17 TEMPERATURA Y CALOR

METAS DE APRENDIZAJE

Al estudiar este capítulo, usted aprenderá:

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

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

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

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

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

17.1 Temperatura y equilibrio térmico

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

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

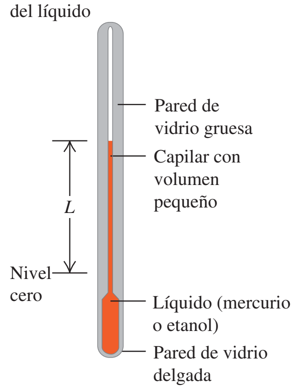
Para usar la temperatura como medida de calidez o de frialdad, necesitamos construir una escala de temperatura. Para ello, podemos usar cualquier propiedad medible de un sistema que varíe con su “calidez” o “frialdad”. La figura 17.1a muestra un sistema común para medir la temperatura. Cuando el sistema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

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

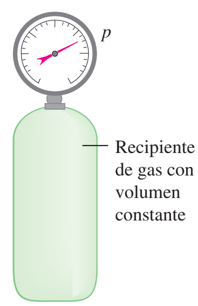
Si dos sistemas están separados por un material **aislante**, como madera, espuma de plástico o fibra de vidrio, se afectan mutuamente con más lentitud. Las hieleras portátiles se fabrican con materiales aislantes para retardar el calentamiento del hielo y de la comida fría en su interior, que tratan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

17.1 Dos dispositivos para medir la temperatura.

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



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



Ley cero de la termodinámica

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

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

17.2 Ley cero de la termodinámica.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

17.2 Termómetros y escalas de temperatura

Para que el dispositivo de líquido en un tubo de la figura 17.1a sea un termómetro útil, necesitamos marcar una escala numerada en la pared del tubo. Esos números son arbitrarios, e históricamente se han usado muchos esquemas diferentes. Suponga que marcamos con “0” el nivel del líquido del termómetro a la temperatura de congelación del agua pura, y con “100” el nivel a la temperatura de ebullición, y luego dividimos la distancia entre ambos puntos en cien intervalos iguales llamados *grados*. El resultado es la **escala de temperatura Celsius** (antes llamada *centígrada*). La temperatura en la escala Celsius para un estado más frío que el agua al momento de congelarse es un número negativo. La escala Celsius se usa, tanto en la vida cotidiana como en la ciencia y la industria, en casi todo el mundo.

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

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

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

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

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

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

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

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

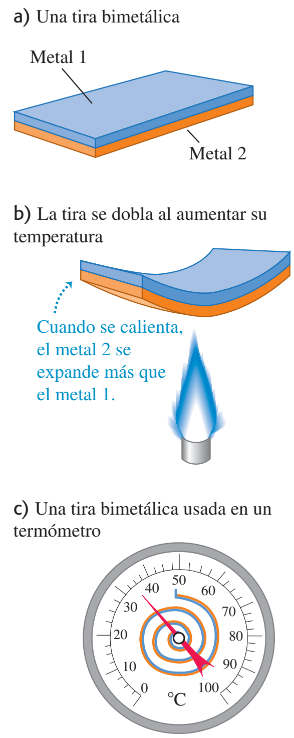
Es decir, restamos 32° para obtener el número de grados Fahrenheit arriba de la temperatura de congelación y luego multiplicamos por $\frac{5}{9}$ para obtener el número de grados Celsius, esto es, la temperatura Celsius.

No recomendamos memorizar las ecuaciones (17.1) y (17.2). En vez de ello, trate de entender el razonamiento que condujo a ellas para deducirlas cuando las necesite, verificando su razonamiento con la relación 100 °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 (veinte grados Celsius), y un *intervalo* de temperatura de 10° se escribe 10 C° (diez grados Celsius). Un vaso de agua que se calienta de 20 °C a 30 °C tiene un cambio de temperatura de 10 C°.

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

17.3 Uso de una tira bimetálica como termómetro.



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

17.3 Termómetros de gas y la escala Kelvin

Cuando calibramos dos termómetros, como un sistema de líquido en tubo o un termómetro de resistencia, de modo que coincidan en 0 °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 de temperatura que *no* dependa de las propiedades de un material específico. Para establecer una escala en verdad independiente del material, necesitamos desarrollar algunos principios de termodinámica. Volveremos a este problema fundamental en el capítulo 20. Aquí veremos un termómetro que se acerca al ideal, el *termómetro de gas*.

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

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

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

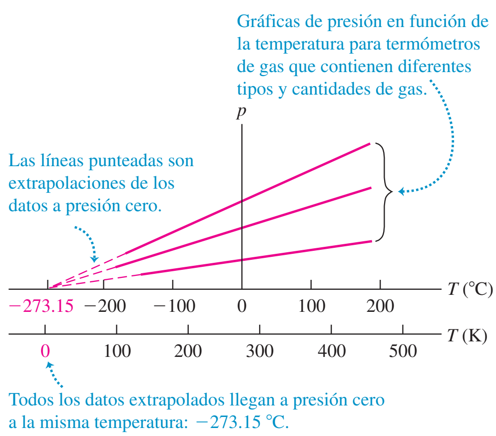
$$T_K = T_C + 273.15 \tag{17.3}$$

Esta escala se muestra en la figura 17.5b. Una temperatura ambiente común, 20 °C (= 68 °F), es 20 + 273.15 o aproximadamente 293 K.

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

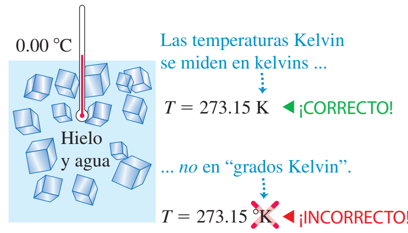
a) Termómetro de gas con volumen constante

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



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

17.6 Usos correcto e incorrecto de la escala Kelvin.



Ejemplo 17.1 Temperatura corporal

Imagine que coloca un trozo de hielo en la boca. En algún momento, toda el agua pasa de hielo a $T_1 = 32.00$ °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: Nuestras incógnitas son las temperaturas T_1 y T_2 expresadas en grados Celsius y en kelvins, así como la diferencia entre estas dos temperaturas.

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

EJECUTAR: Primero calculamos las temperaturas Celsius. Sabemos que $T_1 = 32.00$ °F $= 0.00$ °C, y 98.60 °F es $98.60 - 32.00 = 66.60$ °F por arriba de la temperatura de congelación; multiplicamos esto por (5 °C/9 °F) para obtener 37.00 °C por arriba de la temperatura de congelación, es decir, $T_2 = 37.00$ °C.

Para obtener las temperaturas Kelvin, sumamos 273.15 a cada una de 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 las escalas Celsius y Kelvin, pero no en la escala Fahrenheit.

La escala Kelvin y temperatura absoluta

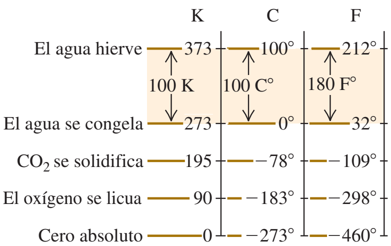
La escala Celsius tiene dos puntos fijos, los puntos de congelación y ebullición normales del agua. No obstante, podemos definir la escala Kelvin usando un termómetro de gas con sólo una temperatura de referencia. Definimos el cociente de cualesquiera dos temperaturas T_1 y T_2 en la escala Kelvin, como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

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

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

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

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



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

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

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

17.4 Expansión térmica

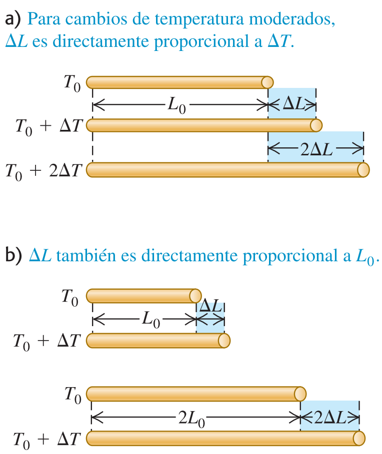
Casi todos los materiales se expanden al aumentar su temperatura. El aumento en la temperatura hace que el líquido se expanda en los termómetros de líquido en un tubo (figura 17.1a) y que las tiras bimetálicas se doblen (figura 17.3b). Las cubiertas de puentes necesitan articulaciones y soportes especiales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

