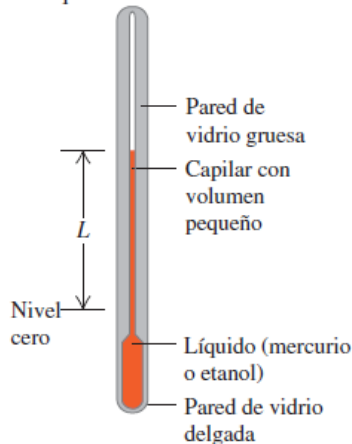


Temperatura y Calor

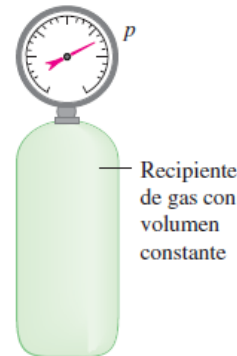
Definición macroscópica de temperatura

Necesitamos una propiedad medible de un sistema que varíe con su **calidez** o **frialidad** para construir una escala de temperaturas. La longitud de mercurio en un capilar, la presión de un gas o la resistencia de un alambre cambian con la temperatura, la cantidad de radiación infrarroja emitida.

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



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

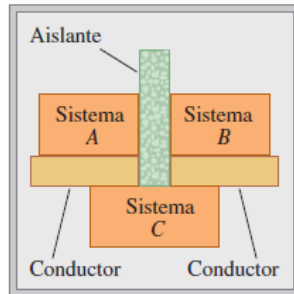


Para medir la temperatura de un cuerpo colocamos el termómetro en contacto con él, esperamos la condición de equilibrio y leemos la temperatura. (ej: café se enfría- termómetro se calienta).

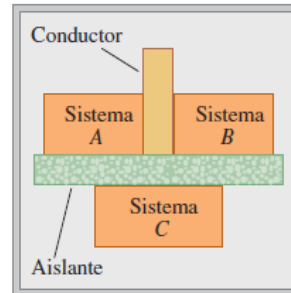
Si dos sistemas están separados por un aislante térmico se afectan con más lentitud. (ej: hielera)

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.



Si un sistema *C* está en equilibrio térmico con otros sistemas *A* y *B*, entonces *A* y *B* también están en equilibrio térmico entre sí.

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

Escalas de temperatura

Un termómetro mide su propia temperatura (dilatación del Hg por ejemplo) pero cuando están en equilibrio térmico deben coincidir.

Escalas arbitrarias e históricas:

Celsius: Marca el 0° como el punto de congelación del agua pura, el 100° como el punto de ebullición y dividimos en 100 intervalos iguales, los grados Celsius o centígrados.

Fahrenheit: el punto de congelación del agua es $32^{\circ}F$, el de ebullición es $212^{\circ}F$ y hay 180 divisiones entre ellos. Por lo tanto $1^{\circ}F$ representa un cambio de $\frac{5}{9}$ de $1^{\circ}C$.

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

Kelvin: Termómetros de gas a volumen constante, su presión aumenta con la temperatura. Traza-mos una línea y extrapolamos a la temperatura hipotética en que la presión absoluta sería cero. De allí surge el $-273,15^{\circ}C$. Cada unidad en esta escala tiene el mismo tamaño que el grado Celsius, pero está desplazada.

