

**Figura 12** Procesos isotérmicos (líneas continuas) y procesos adiabáticos (líneas de puntos) llevados a cabo en 1 mol de un gas ideal diatómico. Obsérvese que un *aumento* adiabático del volumen (por ejemplo, el segmento *ab*) está siempre acompañado de una *disminución* en la temperatura.

máquina de combustión interna, son también esencialmente adiabáticas, porque el tiempo para que el calor fluya es insuficiente.

**Procesos isotérmicos**

En un proceso isotérmico, la temperatura permanece constante. Si el sistema es un gas ideal, entonces la energía interna debe, por lo tanto, permanecer constante también. Con  $\Delta E_{int} = 0$ , la primera ley da

$$Q + W = 0 \text{ (proceso isotérmico; gas ideal).} \quad (41)$$

Si se efectúa sobre el gas una cantidad de trabajo (positivo)  $W$ , una cantidad equivalente de calor  $Q = -W$  se libera por el gas hacia el entorno. Nada del trabajo efectuado sobre el gas permanece con el gas como energía interna almacenada.

La figura 12 compara los procesos isotérmico y adiabático para 1 mol de un gas monoatómico ideal.

**Procesos a volumen constante**

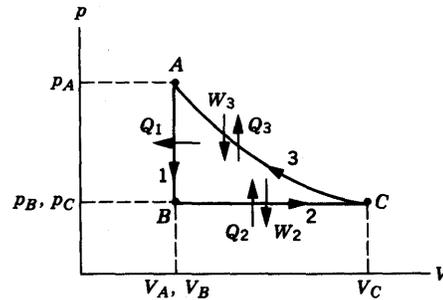
Si el volumen de un gas permanece constante, no puede efectuarse un trabajo. Entonces  $W = 0$ , y la primera ley da

$$\Delta E_{int} = Q \text{ (proceso a volumen constante).} \quad (42)$$

En este caso, todo el calor que entra al gas ( $Q > 0$ ) es almacenado como energía interna ( $\Delta E_{int} > 0$ ).

**Procesos cíclicos**

En un proceso cíclico, llevamos a cabo una secuencia de operaciones que finalmente llevan al sistema a su estado



**Figura 13** Un gas experimenta un proceso cíclico que comienza en el punto *A* y consiste en (1) un proceso *AB* a volumen constante, (2) un proceso *BC* a presión constante, y (3) un proceso *CA* isotérmico.

inicial, como, por ejemplo, el proceso de tres etapas ilustrado en la figura 13. Debido a que el proceso comienza y termina en el punto *A*, el cambio en la energía interna durante el ciclo es cero. Entonces, de acuerdo con la primera ley,

$$Q + W = 0 \text{ (proceso cíclico),} \quad (43)$$

en donde  $Q$  y  $W$  representan los totales para el ciclo. En la figura 13, el trabajo total es positivo, porque existe más área positiva bajo la curva que representa a la etapa 3 que área negativa bajo la línea que representa a la etapa 2. Entonces,  $W > 0$  y se deduce de la ecuación 43 que  $Q < 0$ . De hecho, para cualquier ciclo que se efectúe en la dirección antihoraria, debemos tener  $W > 0$  (y por ello  $Q < 0$ ), mientras que los ciclos que se efectúen en la dirección horaria tienen  $W < 0$  y  $Q > 0$ .

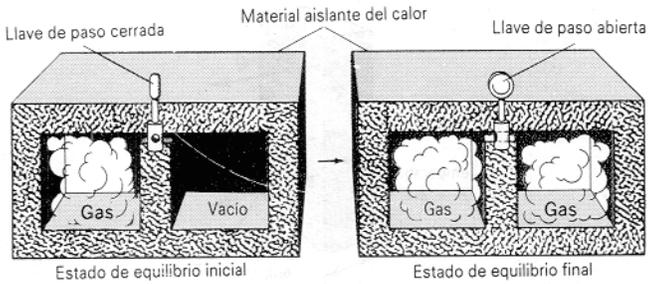
**Expansión libre**

La figura 14 representa el proceso conocido como *expansión libre*. El gas está inicialmente sólo en un lado del recipiente, y cuando se abre la llave de paso, el gas se expande hacia la mitad previamente evacuada. No hay pesas que puedan ser elevadas en este proceso, así que no se efectúa ningún trabajo. El recipiente está aislado, de modo que el proceso es adiabático. De aquí que, con  $W = 0$  y  $Q = 0$ , la primera ley da

