de 1,020 J/kg · K y una densidad de 1.20 $kg/m^3$. Si nada de calor escapa y el sistema de aire acondicionado está apagado, ¿cuánto aumentará la temperatura del aire durante la clase? c) Si el grupo está en examen, la producción de calor por estudiante aumenta a 280 W. ¿Cuánto aumenta la temperatura en 50 min en este caso?

**17.100** La capacidad calorífica molar de cierta sustancia varía con la temperatura según la ecuación empírica:

$$C = 29.5\ \text{J/mol}\cdot\text{K} + (8.20 \times 10^{-3}\ \text{J/mol}\cdot\text{K}^2)T$$

¿Cuánto calor se necesita para calentar 3.00 mol de la sustancia de 27°C a 227°C? (*Sugerencia:* Use la ecuación (17.18) en la forma $dQ = nC\,dT$ e integre.)

**17.101** a) Un cubo de hielo de 0.075 kg se saca de un congelador, donde estaba a −10.0°C, y se pone en un vaso de agua a 0.0°C. Si no se gana ni pierde calor al entorno, ¿cuánta agua se congelará sobre el cubo? b) ¿Es posible añadir suficiente hielo al vaso para congelar toda el agua? Explique.

**17.102 Calefacción con agua caliente o con vapor**. En un sistema casero de calefacción por agua caliente se alimenta agua a 70.0°C a los radiadores, de donde sale a 28.0°C. El sistema se va a reemplazar por uno de vapor de agua en el que vapor a presión atmosférica se condensa en los radiadores, saliendo a 35.0°C. ¿Cuántos kilogramos de vapor suministrarán la misma cantidad de calor que suministraba 1.00 kg de agua caliente en el primer sistema?

**17.103** Un calorímetro de cobre de 0.446 kg contiene 0.0950 kg de hielo. El sistema está inicialmente a 0.0°C. a) Si se añade a la lata 0.0350 kg de vapor de agua a 100°C y 1.00 atm de presión, ¿qué temperatura final alcanza la lata del calorímetro y su contenido? b) A la temperatura final, ¿cuántos kilogramos habrá de hielo, cuántos de agua líquida y cuántos de vapor?

**17.104** En un recipiente de masa despreciable, se agrega 0.140 kg de hielo a −15.0°C a 0.190 kg de agua a 35.0°C. a) Si no se pierde calor al entorno, ¿qué temperatura final alcanza el sistema? b) A la temperatura final, ¿cuántos kilogramos hay de hielo y cuántos de agua líquida?

**17.105** En un recipiente de masa despreciable, se agrega 0.0400 kg de vapor de agua a 100°C a 0.200 kg de agua a 50.0°C. a) Si no se pierde calor al entorno, ¿qué temperatura final alcanza el sistema? b) A la temperatura final, ¿cuántos kilogramos hay de vapor de agua y cuántos de agua líquida?

**17.106** Un tubo conduce de un matraz donde hierve agua a presión atmosférica a un calorímetro de 0.150 kg con calor específico de

420 J/kg · K que originalmente contiene 0.340 kg de agua a 15.0°C. Se permite que se condense vapor en el calorímetro a presión atmosférica hasta que su temperatura sube a 71.0°C, después de lo cual la masa total del calorímetro y su contenido es de 0.525 kg. Calcule el calor de vaporización del agua con estos datos.

**17.107** En un recipiente con masa despreciable, se agrega 0.150 kg de hielo a 0°C y 0.0950 kg de vapor de agua a 100°C a 0.200 kg de agua a 50.0°C. a) Si no se pierde calor al entorno y la presión en el recipiente se mantiene en 1.00 atm, ¿qué temperatura final alcanza el sistema? b) A la temperatura final: ¿cuántos kilogramos hay de hielo, cuántos de agua líquida y cuántos de vapor de agua? c) Repita las partes (a) y (b) si 0.350 kg de hielo a 0°C y 0.012 kg de vapor de agua a 100°C se agregan a 0.200 kg de agua que está a 40.0°C.