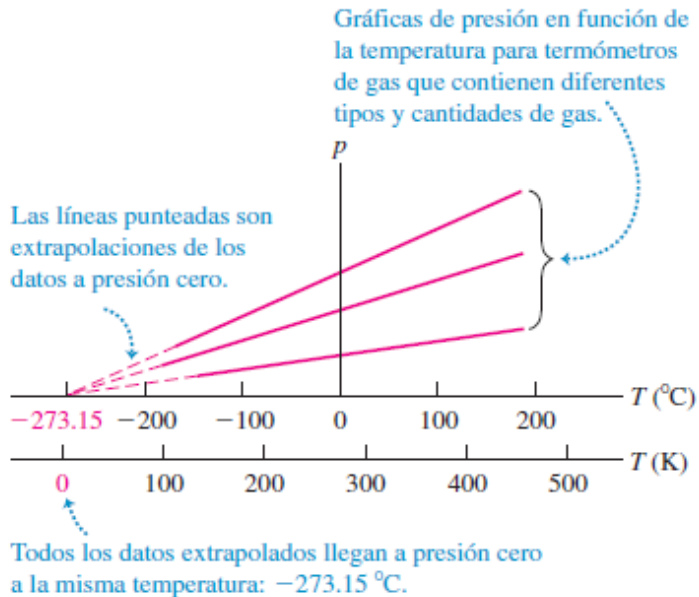
$$T_K = T_C + 273,15$$

Termómetro de gas

a) Termómetro de gas con volumen constante



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



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

	K	C	F
El agua hierve	373	100°	212°
	↑ 100 K	↑ 100 C°	↑ 180 F°
El agua se congela	273	0°	32°
CO ₂ se solidifica	195	-78°	-109°
El oxígeno se licua	90	-183°	-298°
Cero absoluto	0	-273°	-460°

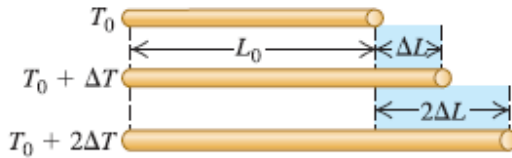
Dada la proporcionalidad de presión con temperatura en la escala Kelvin, sólo requiere un punto fijo para su calibración. El punto triple del agua. Es una combinación única de temperatura y presión donde pueden coexistir agua sólida, líquida y gaseosa. Eso ocurre a $0,01^{\circ}\text{C}$. Se coloca un termómetro de gas en esa mezcla, se mide su presión p_{triple} y se asocia la temperatura $273,16\text{K}$. Luego cuando el termómetro tiene presión p a otra temperatura sabremos que:

$$T = T_{triple} \frac{p}{p_{triple}} = 273,16\text{K} \frac{p}{p_{triple}}$$

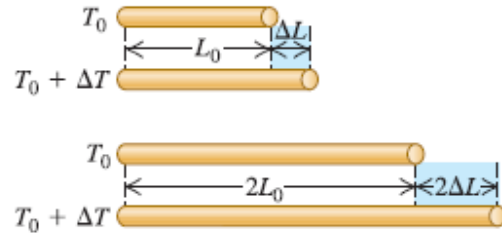
Expansión térmica

Casi todos los materiales se expanden al aumentar su temperatura.

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



b) ΔL también es directamente proporcional a L_0 .



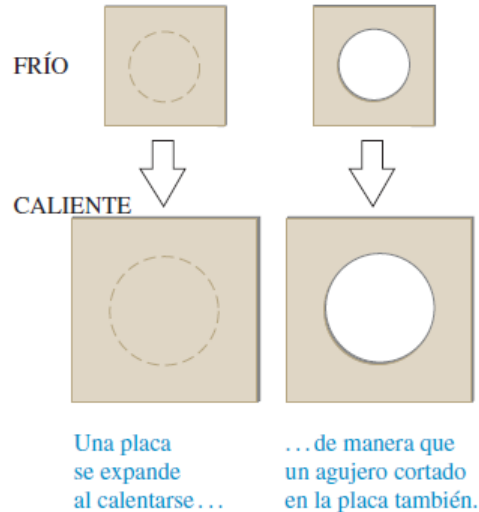
$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad \Rightarrow \quad L = L_0 + \alpha L_0 (T - T_0)$$

La constante α es el coeficiente de expansión lineal del material. Sus unidades con K^{-1} .

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

En muchos materiales todas las dimensiones lineales cambian según esa ecuación. Puede ser la longitud de los lados de una lámina cuadrada, o el diámetro de un objeto circular.

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



Pero algunos materiales como los monocristales o la madera se expanden de forma diferente en diferentes direcciones.

Expansión de volúmen

Un aumento de temperatura suele aumentar el volúmen. Si el cambio de Temperatura no es muy grande existe una proporcionalidad:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

La constante β es el coeficiente de expansión de volúmen del material. Sus unidades son K^{-1} .

En muchas sustancias β disminuye con la temperatura. Los valores para los líquidos son mucho mayores que para los sólidos. Para el caso de los sólidos existe la relación $\beta = 3\alpha$.