Expansión lineal

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

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

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



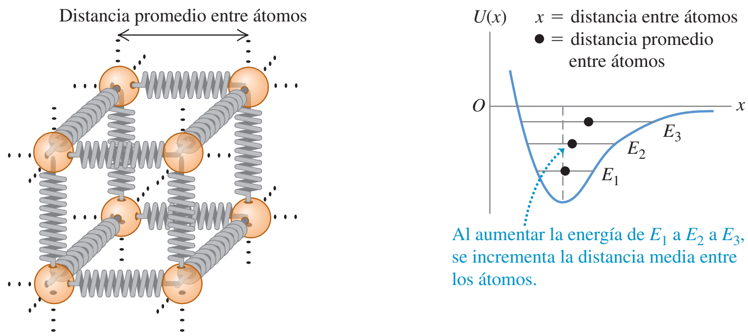
Si un cuerpo tiene longitud L_0 a la temperatura T_0, su longitud L a la temperatura $T = T_0 + \Delta T$ es

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

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

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

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

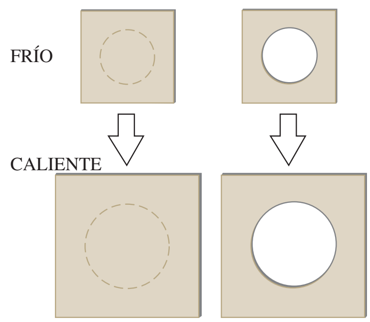


17.9 a) Podemos modelar los átomos en un sólido como si estuvieran unidos por “resortes”, que son más fáciles de estirar que de comprimir. b) La curva de la energía potencial de “resorte” $U(x)$ contra distancia x entre átomos vecinos *no* es simétrica (compare con la figura 13.20b). Al aumentar la energía,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

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

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

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



Una placa se expande al calentarse . . .

. . . de manera que un agujero cortado en la placa también.

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

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

Expansión de volumen

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

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

Tabla 17.1 Coeficientes de expansión lineal

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

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

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

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

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

$$dL = \alpha L_0\,dT$$

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

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

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

$$\beta = 3\alpha \tag{17.9}$$

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

Tabla 17.2 Coeficientes de expansión de volumen

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

Estrategia para resolver problemas 17.1 Expansión térmica

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

PLANTEAR *el problema* siguiendo estos pasos:

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

EJECUTAR *la solución* como sigue:

1. Despeje las incógnitas. Muchas veces se dan dos temperaturas y hay que calcular ΔT; o se da una temperatura inicial T_0 y hay que determinar la temperatura final que corresponde a un cambio de volumen o longitud dado. En este caso, obtenga ΔT primero; así, la temperatura final será $T_0 + \Delta T$.
2. La consistencia de unidades es crucial, como siempre. L_0 y ΔL (o bien, V_0 y ΔV) deben tener las mismas unidades, y si usa un valor de α o de β en K^{-1} o de $(C°)^{-1}$, ΔT debe estar en kelvins o grados Celsius (C°). Pero se pueden 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 una temperatura de 20 °C. ¿Qué longitud tiene en un día caluroso de verano en el que la temperatura es de 35 °C?

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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 ΔL. Observe también que ΔL es proporcional a la longitud inicial L_0: una cinta de 50 m se expandiría 9 mm; y una de 0.50 m (50 cm) tan sólo se expandiría 0.090 mm.

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

Ejemplo 17.3 Cambio de longitud por cambio de temperatura II

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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

Ejemplo 17.4 Cambio de volumen por cambio de temperatura

Un frasco de vidrio con volumen de 200 cm^3 se llena hasta el borde con mercurio a 20 °C. ¿Cuánto mercurio se desbordará si la temperatura del sistema se eleva a 100 °C? El coeficiente de expansión lineal del vidrio es de $0.40 \times 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$.

SOLUCIÓN

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

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

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

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

continúa

El aumento de volumen del frasco de vidrio es

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

El aumento de volumen del mercurio es

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

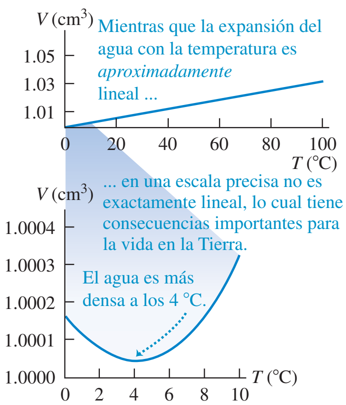
El volumen de mercurio que se desborda es

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

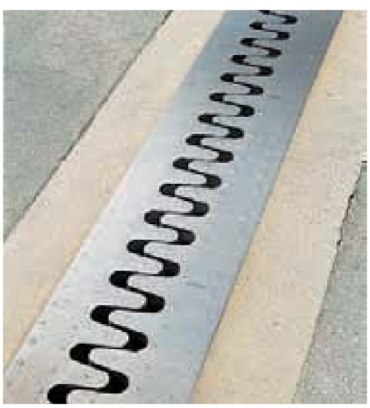
EVALUAR: Básicamente, así es como funciona un termómetro de mercurio en vidrio, excepto que, en vez de dejar que el mercurio se derrame, se deja que suba dentro de un tubo sellado al aumentar T.

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

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



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



Expansión térmica del agua

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

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

Esfuerzo térmico

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

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

Para calcular los esfuerzos térmicos en una varilla sujeta, calculamos qué tanto se *expandiría* (o contraería) si no estuviera sujeta, y luego calculamos el esfuerzo necesario para comprimirla (o estirarla) a su longitud original. Suponga que una varilla de longitud L_0 y área transversal A se mantiene con longitud constante, mientras se reduce la temperatura (ΔT negativo), causando un esfuerzo de tensión. El cambio 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 ΔL como ΔT 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),

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

Si la longitud tiene que 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 de la varilla:

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

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

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

Ejemplo 17.5 Esfuerzo térmico

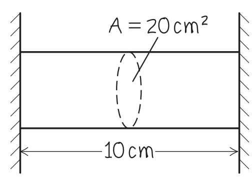
Un cilindro de aluminio de 10 cm de longitud, con área transversal de 20 cm^2, se usará como espaciador entre dos paredes de acero. A 17.2 °C, el cilindro apenas se desliza entre las paredes. Si se calienta a 22.3 °C, ¿qué esfuerzo habrá en el cilindro y qué fuerza total ejercerá éste sobre cada pared, suponiendo que las paredes son perfectamente rígidas y están separadas por una distancia constante?

SOLUCIÓN

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

PLANTEAR: La figura 17.14 muestra un diagrama de la situación. Usaremos la ecuación (17.12) para relacionar el esfuerzo con el cambio de temperatura. Los valores necesarios para el módulo de Young Y y el coeficiente de expansión lineal α son los del aluminio, el material de que está hecho el cilindro. Obtendremos esos valores de las tablas 11.1 y 17.1, respectivamente.

17.14 Nuestro diagrama de este problema.



continúa

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

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

El signo negativo indica que se requiere un esfuerzo de compresión, no de tensión, para mantener constante la longitud del cilindro. Este esfuerzo es independiente de la longitud y del área de sección transversal del cilindro. La fuerza total F es el área transversal multiplicada por el esfuerzo:

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

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

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

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

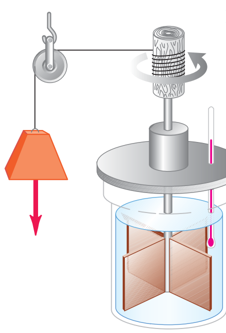
17.5 Cantidad de calor

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

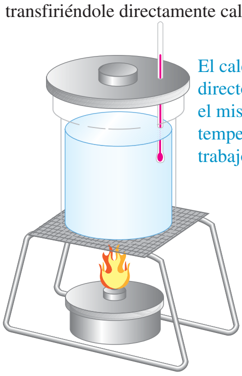
Durante los siglos XVIII y XIX, se fue entendiendo poco a poco la relación entre el calor y las otras formas de energía. Sir James Joule (1818-1889) estudió cómo puede calentarse el agua por agitamiento vigoroso con una rueda de paletas (figura 17.15a), la cual agrega energía al agua realizando un *trabajo*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

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

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



b) Incremento de la temperatura del agua transfiriéndole directamente calor



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

Podemos definir una *unidad* de cantidad de calor con base en el cambio de temperatura de un material específico. La **caloría** (abreviada cal) se define como *la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5 °C a 15.5 °C*. También se usa la kilocaloría (kcal), igual a 1000 cal; las calorías de valor alimentario son en realidad kilocalorías (figura 17.16). Una unidad correspondiente de calor que usa grados Fahrenheit y unidades inglesas es la **unidad térmica británica** o Btu. Una Btu es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra (peso) de agua 1 F°, de 63 °F a 64 °F.