**17.108** Un método experimental para medir la conductividad térmica de un material aislante es construir una caja del material y medir el aporte de potencia a un calentador eléctrico dentro de la caja que mantiene el interior a una temperatura medida por encima de la de la superficie exterior. Suponga que en un aparato así se requiere un aporte de potencia de 180 W para mantener la superficie interior de la caja 65.0 C° por encima de la temperatura de la superficie exterior. El área total de la caja es de 2.18 $m^2$, y el espesor de la pared es de 3.9 cm. Calcule la conductividad térmica del material en unidades SI.

**17.109 Efecto de una ventana en una puerta**. Un carpintero construye una puerta de madera sólida de 2.00 m $\times$ 0.95 m $\times$ 5.0 cm. Su conductividad térmica es $k = 0.120$ W/m · K. Las películas de aire en las superficies interior y exterior de la puerta tienen la misma resistencia térmica combinada que un espesor adicional de 1.8 cm de madera sólida. La temperatura interior es de 20.0°C, y la exterior, de –8.0°C. a) Calcule la razón de flujo de calor a través de la puerta. b) ¿En qué factor aumenta el flujo de calor si se inserta una ventana cuadrada de 0.50 m por lado en la puerta? El vidrio tiene un espesor de 0.45 cm y una conductividad térmica de 0.80 W/m · K. Las películas de aire junto al cristal tienen una resistencia térmica total igual a la de otros 12.0 cm de vidrio.

**17.110** Un techo de madera con resistencia térmica $R_1$ se cubre con una capa de aislante con resistencia térmica $R_2$. Demuestre que la resistencia térmica efectiva de la combinación es $R = R_1 + R_2$.

**17.111** Calcule la relación entre las razones de pérdida de calor a través de una ventana de un solo cristal con un área de 0.15 $m^2$ y a través de una ventana de doble cristal con la misma área. Cada cristal tiene un espesor de 4.2 mm, y el espacio entre los dos cristales de la ventana doble es de 7.0 mm. El vidrio tiene una conductividad térmica de 0.80 W/m · K. Las películas de aire en las superficies interior y exterior de ambas ventanas tienen una resistencia térmica combinada de 0.15 $m^2$ · K/W.

**17.112** Se sueldan varillas de: cobre, latón y acero para formar una "Y". El área transversal de cada varilla es 2.00 $cm^2$. El extremo libre de la varilla de cobre se mantiene a 100.0°C, y los de las varillas de latón y acero, a 0.0°C. Suponga que no hay pérdida de calor por los costados de las varillas, cuyas longitudes son: cobre 13.0 cm; latón 18.0 cm; acero 24.0 cm. a) ¿Qué temperatura tiene el punto de unión? b) Calcule la corriente de calor en cada una de las varillas.

**17.113 Tiempo que tarda un lago en cubrirse de hielo**. a) Cuando la temperatura del aire está por debajo de 0°C, el agua en la superficie de un lago se congela para formar una plancha de hielo. ¿Por qué no se congela todo el volumen del lago? b) Demuestre que el espesor del hielo formado en la superficie es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, si el calor de fusión del agua que se congela en la cara inferior de la capa de hielo atraviesa dicha capa por conducción. c) Suponiendo que la superficie de arriba del hielo está a –10°C y que la de abajo está a 0°C, calcule el tiempo que tardará en formarse una capa de hielo de 25 cm de espesor. d) Si el lago de la parte (c) tiene una profundidad uniforme de 40 m, ¿cuánto tardaría en congelarse totalmente? ¿Es probable que esto ocurra?

**17.114** Una varilla tiene inicialmente una temperatura uniforme de 0°C. Un extremo se mantiene a 0°C y el otro se pone en contacto con un baño de vapor a 100°C. La superficie de la varilla está aislada de modo que el calor sólo puede fluir longitudinalmente por la varilla, que tiene un área transversal es de 2.50 $cm^2$, longitud de 120 cm, conductividad térmica de 380 W/m · K, densidad de 1.00 $\times$ $10^4$ kg/$m^3$ y calor específico de 520 J/kg · K. Considere un elemento cilíndrico de la varilla de 1.00 cm de longitud. a) Si el gradiente de temperatura en el extremo más frío de este elemento es de 140°C/cm, ¿cuántos joules de energía térmica fluyen por este extremo cada segundo? b) Si la temperatura media del elemento está aumentando a razón de 0.250 C°/s, calcule el gradiente de temperatura en el otro extremo del elemento.