Piense cubo de lado L , $V = L^3$,

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

$$dL = \alpha L_0 dT$$

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

$$\beta = 3\alpha$$

Coeficientes de expansión volumétrica

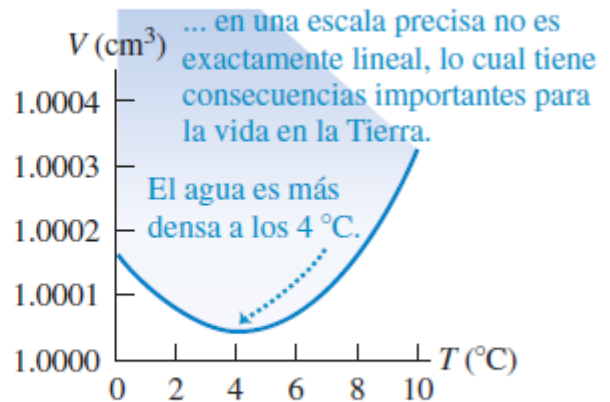
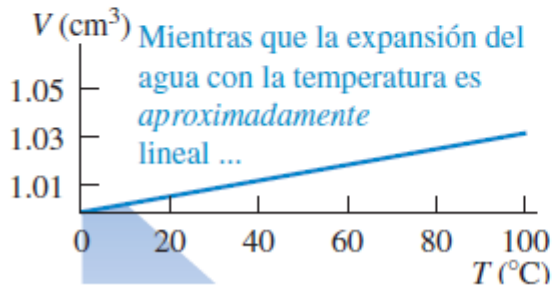
Tabla 17.2 Coeficientes de expansión de volumen

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

Expansión térmica del agua

El agua entre 0°C y 4°C presenta un comportamiento anómalo. Se contrae al aumentar la temperatura. Su coeficiente de expansión es negativo. Presenta su mayor densidad a los 4°C . También se expande al congelarse.

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.



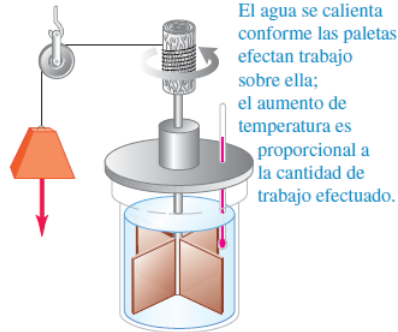
Cantidad de Calor

La transferencia de energía que se da entre dos materiales para establecer el equilibrio térmico, mientras uno se calienta y el otro se enfría se denomina **flujo de calor**. En tanto que la energía así transferida se denomina **calor**.

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

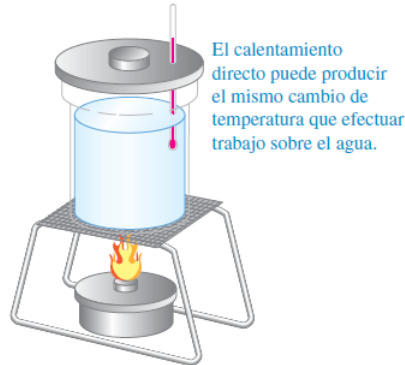


Figura 1: Joule. Equivalente mecánico del calor. El cambio de temperatura es proporcional al trabajo realizado.

La caloría, cal, se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1g de agua de $14,5^{\circ}C$ a $15,5^{\circ}C$

Puesto que el calor es una transferencia de energía, existe una relación entre las unidades de éste y las de la energía mecánica, el Joule. Se ha demostrado experimentalmente que:

$$1cal = 4,186J$$

La caloría no es una unidad fundamental del SI, usaremos el J para las energías en todas sus formas.

Usaremos como símbolo Q para la cantidad de calor.

Se requieren $4190J$ de calor para elevar la temperatura de 1kilogramo de agua en $1^{\circ}C$. Pero sólo $910J$ para elevar $1^{\circ}C$ la temperatura de 1kilogramo de aluminio.

La cantidad de calor Q necesaria para elevar la temperatura de una masa m de cierto material desde T_1 hasta T_2 es proporcional tanto a la masa como al cambio de temperatura ΔT .

$$Q = m c \Delta T$$

donde c es una cantidad característica de cada material, llamada *calor específico*.

El calor específico de los materiales depende de la temperatura inicial y el intervalo de temperaturas. El calor específico del agua es $c = 4190 J/kg \cdot K$

Si expresamos la masa, m , de un material como múltiplo de la masa molar de dicho material, M , y el número de moles, n podemos expresar $Q = nMc\Delta T$. Llamamos capacidad calorífica molar $C = cM$, o calor específico molar. Resultando $Q = nC\Delta T$.

Las unidades de C son $J/mol \cdot K$.

Las mediciones en sólidos suelen hacerse a presión constante. Se llaman calor específico a presión constante, c_p o C_p . Mientras que en gases suele ser más fácil hacer las mediciones a volumen constante, c_V y C_V . Para una sustancia dada C_V y C_p son diferente.