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

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

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

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

Calor específico

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

Juntando todas estas relaciones, tenemos

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

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

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

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

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

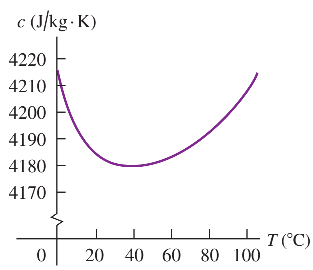
CUIDADO **La definición de calor** Recuerde que dQ no representa un cambio en la cantidad de calor *contenida* en un cuerpo; tal concepto carece de sentido. El calor siempre es *transferencia* de energía a causa de una diferencia de temperatura. No existe "la cantidad de calor de un cuerpo".

El calor específico del agua es aproximadamente

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

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

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



Ejemplo 17.6 Comer con resfriado, ayunar con fiebre

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

SOLUCIÓN

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

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

EJECUTAR: Por la ecuación (17.13),

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

EVALUAR: Esto corresponde a 160 kcal, o 160 calorías de los alimentos. (De hecho, el calor específico del cuerpo humano es de cerca de 3480 $\mathrm{J/kg \cdot K}$, alrededor de 83% del agua. La diferencia se debe a la presencia de proteínas, grasa y minerales, que tienen menor calor específico. Con este valor de c, el calor requerido es $5.6 \times 10^5\ \mathrm{J} = 133$ 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 $\mathrm{J/kg \cdot K}$.

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

Capacidad calorífica molar

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

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

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):

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

Por ejemplo, la capacidad calorífica molar del agua es

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

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

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

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

La última columna de la tabla 17.3 muestra algo interesante. Las capacidades caloríficas molares de la mayoría de los sólidos elementales son casi iguales, alrededor de 25 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

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

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

Sustancia	Calor específico, (J/kg · K)	Masa molar, (kg/mol)	Capacidad calorífica molar (J/mol · K)
Aluminio	910	0.0270	24.6
Berilio	1970	0.00901	17.7
Cobre	390	0.0635	24.8
Etanol	2428	0.0461	111.9
Etilenglicol	2386	0.0620	148.0
Hielo (cerca de 0 °C)	2100	0.0180	37.8
Hierro	470	0.0559	26.3
Plomo	130	0.207	26.9
Mármol ($CaCO_3$)	879	0.100	87.9
Mercurio	138	0.201	27.7
Sal (NaCl)	879	0.0585	51.4
Plata	234	0.108	25.3
Agua (líquida)	4190	0.0180	75.4

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

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

17.6 Calorimetría y cambios de fase

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

Cambios de fase

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

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

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

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

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

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

$$Q = mL_f$$

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

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

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

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

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

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

Es decir, necesitamos 2.256×10^6 J para convertir 1 kg de agua líquida a 100 °C en 1 kg de vapor de agua a 100 °C. En contraste, para elevar la temperatura de 1 kg de agua de 0 °C a 100 °C se requieren $Q = mc\,\Delta T = (1.00 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{C°}) \times (100 \text{ C°}) = 4.19 \times 10^5$ 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 promedio es menor. El calor de vaporización es un poco más alto a esta presión reducida: aproximadamente 2.27×10^6 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 pocos *elementos* tienen temperaturas de fusión cercanas a la temperatura ambiente; uno de ellos es el metal galio (figura 17.20).

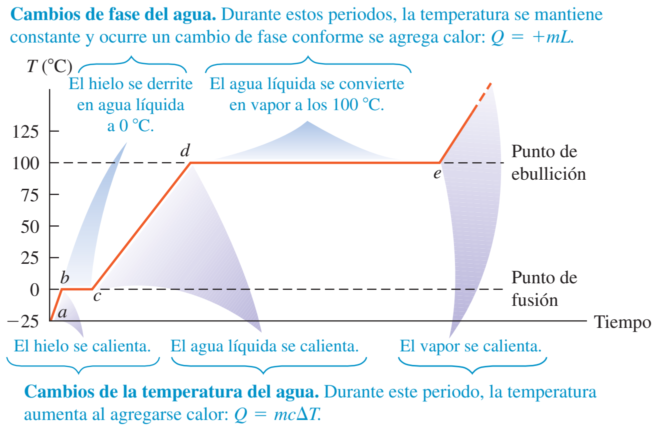
17.20 El metal galio, que vemos aquí fundiéndose en la mano de una persona, es uno de los pocos elementos que se funden cerca de la temperatura ambiente. Su temperatura de fusión es de 29.8 °C y su calor de fusión es de 8.04×10^4 J/kg.

Tabla 17.4 Calores de fusión y de vaporización

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

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

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



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

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

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

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

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

Los mecanismos de control de temperatura de muchos animales de sangre caliente aprovechan el calor de vaporización: eliminan calor del cuerpo usándolo para evaporar agua de la lengua (jadeo), o de la piel (sudor). El enfriamiento por evaporación permite al ser humano mantener su temperatura corporal normal en climas desérticos, donde la temperatura del aire puede alcanzar los 55 °C (aprox. 130 °F). La temperatura de la piel puede ser hasta 30 °C menor que la del aire circundante. En estas condiciones, una persona llega a sudar varios litros al día, y debe reponer esta agua. Las "ratas de desierto" experimentadas (como uno de los autores) aseguran que, en el desierto, ¡una cantimplora de menos de un galón es sólo un juguete! El enfriamiento por evaporación también explica por qué sentimos frío al salir de una alberca (figura 17.22).

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

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

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

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

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

Cálculos de calor

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

Estrategia para resolver problemas 17.2 Problemas de calorimetría

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

PLANTEAR *el problema* siguiendo estos pasos:

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

EJECUTAR *la solución como sigue:*

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

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

Ejemplo 17.8 Cambio de temperatura sin cambio de fase

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

SOLUCIÓN

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

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

continúa

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

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

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

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

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

$$Q_{\text{café}} + Q_{\text{aluminio}} = 0 \qquad \text{o bien,}$$

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

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 el valor $T = 66.0\ °\text{C}$ 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 tanto de temperatura como de fase

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

De la tabla 17.3, el calor específico del hielo (distinto al del agua líquida) es 2.1×10^3 J/kg · K. Sea la masa de hielo m_{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_{hielo}, obtenemos $m_{\text{hielo}} = 0.069$ kg $= 69$ g.

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

Ejemplo 17.10 ¿Qué cocina?

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

Despejando T obtenemos $T = 106$ °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 intentamos la segunda posibilidad, de que la temperatura final sea 100 °C, tendremos que calcular la fracción de agua que se evapora. Sea x dicha fracción. La cantidad de calor (positiva) necesaria para vaporizar esta agua es $(xm_{\text{agua}})L_v$. Si hacemos a la temperatura final $T = 100$ °C, tenemos

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

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

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

Esto es razonable, y concluimos que la temperatura final del agua y el cobre es 100 °C. De los 0.10 kg de agua original, 0.034(0.10 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 sería mayor que 100 °C. ¿Puede demostrar que esto es lo que habría sucedido si originalmente hubiéramos vertido menos de 15 g de agua a 25 °C en la olla?

Ejemplo 17.11 Combustión, cambio de temperatura y cambio de fase

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

Para hervir 0.25 kg de agua a 100 °C necesitamos

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

La energía total requerida es la suma 8.99×10^5 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, 1 gramo de gasolina libera 46,000 J, así que la masa de gasolina requerida es

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

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

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

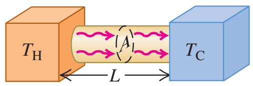
Evalúe su comprensión de la sección 17.6 Si tomamos un bloque de hielo a 0 °C y le añadimos calor a ritmo constante, después de un tiempo t todo el hielo se habrá convertido en vapor de agua a 100 °C. ¿Qué tendrá al tiempo $t/2$? i) sólo hielo a 0 °C; ii) una mezcla de hielo y agua a 0 °C; iii) agua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

17.7 Mecanismos de transferencia de calor

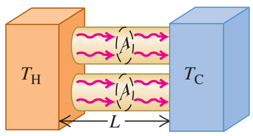
Hemos hablado de: *conductores* y *aislantes* que son, respectivamente, los materiales que permiten o impiden la transferencia de calor entre cuerpos. Veamos ahora más a fondo las *tasas* de transferencia de energía. En la cocina, usamos una olla de metal o vidrio para tener buena transferencia de calor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

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

a) Corriente de calor H.