$$\Delta E_{int} = 0 \text{ (expansión libre)} \quad (44)$$

Entonces, la energía interna de un gas ideal que experimenta una expansión libre permanece constante, y debido a que la energía interna de un gas ideal depende únicamente de la temperatura, su temperatura debe, similarmente, permanecer constante.

La expansión libre es un buen ejemplo de un proceso que *no está en equilibrio*. Si un gas tiene una presión y un volumen (y por lo tanto una temperatura) bien definidos, podemos representar el estado del gas como un punto en



**Figura 14** Expansión libre. Al abrir la llave de paso se permite que el gas fluya de un lado del recipiente aislado al otro. No se efectúa ningún trabajo, y no se transfiere ningún calor al entorno.

un diagrama  $pV$ . La asignación de una temperatura al gas significa que debe estar en equilibrio térmico; cada punto en un diagrama  $pV$  representa, por lo tanto, un sistema en equilibrio. En el caso de una expansión libre, el estado inicial (todo el gas en un lado) es un estado de equilibrio, así como también el estado final; pero en tiempos intermedios, cuando el gas pasa de un lado al otro, la temperatura y la presión no tienen valores únicos, y no podemos trazar este proceso en un diagrama  $pV$ . Únicamente los puntos inicial y final aparecen en la gráfica. No obstante, podemos todavía emplear la primera ley para analizar este proceso, porque el cambio en la energía interna depende únicamente de los puntos inicial y final.

La tabla 4 resume los procesos que hemos considerado y sus transferencias de energía.

**Problema muestra 4** Conviértamos 1.00 kg de agua líquida a vapor por medio de una ebullición a la presión atmosférica estándar; véase la figura 15. El volumen cambia de un valor inicial de  $1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  como líquido a  $1.671 \text{ m}^3$  como vapor. Para este proceso, halle (a) el trabajo efectuado sobre el sistema, (b) el calor añadido al sistema, y (c) el cambio en la energía interna del sistema.

**Solución** (a) El trabajo efectuado sobre el gas durante este proceso a presión constante está dado por la ecuación 26 del capítulo 23:

**TABLA 4** APLICACIONES DE LA PRIMERA LEY

Proceso	Restricción	Primera ley	Otros resultados
Todos	Ninguna	$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$	$\Delta E_{\text{int}} = nC_v \Delta T$ , $W = -\int p \, dV$
Adiabático	$Q = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = W$	$W = (p_f V_f - p_i V_i)/(\gamma - 1)$
A volumen constante	$W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = Q$	$Q = nC_v \Delta T$
A presión constante	$\Delta p = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$	$W = -p\Delta V$ , $Q = nC_p \Delta T$
Isotérmico	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$Q = -W$	$W = -nRT \ln(V_f/V_i)$
Cíclico	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$Q = -W$	
Expansión libre	$Q = W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$\Delta T = 0$

† Las expresiones subrayadas se aplican únicamente a los gases ideales; todas las demás se aplican en general.

$$\begin{aligned} W &= -p(V_f - V_i) \\ &= -(1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(1.671 \text{ m}^3 - 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3) \\ &= -1.69 \times 10^5 \text{ J} = -169 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

El trabajo efectuado sobre el sistema es negativo; de manera equivalente, el trabajo positivo es efectuado por el sistema sobre su entorno al levantar al émbolo cargado de la figura 15.