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

Cambios de fase

Las fases describen un estado específico de la materia. Como el compuesto H_2O que tiene su fases sólida (hielo), líquida (agua) y gaseosa (vapor de agua). Una transición de fase, cambio de una fase a otra ocurren a combinaciones específicas de presión y temperatura, generalmente acompañados de cambios de volumen y densidad.

Si agregamos calor al hielo a $0^\circ C$ a presión atmosférica normal, la temperatura del hielo no aumenta. En vez de eso se funde para formar agua líquida a $0^\circ C$.

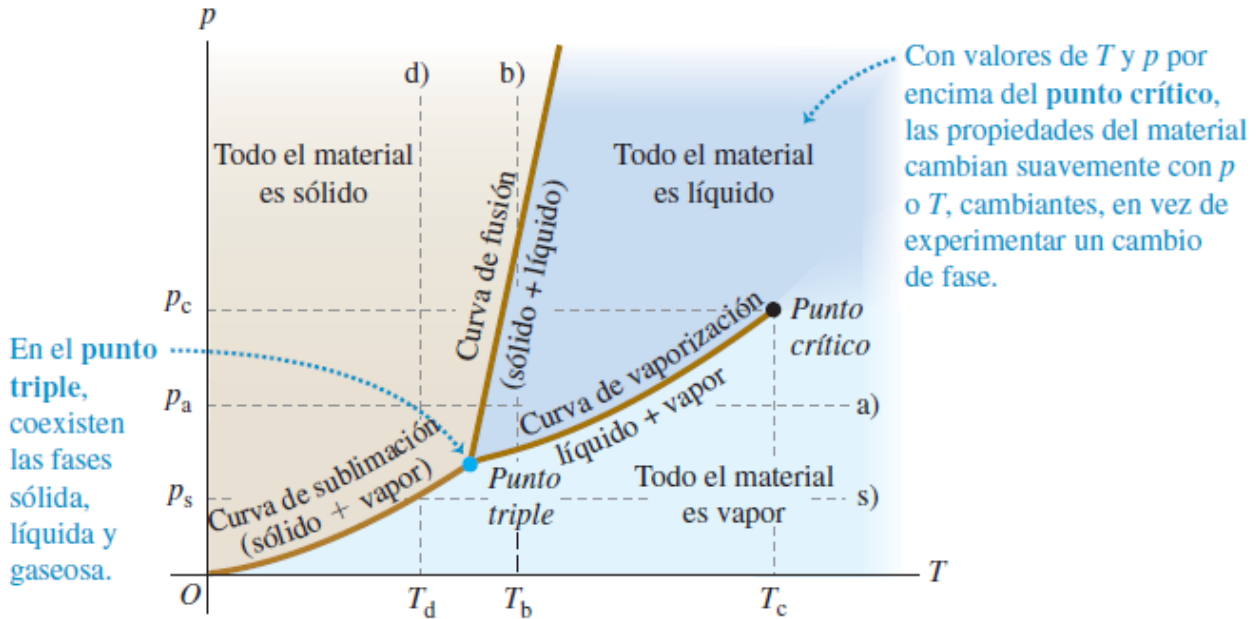
Para convertir 1 kg de hielo a $0^\circ C$ en 1 kg de agua a $0^\circ C$ a presión atmosférica normal, necesitamos $3,34 \times 10^5$ J de calor. Lo llamamos calor latente de fusión del agua y lo denotamos por L_f .

Para fundir una masa m de un material se requiere una cantidad de calor

$$Q = m L_f$$

Este proceso es reversible. Es decir que quitando esa cantidad de calor el cambio de fase ocurre en sentido contrario.

Diagrama de fases presión versus temperatura, coexistencia y cambios de fases



En el punto triple coexisten las tres fases. En el caso del agua ocurre a $p = 610Pa$ y $T = 273,16 K$.

Para un material dado a una presión dada, la temperatura de congelación es la misma que la de fusión. En esa temperatura única, las fases pueden coexistir en un equilibrio de fases.

Similarmente ocurre con el punto de vaporización. Llamamos L_v al calor de vaporización.