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



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

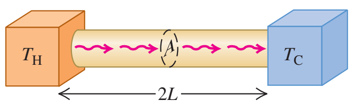


Tabla 17.5 Conductividades térmicas

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

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

Conducción

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

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

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

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

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

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

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

La conductividad térmica del aire "muerto" (inmóvil) es muy baja. Un suéter de lana nos mantiene calientes porque atrapa aire entre las fibras. En realidad, muchos materiales aislantes como la espuma de poliestireno y la fibra de vidrio son en su mayoría aire muerto. La figura 17.24 muestra un material cerámico con propiedades térmicas muy poco comunes, entre ellas una conductividad muy baja.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Estrategia para resolver problemas 17.3 Conducción de calor

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

PLANTEAR *el problema* siguiendo estos pasos:

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

EJECUTAR *la solución* como sigue:

1. Si fluye calor a través de un solo objeto, despeje la incógnita de la ecuación (17.21).
2. En algunos problemas, el calor fluye por dos materiales distintos en sucesión. En tal caso, la temperatura en la interfaz de los materiales es intermedia entre T_H y T_C; represéntela con un símbolo como T. Las diferencias de temperatura para los dos materiales son, entonces: $(T_H - T)$ y $(T - T_C)$. En estado estacionario el flujo de calor debe ser el mismo que pasa por ambos materiales en sucesión, así que la corriente de calor H debe ser *la misma* en ambos materiales.
3. Si hay dos trayectorias para el flujo de calor *paralelas*, y fluye calor por ambas, la H total es la suma de las cantidades H_1 y H_2 para las trayectorias individuales. Un ejemplo es el flujo de calor que sale de una casa, tanto por el cristal de una ventana como por su marco. En este caso, la diferencia de temperatura es la misma para ambas trayectorias, pero L, A y k podrían ser diferentes.
4. Como siempre, es vital usar unidades consistentes. Si k está expresado en $\mathrm{W/m \cdot K}$, ¡no use distancias en centímetros, calor en calorías ni T en grados Fahrenheit!

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

Ejemplo 17.12 Conducción a través de una hielera portátil

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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

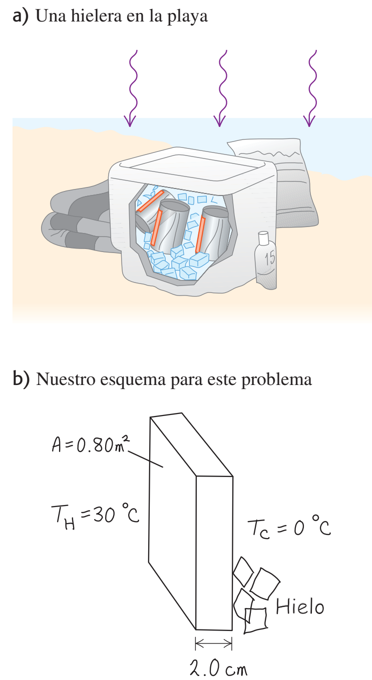
$$Q = Ht = (12\ \text{J/s})(86{,}400\ \text{s}) = 1.04 \times 10^6\ \text{J}$$

El calor de fusión del hielo es de 3.34×10^5 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 poliestireno. En 24 horas, fluye una cantidad considerable de calor, aunque la cantidad de hielo que se derrite es relativamente pequeña, ya que el calor de fusión es elevado.

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



Ejemplo 17.13 Conducción a través de dos barras I

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

SOLUCIÓN

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

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

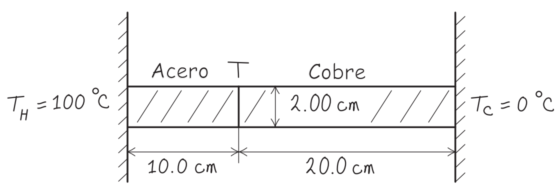
EJECUTAR: Igualando las dos corrientes de calor,

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

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

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

17.26 Nuestro esquema para este problema.



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:

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

o

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

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

Ejemplo 17.14 Conducción a través de dos barras II

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

SOLUCIÓN

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

PLANTEAR: La figura 17.27 muestra la situación. Para cada barra, $T_H - T_C = 100\ °C - 0\ °C = 100\ K$.

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

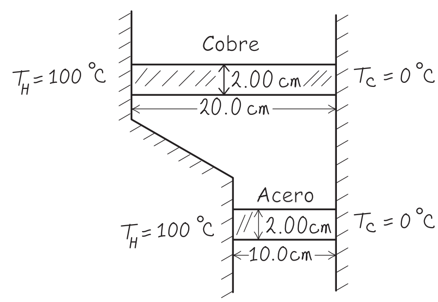
$$H = H_{acero} + H_{cobre} = \frac{k_{acero}A(T_H - T_C)}{L_{acero}} + \frac{k_{cobre}A(T_H - T_C)}{L_{cobre}}$$

$$= \frac{(50.2\ W/m \cdot K)(0.0200\ m)^2(100\ K)}{0.100\ m} + \frac{(385\ W/m \cdot K)(0.0200\ m)^2(100\ K)}{0.200\ m}$$

$$= 20.1\ W + 77.0\ W = 97.1\ W$$

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

17.27 Nuestro esquema de este problema.



Convección

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

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

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

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

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

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

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 cuerpo principal del fluido.

Radiación

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

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

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

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

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

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

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

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 una temperatura de 800 °C. Si su emisividad es de 0.60, calcule la tasa total de emisión de energía por radiación.

SOLUCIÓN

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

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

EJECUTAR: El área superficial total, incluidos ambos lados, es de $2(0.10\ \mathrm{m})^2 = 0.020\ \mathrm{m}^2$. Debemos convertir la temperatura a la escala Kelvin; 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 ésta radia.

Radiación y absorción

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

$$H_{net} = Ae\sigma T^4 - Ae\sigma T_s^4 = Ae\sigma\left(T^4 - T_s^4\right) \tag{17.26}$$

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

Ejemplo 17.16 Radiación del cuerpo humano

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

SOLUCIÓN

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

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

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

$$\begin{aligned} H &= Ae\sigma T^4 \\ &= (1.20\ \text{m}^2)(1)(5.67\times10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4)(303\ \text{K})^4 \\ &= 574\ \text{W} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} H_{net} &= Ae\sigma\left(T^4 - T_s^{\,4}\right) \\ &= (1.20\ \text{m}^2)(1)(5.67\times10^{-8}\ \text{W/m}^2\cdot\text{K}^4) \\ &\quad\times\left[(303\ \text{K})^4 - (293\ \text{K})^4\right] = 72\ \text{W} \end{aligned}$$

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

Aplicaciones de la radiación

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

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

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

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

CAPÍTULO 17 RESUMEN

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

Las escalas de temperatura Celsius y Fahrenheit se basan en las temperaturas de congelación (0 °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.)

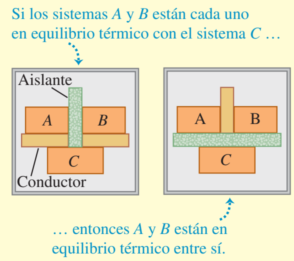
La escala Kelvin tiene su cero en la temperatura extrapolada de presión cero para un termómetro de gas, $-273.15\ °\mathrm{C} = 0\ \mathrm{K}$. En la escala de un termómetro de gas, el cociente de dos temperaturas T_1 y T_2 es igual por definición al cociente de las dos presiones correspondientes del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

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

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

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

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



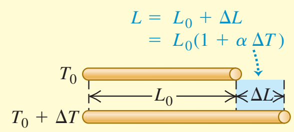
Expansión térmica y esfuerzo térmico: Un cambio de temperatura ΔT provoca un cambio en toda dimensión lineal L_0 de un cuerpo sólido. El cambio ΔL es aproximadamente proporcional a L_0 y ΔT. Asimismo, un cambio de temperatura ΔT causa un cambio ΔV en el volumen V_0 de cualquier material líquido o sólido,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

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

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

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

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



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

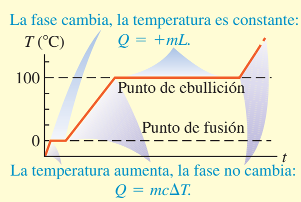
Para que una masa m de material cambie de fase a la misma temperatura (como de líquido a sólido o de líquido a vapor) hay que agregarle o quitarle una cantidad de calor. Esa cantidad es igual al producto de m y L, el calor de fusión, vaporización o sublimación.