(b) Partiendo de la ecuación 7 tenemos

$$Q = Lm = (2260 \text{ kJ/kg})(1.00 \text{ kg}) = 2260 \text{ kJ}.$$

Esta cantidad es positiva, como es lo apropiado para un proceso en el que se añade calor al sistema.

(c) Hallamos el cambio en la energía interna a partir de la primera ley:

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W = 2260 \text{ kJ} + (-169 \text{ kJ}) = 2090 \text{ kJ}.$$

Esta cantidad es positiva, indicando que la energía interna del sistema ha aumentado durante el proceso de ebullición. Esta energía representa el trabajo interno efectuado para vencer la fuerte atracción que las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  ejercen entre sí en el estado líquido.

Vemos que, cuando el agua hierve, alrededor del 7.5% ( $169 \text{ kJ}/2260 \text{ kJ} = 0.075$ ) del calor añadido se convierte en trabajo externo al empujar a la atmósfera. El resto se convierte en energía interna que se añade al sistema.

**Problema muestra 5** El ciclo mostrado en la figura 13 consiste en tres procesos, que comienzan en el punto A: una reducción de presión a volumen constante del punto A al punto B; un aumento de volumen a presión constante del punto B al punto C; una compresión isotérmica (disminución de volumen) desde el punto C regresando al punto A. Hagamos que el ciclo sea llevado a cabo sobre 0.75 mol de un gas diatómico ideal, con  $p_A = 3.2 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,  $V_A = 0.21 \text{ m}^3$ , y  $p_B = 1.2 \times 10^3 \text{ Pa}$ . Hallar  $Q$ ,  $W$ , y  $\Delta E_{\text{int}}$  para cada uno de los tres procesos y para el ciclo.

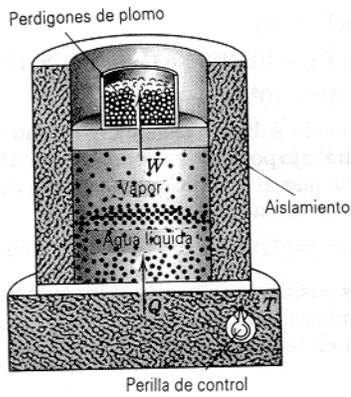
**Solución** El primer paso es hallar los valores de  $p$ ,  $V$ , y  $T$  en cada punto. En el punto A, se nos dan  $p_A$  y  $V_A$ , y podemos resolver para  $T_A$  a partir de la ley del gas ideal:

$$T_A = \frac{p_A V_A}{nR} = \frac{(3.2 \times 10^3 \text{ Pa})(0.21 \text{ m}^3)}{(0.75 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})} = 108 \text{ K}.$$

En el punto B, se nos dan  $p_B$  y  $V_B (= V_A)$ , y podemos hallar a  $T$  similarmente:

$$T_B = \frac{p_B V_B}{nR} = \frac{(1.2 \times 10^3 \text{ Pa})(0.21 \text{ m}^3)}{(0.75 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})} = 40 \text{ K}.$$

En el punto C, sabemos que  $p_C (= p_B)$  y que  $T_C (= T_A)$ , porque el proceso CA es isotérmico). Entonces podemos hallar  $V_C$ :



**Figura 15** Problema muestra 4. El agua está hirviendo a presión constante. El calor fluye desde el depósito hasta que el agua ha sido cambiada completamente a vapor. Se efectúa un trabajo cuando el gas en expansión levanta al émbolo.

$$V_C = \frac{nRT_C}{p_C} = \frac{(0.75 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(108 \text{ K})}{1.2 \times 10^3 \text{ Pa}} = 0.56 \text{ m}^3.$$

Con esta información, podemos ahora calcular la transferencia de calor, el trabajo efectuado, y el cambio en energía interna para cada proceso. Para el proceso 1 ( $AB$ ), tenemos

$$Q_1 = nC_v(T_B - T_A) = (0.75 \text{ mol})(20.8 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(40 \text{ K} - 108 \text{ K}) = -1060 \text{ J},$$

$$W_1 = 0 \quad (\text{proceso a volumen constante}),$$

$$\Delta E_{\text{int},1} = Q_1 + W_1 = -1060 \text{ J} + 0 = -1060 \text{ J}.$$

El sistema transfiere energía al entorno como calor durante el proceso 1, y su temperatura cae, correspondiendo a un cambio negativo en la energía interna.