**17.115** Si la energía de radiación solar que incide cada segundo en la superficie congelada de un lago es de 600 W/$m^2$, y 70% de ella es absorbida por el hielo, ¿cuánto tardará en fundirse una capa de 2.50 cm de espesor? El hielo y el agua de abajo están a 0°C.

**17.116** La razón de energía radiante que llega del Sol a la atmósfera superior de la Tierra es de cerca de 1.50 kW/$m^2$. La distancia de la Tierra al Sol es de 1.50 $\times$ $10^{11}$ m, y el radio del Sol es de 6.96 $\times$ $10^8$ m. a) Calcule la radiación de energía por unidad de área de la superficie solar. b) Si el Sol radia como cuerpo negro ideal, ¿qué temperatura superficial tiene?

**17.117 Termo para helio líquido**. Un físico usa una lata cilíndrica de metal de 0.250 m de altura y 0.090 m de diámetro para guardar helio líquido a 4.22 K; a esa temperatura, el calor de vaporización del helio es de 2.09 $\times$ $10^4$ J/kg. La lata está rodeada por completo de paredes que se mantienen a la temperatura del nitrógeno líquido a 77.3 K, con un vacío entre la lata y dichas paredes. ¿Cuánto helio se pierde por hora? La emisividad de la lata metálica es de 0.200. La única transferencia de calor entre la lata y las paredes es por radiación.

**17.118 Expansión térmica de un gas ideal**. a) La presión $p$, volumen $V$, número de moles $n$ y temperatura Kelvin $T$ de un gas ideal están relacionados por la ecuación $pV = nRT$, donde $R$ es una constante. Demuestre que el coeficiente de expansión de volumen de un gas ideal es igual el recíproco de la temperatura Kelvin si la expansión es a presión constante. b) Compare los coeficientes de expansión de volumen del cobre y el aire a 20°C. Suponga que el aire puede tratarse como gas ideal y que la presión se mantiene constante.

**17.119** Un ingeniero está perfeccionando un calentador de agua eléctrico que suministra agua caliente continuamente. En la figura 17.31 se muestra un diseño de prueba. El agua fluye a razón de 0.500 kg/min, el termómetro de entrada registra 18.0°C, el voltímetro marca 120 V y el amperímetro marca 15.0 A (lo que corresponde a un aporte de potencia de entrada de (120 V)(15.0 A) = 1,800 W). a) Cuando por fin se alcanza un estado estable, ¿qué marca el termómetro de salida? b) ¿Por qué no necesitamos considerar la capacidad calorífica $mc$ del aparato en sí?

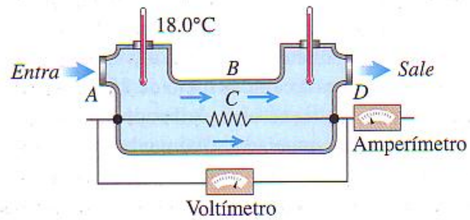



**Figura 17.31** Problema 17.119.

**17.120 Ingestión de comida de un hámster.** La producción de energía de un animal en actividad se denomina tasa metabólica basal (TMB) y es una medida de la conversión de energía de alimentos en otras formas de energía. Un calorímetro sencillo para medir la TMB consiste en una caja aislada provista de un termómetro para medir la temperatura del aire, el cual tiene una densidad de 1.20 kg/m$^3$ y una capacidad calorífica específica de 1,020 J/kg · K. Un hámster de 50.0 g se coloca en un calorímetro que contiene 0.0500 m$^3$ de aire a temperatura ambiente. a) Cuando el hámster está corriendo en una rueda, la temperatura del aire del calorímetro sube 1.60 C° cada hora. ¿Cuánto calor genera el hámster al correr 1 h? Suponga que todo este calor pasa al aire del calorímetro. Desprecie el calor que pasa a las paredes de la caja y al termómetro, y suponga que no se pierde calor al entorno. b) Suponiendo que el hámster convierte semillas en calor con una eficiencia de 10% y que las semillas tienen un valor energético de 24 J/g, ¿cuántos gramos de semillas debe comer el hámster cada hora para obtener la energía calculada en (a)?