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

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

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

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



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

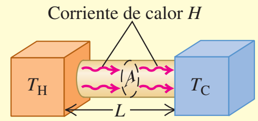
La convección es un proceso complejo de transferencia de calor, que implica movimiento de masa de una región a otra. Depende del área superficial, la orientación y la diferencia de temperatura entre un cuerpo y su entorno.

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

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

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

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



Corriente de calor $H = kA\dfrac{T_H - T_C}{L}$

Términos clave

termodinámica, *570*
temperatura, *571*
termómetro, *571*
equilibrio térmico, *571*
aislante, *571*
conductor, *571*
ley cero de la termodinámica, *572*
escala de temperatura Celsius, *572*
escala de temperatura Fahrenheit, *573*
escala de temperatura Kelvin, *574*
escala de temperatura absoluta, *576*
cero absoluto, *576*
coeficiente de expansión lineal, *576*
coeficiente de expansión de volumen, *578*
esfuerzo térmico, *580*
calor, *582*
caloría, *582*
unidad térmica británica, *583*
calor específico, *583*
capacidad calorífica molar, *584*
fase, *586*
estados de la materia, *586*
cambio de fase, *586*
calor de fusión, *586*
equilibrio de fases, *587*
calor de vaporización, *587*
calor de combustión, *589*
conducción, *592*
corriente de calor, *592*
conductividad térmica, *592*
gradiente de temperatura, *592*
resistencia térmica, *593*
convección, *595*
radiación, *596*
emisividad, *596*
constante de Stefan-Boltzmann, *596*
ley de Stefan-Boltzmann, *596*
cuerpo negro, *567*

Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

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

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

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

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

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

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

17.5 Respuestas: ii), i), iv), iii) En los casos i) y ii), la cantidad relevante es el calor específico c de la sustancia, que es la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de 1 *kilogramo* de esa sustancia en 1 K (1 C°). De acuerdo con la tabla 17.3, estos valores son i) 138 J para el mercurio y ii) 2428 J para el etanol. En los casos iii) y iv) necesitamos la capacidad calorífica molar C, que es la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de 1 *mol* de esa sustancia en 1 C°. De nuevo, a partir de la tabla 17.3, estos valores son iii) 27.7 J para el mercurio y iv) 111.9 J para el etanol. (La tasa de capacidades caloríficas molares es diferente de la tasa de calores específicos porque un mol de mercurio y un mol de etanol tienen masas diferentes.)

17.6 Respuesta: iv) En un tiempo t, el sistema va del punto b al punto e de la figura 17.21. 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 mayoría del calor agregado se invierte en evaporar el agua.

17.7 Respuesta: ii) Cuando usted toca una de las paredes, el calor fluye de su mano a la pared, la cual está a temperatura más baja. Cuanto más rápido fluya el calor desde su mano, más frío percibirá usted. La ecuación (17.21) indica que la tasa de flujo de calor es proporcional a la conductividad térmica k. De acuerdo con la tabla 17.5, el cobre tiene conductividad térmica mucho más alta $(385.0\ \mathrm{W/m \cdot K})$ que el acero $(50.2\ \mathrm{W/m \cdot K})$; por ello, la pared de cobre se siente más fría al tacto.

PROBLEMAS

Para la tarea asignada por el profesor, visite **www.masteringphysics.com**

Preguntas para análisis

P17.1. Explique por qué no tendría sentido utilizar un termómetro de vidrio de tamaño normal, para medir la temperatura del agua caliente contenida en un dedal.

P17.2. Si usted calienta el aire dentro de un recipiente rígido y sellado hasta que su temperatura en la escala Kelvin se duplique, la presión del aire en el recipiente también se duplica. ¿También es cierto esto si se duplica la temperatura Celsius del aire en el recipiente? Explique su respuesta.

P17.3. Muchos motores de combustión 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?

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 (392 °F). 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?

P17.7. Un artículo periodístico acerca del clima dice que "la temperatura de un cuerpo mide cuánto calor contiene el cuerpo". ¿Esta descripción es correcta? ¿Por qué?

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

P17.9. Una estudiante dijo que $1\ \mathrm{m^2/s^2 \cdot C°}$ es una unidad adecuada para capacidad calorífica específica. ¿Tiene ella razón? ¿Por qué?

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 esto enfría el aire? ¿Funcionaría este sistema en un clima muy húmedo? ¿Por qué?

P17.11. Las unidades de capacidad calorífica específica c son $\mathrm{J/kg \cdot K}$, pero las unidades 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 $(\mathrm{K})^{-1}$ para definir el cambio de temperatura?

P17.12. ¿Por qué un día cálido y húmedo en el trópico generalmente es más incómodo para los seres humanos, que un día cálido y seco en el desierto?

P17.13. Un trozo de papel de aluminio para envolver una papa y cocerla en un horno caliente, por lo general, puede manejarse con seguridad unos cuantos segundos después de que la papa se retiró del horno. Sin embargo, ¡no puede decirse lo mismo de la papa! Dé razones para esta diferencia.

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? De hecho, 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, el 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 su respuesta.

P17.21. Recién que sacamos una tarta de manzana del horno, la corteza y el relleno están a la misma temperatura; pero si probamos la tarta, el relleno nos quema la lengua pero la corteza no. ¿A qué se debe la diferencia? (*Sugerencia:* el relleno está húmedo, la corteza 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. En invierno, las tierras costeras tienen menor temperatura que el mar, pero en verano lo opuesto es válido. Explique por qué. (*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 que uno de acero? ¿Por qué? (*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 Estados Unidos 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 usted?

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, etcétera, 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 Estados Unidos (10 de julio de 1913, Death Valley, California); *c*) 31.1 °C, la temperatura promedio 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. Mientras está de vacaciones en Italia, usted ve en la televisión local en una mañana veraniega que la temperatura se elevará de los 18 °C actuales a 39 °C. ¿Cuál es el incremento correspondiente en la escala de temperatura Fahrenheit?

17.4. 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 su respuesta.

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

17.6. *a*) El 22 de enero de 1943, la temperatura en Spearfish, Dakota del Sur, se elevó de -4.0 °F a 45.0 °F en sólo dos minutos. ¿Cuál fue el cambio de la temperatura en grados Celsius? *b*) La temperatura en Browning, Montana, fue de 44.0 °F el 23 de enero de 1916. El día siguiente la temperatura se desplomó a -56 °C. ¿Cuál fue el cambio de temperatura en grados Celsius?

17.7. *a*) Usted se siente mal y le dicen que tiene una temperatura de 40.2 °C. ¿Cuál es su temperatura en °F? ¿Debería preocuparse? *b*) El reporte meteorológico matutino en Sydney indica una temperatura actual de 12 °C. ¿Cuál es la temperatura en °F?

Sección 17.3 Termómetros de gas y la escala Kelvin

17.8. *a*) Calcule la única temperatura a la que los termómetros Fahrenheit y Celsius coinciden. *b*) Calcule la única temperatura a la que los termómetros Fahrenheit y Kelvin coinciden.

17.9. Convierta las siguientes temperaturas récord a la escala Kelvin: *a*) la temperatura más baja registrada en los 48 estados contiguos de Estados Unidos (-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 (1.55×10^7 K).

17.11. El nitrógeno líquido es un material relativamente barato que a menudo se utiliza para realizar divertidas demostraciones de física a baja temperatura. El gas nitrógeno experimenta licuefacción a una temperatura de -346 °F. Convierta esta temperatura a: *a*) °C y *b*) K.

17.12. 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?

17.13. La presión de un gas al punto triple del agua es de 1.35 atm. Si este volumen permanece constante, ¿cuál será su presión a la temperatura a la que el CO_2 se solidifica?

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 4.80×10^4 Pa; y en el punto de ebullición normal del agua (100 °C), 6.50×10^4 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 6.50×10^4 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. El edificio más alto del mundo, de acuerdo con ciertos estándares arquitectónicos, es el Taipei 101 en Taiwán, con una altura de 1671 pies. Suponga que esta altura se midió en un fresco día primaveral, cuando la temperatura era de 15.5 °C. Este edificio podría utilizarse como una especie de termómetro gigante en un día caluroso de verano, midiendo con cuidado su altura. Suponga que usted realiza esto y descubre que el Taipei 101 es 0.471 ft más alto que su altura oficial. ¿Cuál es la temperatura, suponiendo que el edificio está en equilibrio térmico con el aire y que toda su estructura está hecha de acero?

17.17. El puente Humber de Inglaterra tiene el claro individual más largo del mundo (1410 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 2.6×10^{-5} K^{-1}. ¿Qué diámetro tendría: en un día caluroso en Death Valley (48.0 °C)? ¿Y en una noche fría en las montañas de Groenlandia (-53.0 °C)?