Para el proceso a presión constante 2 ( $BC$ ), obtenemos

$$Q_2 = nC_p(T_C - T_B) = (0.75 \text{ mol})(29.1 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(108 \text{ K} - 40 \text{ K}) = 1480 \text{ J},$$

$$W_2 = -p(V_C - V_B) = -(1.2 \times 10^3 \text{ Pa})(0.56 \text{ m}^3 - 0.21 \text{ m}^3) = -420 \text{ J},$$

$$\Delta E_{\text{int},2} = Q_2 + W_2 = 1480 \text{ J} + (-420 \text{ J}) = 1060 \text{ J}.$$

Se transfiere energía al gas como calor durante el proceso 2 y, al dilatarse, el gas efectúa trabajo sobre su entorno (el entorno efectúa un trabajo negativo sobre el gas).

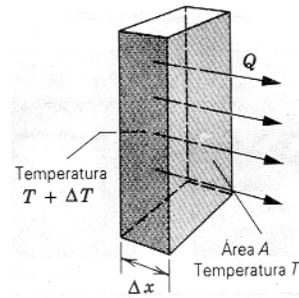
A lo largo de la isoterma ( $CA$ ), el trabajo está dado por la ecuación 27 del capítulo 23:

$$W_3 = -nRT_C \ln \frac{V_A}{V_C} = -(0.75 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(108 \text{ K}) \ln \frac{0.21 \text{ m}^3}{0.56 \text{ m}^3} = 660 \text{ J},$$

$$\Delta E_{\text{int},3} = 0 \quad (\text{proceso isotérmico}),$$

$$Q_3 = \Delta E_{\text{int},3} - W_3 = 0 - 660 \text{ J} = -660 \text{ J}.$$

Para el ciclo, tenemos



**Figura 16** El calor  $Q$  fluye a través de una losa rectangular de material de espesor  $\Delta x$  y área  $A$ .

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = -1060 \text{ J} + 1480 \text{ J} + (-660 \text{ J}) = -240 \text{ J},$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = 0 + (-420 \text{ J}) + 660 \text{ J} = 240 \text{ J},$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \Delta E_{\text{int},1} + \Delta E_{\text{int},2} + \Delta E_{\text{int},3} = -1060 \text{ J} + 1060 \text{ J} + 0 = 0.$$

Nótese que, como era de esperarse para el ciclo,  $\Delta E_{\text{int}} = 0$  y  $Q = -W$ . El trabajo total para el ciclo es positivo, como lo esperamos para un ciclo que se efectúa en la dirección antihoraria.

## 25-7 LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Hemos discutido la transferencia de calor entre un sistema y su entorno, pero no hemos descrito aún cómo tiene lugar la transferencia. Existen tres mecanismos: conducción, convección, y radiación. Explicaremos cada uno de ellos por orden.

### Conducción

Si dejamos un atizador metálico en la lumbre durante cualquier periodo de tiempo, su mango se calienta. Se transfiere energía de la lumbre al mango por *conducción* a lo largo de la longitud del mango de metal. En virtud de la alta temperatura en ese extremo, los átomos del extremo caliente están vibrando con una amplitud grande. Estas amplitudes vibratorias grandes pasan a lo largo del mango, de átomo a átomo, debido a las interacciones entre átomos adyacentes. De esta manera recorre una región de temperatura elevada a lo largo del mango hacia nuestra mano.