## Problemas de desafío

**17.121** a) Un casco esférico tiene radios interior y exterior: $a$ y $b$, respectivamente, y las temperaturas en las superficies interior y exterior son $T_2$ y $T_1$, respectivamente. La conductividad térmica del material del casco es $k$. Deduzca una ecuación para la corriente total de calor a través del casco. b) Deduzca una ecuación para la variación de temperatura dentro del casco de la parte (a); es decir, calcule $T$ en función de $r$, la distancia al centro del casco. c) Un cilindro hueco tiene longitud $L$, radio interior $a$ y radio exterior $b$, y las temperaturas en las superficies interior y exterior son $T_2$ y $T_1$, respectivamente. (El cilindro podría representar una tubería de agua caliente aislada, por ejemplo.) La conductividad térmica del material del cilindro es $k$. Deduzca una ecuación para la corriente total de calor a través de las paredes del cilindro. d) Para el cilindro de la parte (c), deduzca una ecuación para la variación de temperatura dentro de las paredes del cilindro. e) Para el casco esférico de la parte (a) y el cilindro hueco de la parte (c), demuestre que la ecuación para la corriente total de calor en cada caso se reduce a la ecuación (17.21) para flujo de calor lineal cuando el casco o cilindro es muy delgado.

**17.122** Una tubería de vapor de agua de 2.00 cm de radio, que lleva vapor a 140°C, está rodeada por una camisa cilíndrica con radios interior y exterior de 2.00 cm y 4.00 cm, respectivamente, hecha con un tipo de corcho cuya conductividad térmica es de $4.00 \times 10^{-2}$ W/m · K. Ésta a su vez está rodeada por una camisa cilíndrica de espuma de poliestireno con conductividad térmica de $1.00 \times 10^{-2}$ W/m · K y radios interior y exterior de 4.00 cm y 6.00 cm, respectivamente (Fig. 17.32). La superficie exterior de la espuma de poliestireno está en contacto con aire a 15°C. Suponga que esta superficie exterior tiene una temperatura de 15°C. a) Calcule la temperatura para un radio de 4.00 cm (la unión entre las dos capas aislantes). b) Calcule la razón total de transferencia de calor hacia afuera de un tramo de 2.00 m de tubería. (*Sugerencia:* Use la expresión deducida en la parte (c) del problema de desafío 17.121.)

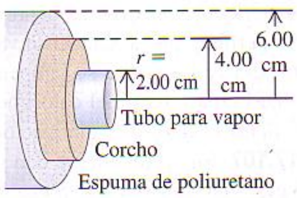



**Figura 17.32** Problema de desafío 17.122.

**17.123** Suponga que ambos extremos de la varilla de la figura 17.20 se mantienen a una temperatura de 0°C y que la distribución de temperatura inicial a lo largo de la varilla está dada por $T =$ (100°C) sen $\pi x/L$, donde $x$ se mide desde el extremo izquierdo de la varilla. Sea la varilla de cobre, con longitud $L = 0.100$ m y área de sección transversal de 1.00 cm$^2$. a) Muestre la distribución inicial de temperatura en un diagrama. b) Determine la distribución final de temperatura después de mucho tiempo. c) Dibuje curvas que, en su opinión, representen la distribución de temperatura en instantes intermedios. d) Determine el gradiente de temperatura inicial en los extremos de la varilla. e) Calcule la corriente de calor inicial desde los extremos de la varilla hacia los cuerpos que están en contacto con ellos. f) ¿Qué corriente de calor inicial hay en el centro de la varilla? Explique. ¿Qué corriente de calor hay en este punto en un instante posterior? g) ¿Qué valor tiene la *difusividad térmica* $k/\rho c$ del cobre, y en qué unidad se expresa? (Aquí, $k$ es la conductividad térmica, $\rho = 8.9 \times 10^3$ kg/m$^3$ y $c$ es la capacidad calorífica específica.) h) Determine la rapidez inicial de cambio de la temperatura en el centro de la varilla. i) ¿Cuánto tiempo tardaría el centro de la varilla en alcanzar su temperatura final si la temperatura sigue disminuyendo con esa rapidez? (Este tiempo se llama *tiempo de relajación* de la varilla.) j) Por las gráficas de la parte (c), ¿cabría esperar que la rapidez de cambio de la temperatura en el punto medio se mantenga: constante, aumente o disminuya en función del tiempo? k) Determine la rapidez inicial de cambio de la temperatura en un punto de la varilla situado a 2.5 cm de su extremo izquierdo.