17.20. Un domo geodésico construido con una estructura de aluminio está muy cerca de ser un hemisferio perfecto; su diámetro mide 55.0 m en un día de invierno a una temperatura de -15 °C. ¿Cuánto más espacio interior tiene el domo en el verano, cuando la temperatura es de 35°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 (promedio) de expansión lineal para la varilla en este intervalo de temperatura.

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

17.23. La densidad del agua es de 999.73 kg/m^3 a una temperatura de 10 °C, y de 958.38 kg/m^3 a 100 °C. Calcule el coeficiente medio de expansión de volumen para el agua en ese intervalo de temperatura.

17.24. Un tanque de acero se llena totalmente con 2.80 m^3 de etanol cuando tanto 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 1000.00 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. Si el coeficiente de expansión de volumen 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 ΔA cuando la temperatura cambia en ΔT, demuestre que

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

donde α 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 1.35 cm de diámetro en una placa de acero a una temperatura de 25.0 °C. ¿Qué área transversal tendrá el agujero *a*) a 25.0 °C; y *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 su respuesta. *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. El diámetro exterior de un frasco de vidrio y el diámetro interior de su tapa de hierro miden ambos 725 mm a temperatura ambiente (20.0 °C). ¿Cuál será la diferencia de diámetro entre la tapa y el frasco, si la tapa se deja brevemente bajo agua caliente hasta que su temperatura alcance los 50.0 °C, sin que la temperatura del vidrio sufra alguna alteración?

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 la varilla 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 1.90 cm al calentarse a 420.0 °C. Calcule su coeficiente medio de expansión lineal para este intervalo de temperatura. *b*) El alambre se tiende sin tensión a 420.0 °C. Calcule el esfuerzo en él si se enfría a 20.0 °C sin permitir que se contraiga. El módulo de Young del alambre es de 2.0×10^{11} Pa.

17.32. Los rieles de acero para un tren se tienden en segmentos de 12.0 m de longitud, colocados extremo con extremo 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. Una tetera de aluminio de 1.50 kg que contiene 1.80 kg de agua se pone en la estufa. Si no se transfiere calor al entorno, ¿cuánto calor debe agregarse para elevar la temperatura de 20.0 °C a 85.0 °C?

17.34. 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.

17.35. 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 1.25×10^4 J de energía calorífica a la muestra, y observa que su temperatura aumenta 18.0 C°. ¿Qué calor específico tiene la muestra?

17.36. 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 la temperatura corporal (37 °C) los 0.50 L de aire intercambiados con cada respiración? Suponga que la capacidad calorífica específica del aire es de 1200 $J/kg \cdot K$ y que 1.0 L de aire tiene una masa de 1.3×10^{-3} kg. *b*) ¿Cuánto calor se pierde por hora si se respira 20 veces por minuto?

17.37. Al correr, un estudiante de 70 kg genera energía térmica a razón de 1200 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? (*Nota:* las estructuras proteínicas del cuerpo se dañan irreversiblemente a 44 °C o más. La capacidad calorífica específica del cuerpo humano es de alrededor de 3480 $J/kg \cdot K$, 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.)

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

17.39. Una caja con fruta, con masa de 35.0 kg y calor específico de 3650 $J/kg \cdot K$ baja deslizándose por una rampa de 8.00 m de longitud, que está inclinada 36.9 °C 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?

17.40. Un tren subterráneo de 25,000 kg viaja inicialmente a 15.5 m/s y frena para detenerse en una estación; ahí permanece el tiempo suficiente para que sus frenos se enfríen. Las dimensiones de la estación son 65.0 m de largo, 20.0 m de ancho y 12.0 de alto. Suponiendo que todo el trabajo para detener el tren que realizan los frenos se transfiere como calor de manera uniforme a todo el aire en la estación, ¿en cuánto se eleva la temperatura del aire en la estación? Tome la densidad del aire como 1.20 kg/m^3 y su calor específico como 1020 $J/kg \cdot K$.

17.41. 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?

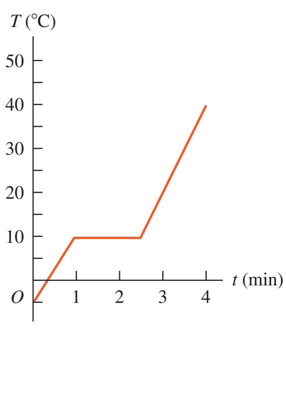
17.42. Un técnico mide el calor específico de un líquido desconocido sumergiendo en él una resistencia eléctrica. La energía eléctrica se convierte en calor transferido al líquido durante 120 s con tasa constante de 65.0 W. La masa del líquido es de 0.780 kg y su temperatura aumenta de 18.55 °C a 22.54 °C. *a*) Calcule el calor específico promedio 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 promedio real del líquido? Explique su respuesta.

17.43. Se agregan 8950 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 los incisos *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 una tasa de 10.0 kJ/min mientras registra su temperatura en función del tiempo. La gráfica de sus datos se muestra en la figura 17.30. *a*) Calcule el calor latente de fusión del sólido. *b*) Determine los calores específicos de los estados sólido y líquido del material.

Figura 17.30 Ejercicio 17.44.



17.45. Un trozo de 500.0 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, 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 su respuesta. *c*) Suponga que el calor absorbido por el vaso no es despreciable. ¿Qué tipo de error tendría el calor específico calculado en el inciso *a*) (sería demasiado grande, demasiado pequeño o correcto)? Explique su respuesta.

17.46. Antes de someterse a su examen médico anual, un hombre de 70.0 kg cuya temperatura corporal es de 37.0 °C consume una lata entera de 0.355 L de una bebida 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 3480 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 de la bebida que consumió) vuelva a 37.0 °C. Si su cuerpo desprende energía a una tasa de 7.00×10^3 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 0.00 °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 tasa 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 0.0 °C? *c*) Dibuje una curva que indique la temperatura en función del tiempo transcurrido.

17.51. La capacidad de los acondicionadores de aire comerciales a veces se expresa en "toneladas": las toneladas de hielo (1 ton = 2000 lb) que la unidad puede generar a partir de agua a 0 °C en 24 h. Exprese la capacidad de un acondicionador de 2 ton en Btu/h y en watts.

17.52. Quemaduras de vapor contra 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 25.0 °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 2.42×10^6 J/kg · K. La capacidad calorífica específica del cuerpo humano es de 3480 J/kg · K (véase el ejercicio 17.37). *b*) ¿Qué volumen de agua debe beber el hombre para reponer la que evaporó? Compárelo con el volumen de una lata de bebida 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 a 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 vez de dejar que suba a 40.0°C. (*Nota:* la capacidad calorífica específica de un camello u otro mamífero es la de una persona representativa, 3480 J/kg · K. El calor de vaporización del agua a 34 °C es de 2.42×10^6 J/kg.)

17.56. Un asteroide con diámetro de 10 km y una masa de 2.60×10^5 kg choca contra la Tierra a una rapidez de 32.0 km/s y cae en el Océano Pacífico. Si el 1.00% de la energía cinética del asteroide se destina a hacer que entre en ebullición el agua del océano (suponga que la temperatura inicial del agua es de 10.0 °C), ¿cuál es la masa de agua que se evaporará por completo como resultado de la colisión? (Para comparar, la masa del agua contenida en el Lago Superior es aproximadamente de 2×10^{15} kg.)

17.57. Se abre la puerta de un refrigerador, y el aire a temperatura ambiente (20.0 °C) llena el compartimiento de 1.50 m^3. Un pavo de 10.0 kg, también a temperatura ambiente, se coloca en el interior del refrigerador y se cierra la puerta. La densidad del aire es de 1.20 kg/m^3 y su calor específico es de 1020 J/kg · K. Suponga que el calor específico de un pavo, al igual que el del ser humano, es de 3480 J/kg · K. ¿Cuánto calor debe eliminar el refrigerador de su compartimiento para que el aire y el pavo alcancen el equilibrio térmico a una temperatura de 5.00 °C? Suponga que no hay intercambio de calor con el ambiente circundante.

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 = 2800 J/kg · K) con masa de 6.0 g que contiene una muestra de 16.0 g de una enzima con capacidad calorífica de 2250 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, desde la temperatura ambiente (19.5 °C) hasta la temperatura del baño de hielo?

17.61. Un lingote de plata de 4.00 kg se saca de un horno a 750.0 °C y se coloca sobre un gran bloque de hielo a 0.0 °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 0.0180 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 en el SI de la conductividad térmica son: W/m · K.