Consideremos una losa delgada de material homogéneo de espesor  $\Delta x$  y área  $A$  en su sección transversal (Fig. 16). La temperatura es  $T + \Delta T$  en una cara y  $T$  en la otra. Por experimentación, describimos varias características sobre la razón  $H = Q/\Delta t$  a la cual será transferida una pequeña cantidad de calor  $Q$  a través de la losa en un tiempo  $\Delta t$ . La razón de flujo calorífico a través de la losa es (1) directamente proporcional a  $A$ : cuanto mayor sea el área dispo-

**TABLA 5 ALGUNAS CONDUCTIVIDADES TERMICAS Y VALORES DE R.<sup>†</sup>**

Material	Conductividad (W/m · K)	Valor de R (ft <sup>2</sup> · F° · h/Btu)
<b>Metales</b>		
Acero inoxidable	14	0.010
Plomo	35	0.0041
Aluminio	235	0.00061
Cobre	401	0.00036
Plata	428	0.00034
<b>Gases</b>		
Aire (seco)	0.026	5.5
Helio	0.15	0.96
Hidrógeno	0.18	0.80
<b>Materiales de construcción</b>		
Espuma de poliuretano	0.024	5.9
Lana mineral	0.043	3.3
Fibra de vidrio	0.048	3.0
Pino blanco	0.11	1.3
Vidrio de ventanería	1.0	0.14

<sup>†</sup> Los valores son a la temperatura ambiente. Nótese que los valores de *k* están dados en unidades SI y los de *R* en las unidades británicas acostumbradas. Los valores de *R* son para una losa de 1 in de espesor.

nible, más calor fluirá por unidad de tiempo; (2) inversamente proporcional a  $\Delta x$ : cuanto más gruesa sea la losa, menos calor fluirá por unidad de tiempo; y (3) directamente proporcional a  $\Delta T$ : cuanto más grande sea la diferencia de temperatura, más calor fluirá por unidad de tiempo. [Estos resultados experimentales proporcionan claves para minimizar la pérdida de calor en su casa durante el invierno: haga que el área de la superficie sea más pequeña (una casa de dos plantas es más eficiente que una casa de una planta con la misma área total); use paredes gruesas llenas de material aislante; y, quizá lo más importante, cámbiese a un clima más templado.]

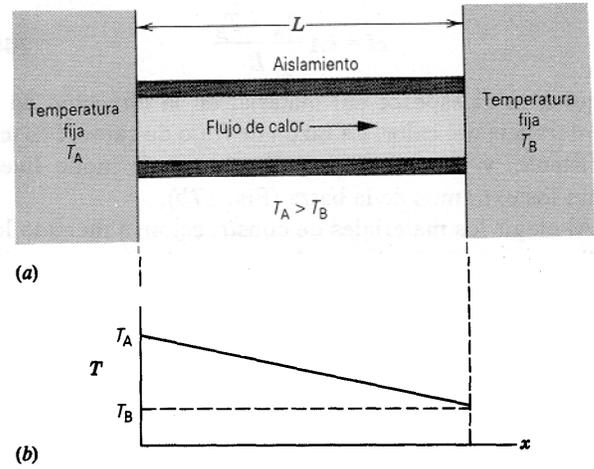
Matemáticamente, podemos resumir estos resultados experimentales como:

$$H = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

Introduciendo una constante de proporcionalidad *k*, llamada *conductividad térmica* (no debe confundirse con la constante de Boltzmann), podemos escribir

$$H = \frac{Q}{\Delta t} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}. \tag{45}$$

Una sustancia con un valor grande de *k* es buena conductora del calor; una con un valor pequeño de *k* es mala conductora, o buena aislante. En el caso de los sólidos, las propiedades de los materiales pueden hacerlos buenos conductores *eléctricos* (por ejemplo, la capacidad de los electrones de moverse con relativa facilidad en todo el volumen del material) así como también buenos conductores *térmicos*. La tabla 5 muestra algunos valores repre-



**Figura 17** (a) Conducción de calor a través de una barra conductora aislada. (b) Variación de la temperatura a lo largo de la barra.

sentativos de *k*. Dentro de la gama de temperaturas que encontramos normalmente, podemos considerar a *k* como una constante, pero en gamas de temperatura más amplias se muestra una ligera variación con *T*. Nótese que los sólidos, aun aquellos que consideramos comúnmente como aislantes, tienen conductividades más elevadas que los gases.