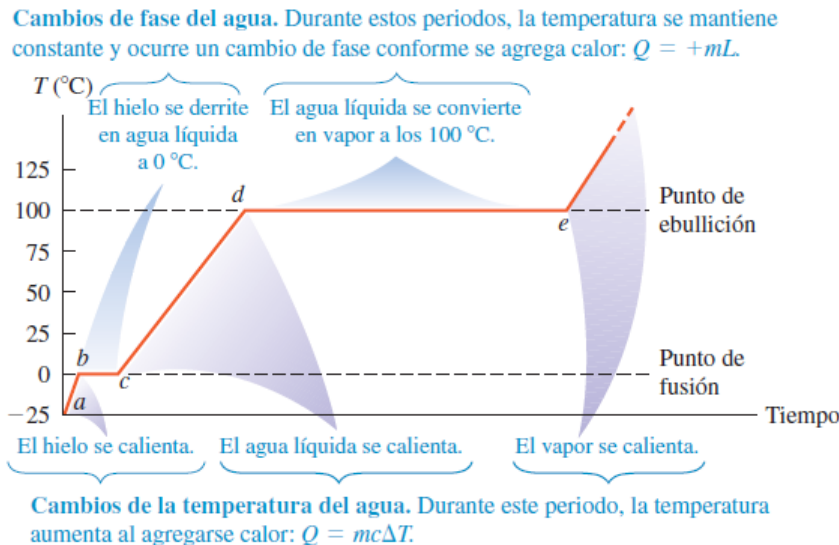
Para el agua $L_v = 2,256 \times 10^6 \text{ J/kg}$, el cambio de fase ocurre a 100°C a presión normal.

Tabla 17.4 Calores de fusión y de vaporización

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

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

Muestra de agua a presión constante a la que se le entrega calor a una tasa constante, $\frac{dQ}{dt} = C$.



Durante los cambios de fase la temperatura se mantiene constante.

Las pendientes de las subidas de temperatura son diferentes al calentar hielo y agua.

Ejemplo 17.9

Cambios tanto de temperatura como de fase

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

SOLUCIÓN

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

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

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

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

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

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

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

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

La suma de estas tres cantidades debe ser cero:

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

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

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

Mecanismos de transferencia de calor

Hay diferentes mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Existen materiales conductores o aislantes que permiten o impiden la transferencia de calor entre cuerpos.

Conducción:

El calor de una llama en un extremo de una varilla conductora llega al otro extremo por conducción (agitación térmica de los átomos o electrones libres).

Sólo hay transferencia de calor entre regiones a diferentes temperaturas y el flujo es siempre desde la temperatura más alta hacia la más baja.

en una varilla de material conductor se mantiene con sus extremos conectados a fuentes de temperatura T_H (Hot- la más caliente) y T_C (cold - la más fría) con los costados aislados para que no escape calor por los lados.

Llamamos H a la corriente de calor, esto es la cantidad de calor dQ que se transfiere por la varilla en la unidad de tiempo dt : $H = \frac{dQ}{dt}$, que es proporcional al area A transversal, a la

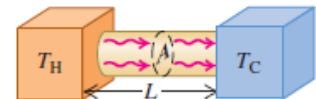
diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a la longitud, L :

$$H = \frac{dQ}{dt} = kA \frac{T_H - T_C}{L}$$

Las unidades de H son unidades de Energía por unidad de tiempo, es decir $W = J/s$ y la constante k es la conductividad térmica del material, sus unidades son $W/m \cdot K$.

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

a) Corriente de calor H .



Llamamos gradiente de temperatura a la diferencia de temperatura por unidad de longitud. Si la temperatura no varía uniformemente $H = -kA \frac{dT}{dx}$, el signo menos indica que el calor fluye siempre hacia donde T decrece.

Ejemplo de problema:

Ejemplo 17.13 Conducción a través de dos barras I

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

SOLUCIÓN

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

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

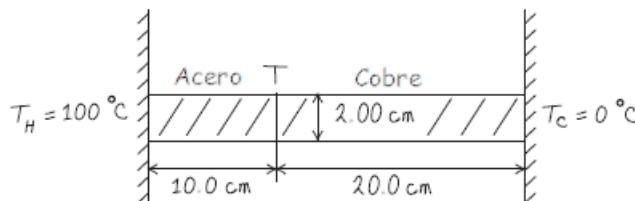
EJECUTAR: Igualando las dos corrientes de calor,

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

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

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

17.26 Nuestro esquema para este problema.



En *estado estacionario* el flujo de calor debe ser el mismo que pasa por ambos materiales.

No estudiaremos convección ni radiación.

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



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.