17.65. Suponga que la varilla de la figura 17.23a es de cobre, tiene 45.0 cm de longitud y área transversal de 1.25 cm^2. Sea $T_H = 100.0$ °C y $T_C = 0.0$ °C. *a*) Calcule el gradiente de la temperatura a lo largo de la varilla en el estado de equilibrio final. *b*) Calcule la corriente de calor en la varilla en el estado en equilibrio final. *c*) Calcule la temperatura de la varilla a 12.0 cm de su extremo izquierdo en el estado de equilibrio final.

17.66. Un extremo de una varilla metálica aislada se mantiene a 100.0 °C, y el otro se mantiene a 0.00 °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 10.0 min. Calcule la conductividad térmica k del metal.

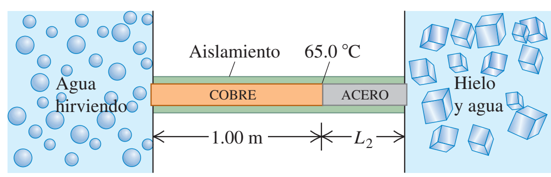
17.67. Un carpintero construye una pared exterior con una capa de madera $(k = 0.080$ W/m · K$)$ de 3.0 cm de espesor externa y una capa de espuma de poliestireno $(k = 0.010$ W/m · K$)$ de 2.2 cm de espesor interna. La temperatura de la superficie interior es de 19.0 °C, y la exterior, −10.0 °C. *a*) Calcule la temperatura en la unión entre la madera y la espuma de poliestireno. *b*) Calcule la tasa de flujo de calor por metro cuadrado 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 4.00 cm de espesor. La superficie interior de la fibra de vidrio está a 175 °C, y la exterior, a 35.0 °C. La fibra de vidrio 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 plafón de una habitación 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 a la habitación 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 plafón en 5.0 h.

17.70. Una varilla, larga y aislada está en contacto térmico perfecto para evitar pérdidas de calor por sus costados, en un extremo con agua hirviendo (a presión atmosférica) y con una mezcla agua-hielo en el otro (figura 17.31). La varilla consiste en un tramo de 1.00 m de cobre (con un extremo en contacto con vapor de agua) y el otro, unido a tope con un tramo L_2 de acero (con un extremo en contacto con la mezcla hielo-agua). Ambos tramos tienen una área transversal de 4.00 cm^2. La temperatura en la unión cobre-acero es de 65.0 °C una vez que se alcanza el estado de equilibrio. *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 17.31 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 100.0 °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 400.0 °C a un recipiente con agua hirviente que está a 1 atmósfera. ¿Qué diámetro debe tener la varilla?

17.73. Una ventana tiene dimensiones de 1.40×2.50 m y está hecha de vidrio de 5.20 mm de espesor. En un día de invierno, la temperatura exterior es de −20.0 °C, mientras que la confortable temperatura en el interior es de 19.5 °C. *a*) ¿A qué tasa se ha perdido calor a través de la ventana por conducción? *b*) ¿A qué tasa se perdería el calor a través de la ventana, si usted la cubriera con una capa de papel (conductividad térmica de 0.0500) de 0.750 mm de espesor?

17.74. Calcule la tasa de radiación de energía por unidad de área de un cuerpo negro a: *a*) 273 K y *b*) 2730 K.
17.75. Calcule la tasa 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 0.350. Una esfera de tungsteno con radio de 1.50 cm se suspende dentro de una cavidad grande evacuada, cuyas paredes están a 290.0 K. ¿Qué aporte de potencia se requiere para mantener la esfera a una temperatura de 3000.0 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 2450 K, y su emisividad es de 0.350. 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 una tasa de 2.7×10^{32} W y tiene una temperatura superficial de 11,000 K; *b*) Procyon B (visible sólo con un telescopio), que radia energía a una tasa de 2.1×10^{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*; Procyon B es un ejemplo de estrella *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° correspondería 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 la temperatura del aro aumentara 0.500 C°?
17.81. A una temperatura absoluta T_0, un cubo tiene lados de longitud L_0 y su densidad es ρ_0. El cubo está hecho de un material con coeficiente de expansión de volumen β. *a*) Demuestre que, si la temperatura aumenta a $T_0 + \Delta T$, la densidad del cubo es aproximadamente

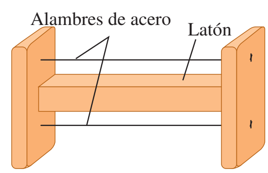
$$\rho \approx \rho_0(1 - \beta\Delta T)$$

(*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 ΔT 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 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 de 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 17.12 para determinar el coeficiente de expansión de volumen aproximado del agua a 2.0 °C y a 8.0 °C.
17.85. Un péndulo de Foucault consiste en una esfera de latón con un diámetro de 35.0 cm, suspendida de un cable de acero de 10.5 m de largo (ambas mediciones se hicieron a 20.0 °C). Por una negligencia en el diseño, la esfera oscilante libra el suelo por una distancia de sólo 2.00 mm, cuando la temperatura es de 20.0 °C. ¿A qué temperatura la esfera comenzará a rozar el suelo?
17.86. Usted vierte 108 cm^3 de etanol, a una temperatura de −10.0 °C, en un cilindro graduado inicialmente a 20.0 °C, llenándolo hasta el borde superior. El cilindro está hecho de vidrio con un calor específico de 840 J/kg · K y un coeficiente de expansión de volumen de 1.2×10^{-5} K^{-1}; su masa es de 0.110 kg. La masa del etanol es de 0.0873 kg. *a*) ¿Cuál será la temperatura final del etanol, una vez que se alcanza el equilibrio térmico? *b*) ¿Cuánto etanol se desbordará del cilindro antes de alcanzar el equilibrio térmico?
17.87. Una varilla metálica de 30.0 cm de longitud se expande 0.0650 cm cuando se calienta de 0.0 °C a 100.0 °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 extremo con extremo y se expande 0.0580 cm entre 0.0 °C y 100.0 °C. Calcule la longitud de cada tramo de la barra compuesta.
17.88. Una fresca mañana de sábado (4.0 °C), una piloto llena los tanques de su Pitts S-2C (un avión biplaza para acrobacias) hasta su capacidad máxima de 106.0 L. Antes de volar el domingo por la mañana, cuando la temperatura es otra vez de 4.0 °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 9.5×10^{-4} K^{-1}, y el tanque es de aluminio. *b*) Si quería tener el máximo de combustible disponible para su vuelo, ¿con cuántos litros debió llenar el tanque la piloto?
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 ΔL cuando la temperatura cambia una cantidad ΔT, 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, α es su coeficiente de expansión lineal y Y es su módulo de Young. *b*) Una barra de latón gruesa tiene proyecciones en sus extremos (figura 17.32). Dos alambres finos de acero, tendidos entre las proyecciones, tienen tensión cero 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 17.32 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 extremo con extremo 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 in a 20.0 °C se calienta y se ensambla alrededor de un eje de latón con diámetro exterior de 2.5020 in a 20.0 °C. *a*) ¿A qué temperatura debe calentarse el anillo durante el ensamble? *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 de expansión de volumen promedio β 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. Inicialmente el sistema está a una presión de 1.00 atm (1.013×10^5 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: $k = 8.50 \times 10^{-10}\ \text{Pa}^{-1}$

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

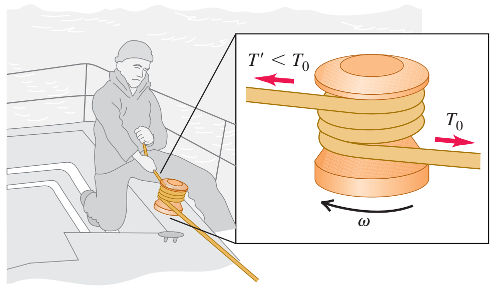
Coeficiente de expansión de volumen del metal: $\beta = 3.90 \times 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$

17.94. Usted enfría un trozo de hierro al rojo vivo (temperatura de 745 °C) dejándolo caer en una taza aislada con masa insignificante, que contiene 75.0 g de agua a 20.0 °C. Suponiendo que no hay intercambio de calor con los alrededores, *a*) ¿cuál será la temperatura final del agua y *b*) cuál será la masa final del hierro y del agua que quede?

17.95. Reingreso de naves espaciales. Una nave espacial de aluminio tiene una rapidez orbital de 7700 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 para amplificar de manera considerable su tensión, al tiempo que se mantienen libres sus extremos (figura 17.33). 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 520.0 N y el cabrestante tiene 10.0 cm de diámetro y gira una vez cada 0.900 s, calcule la tasa 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 17.33 Problema 17.96.