Consideremos dos límites de aplicabilidad de la ecuación 45. Veamos primero el caso de una barra larga de longitud *L* y sección transversal uniforme *A*, donde un extremo se mantiene a la temperatura elevada *T<sub>A</sub>* y el otro extremo a la temperatura baja *T<sub>B</sub>* (Fig. 17). Esto es, los extremos de las barras están sumergidos en depósitos térmicos, de modo que uno puede abastecer una cantidad ilimitada de calor y seguir manteniendo la temperatura *T<sub>A</sub>*, mientras que el otro puede absorber una cantidad ilimitada de calor y aún mantener la temperatura *T<sub>B</sub>*. (Un depósito puede ser de un material de masa mayor que la barra, y por lo tanto tener una capacidad calorífica tan grande que el calor que fluye hacia, o desde la barra es despreciable, o bien que el depósito pueda ser conectado a una máquina de calor como un horno o un refrigerador que pueda abastecer o absorber calor continuamente a costa de trabajo externo. Una mezcla de agua y hielo a 0°C o una mezcla de vapor y agua a 100°C pueden ser consideradas también como un depósito térmico.)

Llamamos a esto una situación de *estado estacionario*: las temperaturas y la cantidad de calor transferido son constantes en el tiempo. En esta situación, todo incremento de calor *Q* que entre a la barra por el extremo caliente sale de ella por el extremo frío. Puesto de otra manera, mediríamos la misma razón de transferencia de calor a través de cualquier sección transversal a lo largo de la longitud de la barra.

Para este caso, podemos escribir la ecuación 45 así:

$$H = kA \frac{T_A - T_B}{L} \quad (46)$$

Aquí  $L$  es el espesor del material en la dirección de la transferencia del calor. La razón de flujo de calor  $H$  es una constante, y la temperatura disminuye de modo lineal entre los extremos de la barra (Fig. 17b).

Al elegir los materiales de construcción, a menudo los hallamos caracterizados por la *resistencia térmica* o valor de  $R$ , definido por

$$R = \frac{L}{k}. \quad (47)$$

Entonces, cuanto más baja sea la conductividad, mayor será el valor de  $R$ : los buenos aislantes tienen valores de  $R$  altos. Numéricamente, el valor de  $R$  se obtiene de acuerdo con la ecuación 47 expresada en las unidades británicas,  $\text{ft}^2 \cdot \text{F}^\circ \cdot \text{h/Btu}$ . El valor de  $R$  se determina para un cierto espesor del material. Por ejemplo, un espesor de 1 in de fibra de vidrio tiene un  $R = 3$  en el sistema británico, mientras que un espesor de 1 in de madera tiene una  $R = 1$  en el sistema británico, y por lo tanto, conduce calor a 3 veces la razón de la fibra de vidrio. Una pulgada de aire tiene un  $R = 5$  en el sistema británico, pero el aire es un mal aislante térmico porque puede transferir más calor por convección, y la conductividad térmica no es entonces una buena medida del valor aislante del aire. La tabla 5 muestra los valores de  $R$  para algunos materiales.

Consideraremos ahora el caso en que la losa tenga un espesor infinitesimal  $dx$  y una diferencia de temperatura  $dT$  a través de su espesor. En este límite, obtenemos