**17.124 Cambio de temperatura en un reloj**. Un reloj de péndulo está diseñado para marcar un segundo en cada oscilación de lado a lado del péndulo (periodo de 2 s). a) ¿Se adelanta un reloj de péndulo cuando hace calor y se atrasa cuando hace frío, o al revés? Explique su razonamiento. b) Cierto reloj de péndulo da la hora correcta a 20.0°C. La varilla del péndulo es de acero, y su masa puede despreciarse en comparación con la masa de la pesa. Calcule el cambio fraccionario de longitud de la varilla cuando se enfría a 10.0°C. c) ¿Cuántos segundos por día se adelanta o se atrasa el reloj a 10.0°C? ¿Con qué exactitud debe controlarse la temperatura para que el reloj no se atrase ni se adelante más de 1.00 s al día? ¿La respuesta depende del periodo del péndulo?

**17.125** Un extremo de una varilla cilíndrica de cobre sólido de 0.200 m de longitud se mantiene a 20.00 K. El otro extremo se ennegrece y se expone a radiación térmica de las paredes circundantes que están a 500 K. Los costados de la varilla están aislados, de modo que sólo se gana o pierde energía por los extremos. Cuando se alcanza el equilibrio, ¿qué temperatura tiene el extremo ennegrecido? (*Sugerencia:* Puesto que el cobre es muy buen conductor del calor a bajas temperaturas, con $k = 1{,}670\ \text{W/m} \cdot \text{K}$ a 20 K, la temperatura del extremo ennegrecido es apenas un poco mayor que 20.00 K.)

**17.126 Un paseo en el Sol.** Considere una pobre alma perdida que camina a 5 km/h en un día caluroso en el desierto, vestida sólo con un traje de baño. La temperatura de la piel de esta persona tiende a aumentar por cuatro mecanismos: (i) se genera energía por reacciones metabólicas en el cuerpo a razón de 280 W, y casi toda esta energía se convierte en calor que fluye hacia la piel; (ii) se suministra calor a la piel por convección del aire exterior con una rapidez de $k'A_{\text{piel}}(T_{\text{aire}} - T_{\text{piel}})$, donde $k'$ es $54\ \text{J/h} \cdot \text{C°} \cdot \text{m}^2$, el área de piel expuesta $A_{\text{piel}}$ es de 1.5 $\text{m}^2$, la temperatura del aire $T_{\text{aire}}$ es de 47°C y la temperatura de la piel $T_{\text{piel}}$ es de 36°C; (iii) la piel absorbe energía radiante del Sol a razón de 1,400 $\text{W/m}^2$; (iv) la piel absorbe energía radiante del entorno, que tiene una temperatura de 47°C. a) Calcule la razón neta (en watts) con que estos cuatro mecanismos calientan la piel de la persona. Suponga que la emisividad de la piel es $e = 1$ y que su temperatura inicial es 36°C. ¿Qué mecanismo es el más importante? b) ¿Con qué rapidez (en L/h) debe evaporarse sudor de la piel de esta persona para mantener una temperatura constante en la piel? (El calor de vaporización del agua a 36°C es de $2.42 \times 10^6\ \text{J/kg} \cdot \text{K}$.) c) Suponga ahora que la persona está protegida por ropa clara ($e \approx 0$) de modo que el área de piel expuesta es de sólo 0.45 $\text{m}^2$. ¿Qué razón de transpiración se requiere ahora? Comente la utilidad de la vestimenta tradicional de las gentes del desierto.