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

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

donde $k = 1940$ 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 con masa de 70.0 kg está sentada en una tina de 190.0 cm por 80.0 cm. Antes de entrar ella, el agua tenía 10.0 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? (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 típico que escucha atentamente una clase de física produce 100 W de calor. ¿Cuánto calor desprende un grupo de 90 estudiantes de física, en una aula durante una clase de 50 min? *b*) Suponga que toda la energía térmica del inciso *a*) se transfiere a los 3200 m^3 de aire del aula. El aire tiene un calor específico de 1020 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 tal 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. Para su cabaña campestre, usted decide construir un primitivo refrigerador de espuma de poliestireno y planea mantener fresco el interior con un bloque de hielo, cuya masa inicial es de 24.0 kg. La caja tiene dimensiones de 0.500 m × 0.800 m × 0.500 m. El agua del hielo derretido se recolecta en el fondo de la caja. Suponga que el bloque de hielo está a 0.00 °C y que la temperatura exterior es de 21.0 °C. Si la tapa de la caja vacía nunca se abre y usted desea que el interior de la caja permanezca a 5.00 °C durante una semana exactamente, hasta que el hielo se derrita, ¿cuál debe ser el grosor la espuma de poliestireno?

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 (158.0 °F) 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 el vapor a presión atmosférica se condensa en los radiadores, saliendo de éstos a 35.0 °C (95.0 °F). ¿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 con masa de 0.446 kg contiene 0.0950 kg de hielo. El sistema está inicialmente a 0.0 °C. *a*) Si a la lata se agregan 0.0350 kg de vapor de agua a 100 °C y 1.00 atm de presión, ¿qué temperatura final alcanzará 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. Un recipiente de espuma de poliestireno de masa insignificante contiene 1.75 kg de agua y 0.450 kg de hielo. Más hielo, proveniente de un refrigerador a -15.0 °C, se agrega a la mezcla en el recipiente, y cuando se alcanza el equilibrio térmico, la masa total del hielo en el recipiente es de 0.778 kg. Suponiendo que no hay intercambio de calor con los alrededores, ¿cuál es la masa de hielo que se agregó?

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

17.106. Un tubo conduce desde un calorímetro de 0.150 kg hasta un matraz donde hierve agua a presión atmosférica. El calorímetro tiene 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. Un trabajador vierte 1.250 kg de plomo fundido a una temperatura de 365.0 °C en 0.5000 kg de agua a una temperatura de 75.00 °C, en un recipiente aislado de masa insignificante. Suponiendo que no hay pérdida de calor hacia los alrededores, calcule la masa de plomo y del agua remanente en el recipiente cuando los materiales alcanzan el equilibrio térmico.

17.108. Un método experimental para medir la conductividad térmica de un material aislante consiste en 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° (aprox. 120 F°) 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 3.90 cm. Calcule la conductividad térmica del material en unidades del 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 tasa de flujo de calor a través de la puerta. *b*) ¿En qué factor aumenta el flujo de calor, si en la puerta se coloca una ventana cuadrada de 0.500 m por lado? El vidrio tiene un espesor de 0.450 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 plafón 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 $m^2 \cdot K/W$.

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 extremos libres 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 de un lago 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 del inciso *c*) tiene una profundidad uniforme de 40 m, ¿cuánto tardaría en congelarse totalmente? ¿Es probable que eso 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 de 2.50 cm^2, longitud de 120 cm, conductividad térmica de 380 W/m · K, densidad de 1.00×10^4 kg/m^3 y calor específico de 520 J/kg · K. Considere un elemento cilíndrico corto 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 una tasa de 0.250 C°/s, calcule el gradiente de temperatura en el otro extremo del elemento.

17.115. Una cabaña rústica tiene un piso cuya área es de 3.50 m $\times$ 3.00 m. Sus paredes, que miden 2.50 m de alto, están hechas de madera (conductividad térmica de 0.0600 W/m · K) de 1.80 cm de grosor y están aisladas con 1.50 cm de un material sintético. Cuando la temperatura exterior es de 2.00 °C, es necesario calentar la habitación a una tasa de 1.25 kW para mantener su temperatura a 19.0 °C. Calcule la conductividad térmica del material aislante. Desprecie la pérdida de calor a través del techo y el piso. Suponga que las superficies interna y externa de la pared tienen la misma temperatura que el aire en el interior y afuera de la cabaña.

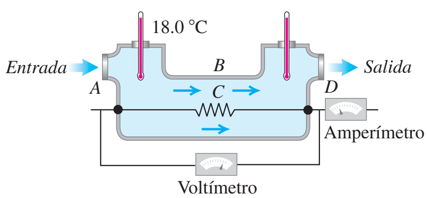
17.116. La tasa de energía radiante que llega del Sol a la atmósfera superior de la Tierra es de cerca de 1.50 kW/m^2. La distancia de la Tierra al Sol es de 1.50×10^{11} m, y el radio del Sol es de 6.96×10^8 m. *a*) Calcule la tasa de radiación de energía por unidad de área de la superficie solar. *b*) 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 2.09×10^4 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 al 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 una temperatura de 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 17.34 se muestra un diseño de prueba. El agua fluye a una tasa de 0.500 kg/min, el termómetro de entrada registra 18.0 °C, el voltímetro marca 120 V y el amperímetro indica 15.0 A [lo que corresponde a un aporte de potencia de entrada de (120 V) × (15.0 A) = 1800 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 17.34 Problema 17.119.



17.120. Cuando un hámster ingiere alimento. 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 1020 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 una hora? 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 transfiere calor al entorno. *b*) Suponiendo que el hámster convierte semillas en calor con una eficiencia del 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 el inciso *a*)?

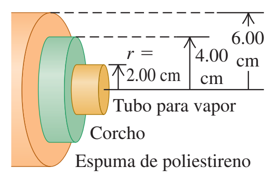
17.121. Las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida contienen aproximadamente el 1.75% del agua total (por masa) de la superficie terrestre; los océanos contienen un 97.5%, y el otro 0.75% es agua subterránea. Suponga que las capas de hielo, actualmente se encuentran a una temperatura media aproximada de −30 °C, de algún modo resbalan hacia el océano y se derriten. ¿Cuál sería la disminución de temperatura del océano que se produciría como resultado de ello? Suponga que la temperatura media del agua del océano es actualmente de 5.00 °C.

Problemas de desafío

17.122. *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 del inciso *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 del inciso *c*), deduzca una ecuación para la variación de temperatura dentro de las paredes del cilindro. *e*) Para el casco esférico del inciso *a*) y el cilindro hueco del inciso *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.

17.123. 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 4.00×10^{-2} W/m · K. Ésta está rodeada a la vez por una camisa cilíndrica de espuma de poliestireno con conductividad térmica de 1.00×10^{-2} W/m · K y radios interior y exterior de 4.00 cm y 6.00 cm, respectivamente (figura 17.35). 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 tasa total de transferencia de calor hacia afuera de un tramo de 2.00 m de tubería. (*Sugerencia:* use la expresión encontrada en el inciso *c*) del problema de desafío 17.122.)

Figura 17.35 Problema de desafío 17.123.



17.124. Suponga que ambos extremos de la varilla de la figura 17.23 se mantienen a una temperatura de 0 °C y que la distribución de temperatura inicial a lo largo de la varilla está dada por $T = (100\ °C) \operatorname{sen} \pi x/L$, 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 es la densidad y c es el calor específico.) *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 del inciso *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.

17.125. 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 lenteja. 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?

17.126. Un extremo de una varilla cilíndrica de cobre sólido de 0.200 m de longitud se mantiene a una temperatura de 20.00 K. El otro extremo se ennegrece y se expone a radiación térmica de las paredes circundantes que están a 500.0 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 $k = 1670 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, la temperatura del extremo ennegrecido es apenas un poco mayor que 20.00 K.)

17.127. 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 una tasa 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_{piel} es de 1.5 m^2, la temperatura del aire T_{aire} es de 47 °C y la temperatura de la piel T_{piel}, es de 36 °C; iii) la piel absorbe energía radiante del Sol a una tasa de 1400 W/m^2; iv) la piel absorbe energía radiante del entorno, que tiene una temperatura de 47 °C. *a*) Calcule la tasa 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 de 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 2.42×10^6 J/kg.) *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 m^2. ¿Qué tasa de transpiración se requiere ahora? Comente la utilidad de la vestimenta tradicional que usa la gente del desierto.