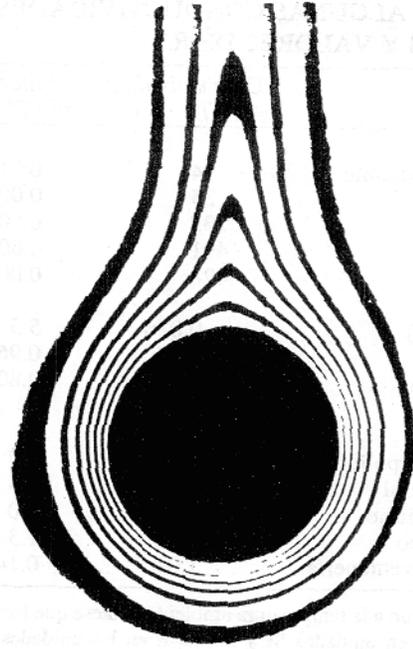
$$H = -kA \frac{dT}{dx}. \quad (48)$$

A menudo se conoce a la derivada  $dT/dx$  como el *gradiente de temperatura*, siendo la palabra "gradiente" un término matemático general para la derivada de una variable escalar con respecto a una coordenada específica. Como una variable,  $x$  indica la dirección del flujo de calor y, por lo tanto, introducimos un signo menos en la ecuación 48 como un recordatorio de que el calor fluye en la dirección de  $dT/dx$  decreciente.

La ecuación 48 tiene una aplicabilidad particular en los casos en que la sección transversal del material no sea uniforme. Usaremos esta forma diferencial en la solución del problema muestra 7.

## Convección

Si se mira a la llama de una vela o de un cerillo, estamos viendo que la energía calorífica es transportada hacia arriba por *convección*. La transferencia de calor por convección ocurre cuando un fluido, tal como el aire o el agua, está en contacto con un objeto cuya temperatura es más alta que la de su entorno. La temperatura del fluido que



**Figura 18** El aire se eleva por convección alrededor de un cilindro calentado. Las áreas oscuras representan regiones de temperatura uniforme.

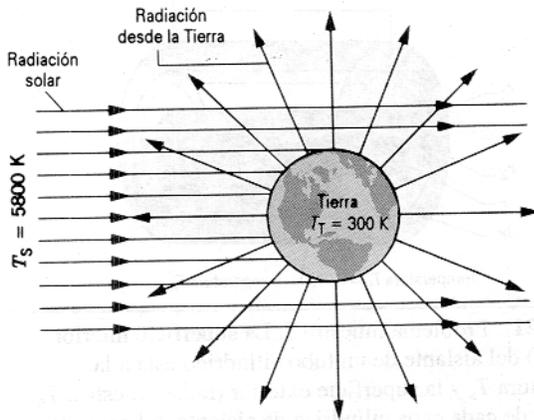
está en contacto con el objeto caliente aumenta, y (en la mayoría de los casos) el fluido se dilata. Por ser menos denso que el fluido más frío circundante, se eleva a causa de las fuerzas de flotación; véase la figura 18. El fluido más frío circundante cae para tomar el lugar del fluido que se eleva, más caliente, y se establece una circulación por convección.

La convección atmosférica juega un papel fundamental en la determinación de los patrones climáticos globales y en nuestras variaciones diarias del tiempo. Los pilotos de los planeadores y los cóndores buscan por igual las corrientes por termoconvección que los mantienen en vuelo al elevarse desde la Tierra, más caliente. En los océanos tienen lugar enormes transferencias de energía por el mismo proceso. La región exterior del Sol, llamada *fotosfera*, contiene una vasta ordenación de celdas de convección que transportan energía a la superficie solar y dan a la superficie una apariencia granulada.

Hemos estado describiendo la convección *libre* o *natural*. La convección puede también ser forzada, como cuando el soplador de un horno provoca que la circulación del aire caliente las habitaciones de una casa.

## Radiación

La energía es transportada desde el Sol hasta nosotros por medio de ondas electromagnéticas que viajan libremente



**Figura 19** La radiación solar es interceptada por la Tierra y en su mayor parte absorbida. La temperatura  $T_T$  de la Tierra se ajusta por sí misma a un valor en el que la pérdida de calor de la Tierra por radiación es precisamente igual al calor solar que absorbe.

a través del casi vacío del espacio intermedio. Si nos paramos cerca de una fogata, nos calentamos mediante el mismo proceso. Todos los objetos emiten esa radiación electromagnética a causa de su temperatura y también absorben parte de la radiación que cae sobre ellos a partir de otros objetos. Cuanto más alta sea la temperatura de un objeto, más irradiará. En el capítulo 49 de la versión ampliada de este texto veremos que la energía irradiada por un objeto es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. Por ejemplo, la temperatura promedio de nuestra Tierra es de cerca de 300 K, a causa de que a esa temperatura la Tierra irradia energía al espacio a la misma razón que la que recibe del Sol; véase la figura 19.

**Problema muestra 6** Consideremos una losa compuesta, que consta de dos materiales con espesores diferentes,  $L_1$  y  $L_2$ , y diferentes conductividades térmicas,  $k_1$  y  $k_2$ . Si las temperaturas de las superficies exteriores son  $T_2$  y  $T_1$ , halle la cantidad del calor transferido a través de la losa compuesta (Fig. 20) en un estado estacionario.

**Solución** Sea  $T_x$  la temperatura en la superficie de contacto entre los dos materiales. Entonces la razón de calor transferido a través de la losa 2 es

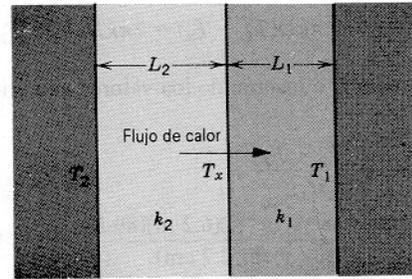
$$H_2 = \frac{k_2 A (T_2 - T_x)}{L_2}$$

y la razón a través de la losa 1 es

$$H_1 = \frac{k_1 A (T_x - T_1)}{L_1}$$

En el estado estacionario  $H_2 = H_1$ , de modo que

$$\frac{k_2 A (T_2 - T_x)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_x - T_1)}{L_1}$$



**Figura 20** Problema muestra 6. Conducción de calor a través de dos capas de material con conductividades térmicas diferentes.

Hagamos que  $H$  sea la razón de transferencia de calor (la misma para todas las secciones). Entonces, resolviendo para  $T_x$  y sustituyendo en cualquiera de las ecuaciones para  $H_1$  o para  $H_2$ , obtenemos

$$H = \frac{A(T_2 - T_1)}{(L_1/k_1) + (L_2/k_2)} = \frac{A(T_2 - T_1)}{R_1 + R_2}$$

La extensión a cualquier número de secciones en serie es

$$H = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum(L_i/k_i)} = \frac{A(T_2 - T_1)}{\sum R_i} \quad (49)$$

**Problema muestra 7** Una tubería metálica cilíndrica delgada transporta vapor a una temperatura de  $T_s = 100^\circ\text{C}$ . El tubo tiene un diámetro de 5.4 cm y está forrado con un espesor de 5.2 cm de fibra de vidrio aislante. A través de un salón pasa una tubería de longitud  $D = 6.2$  m en que la temperatura es  $T_r = 11^\circ\text{C}$ . (a) ¿Cuánto calor se pierde a través del aislante? (b) ¿Cuánto aislante adicional debe ser añadido para reducir a la mitad la pérdida de calor?

**Solución** (a) La figura 21 ilustra la geometría apropiada para el cálculo. En el estado estacionario, a través de cada capa cilíndrica delgada, como la que se indica por medio de líneas discontinuas en la figura 21, pasará la misma cantidad constante de flujo de calor  $H$ . Podemos considerar a esta capa como una placa de material que tiene un espesor  $dr$  y un área de  $2\pi rD$ . Aplicando la ecuación 48 a esta geometría, tenemos

$$H = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rD) \frac{dT}{dr}$$

o sea

$$H \frac{dr}{r} = -2\pi kD dT$$

Suponemos que la tubería metálica delgada está a la temperatura del vapor, de modo que no interviene en el cálculo. Integramos a partir del radio interior  $r_1$  del aislante a la temperatura  $T_s$  al radio exterior  $r_2$  a la temperatura  $T_r$ :

$$\int_{r_1}^{r_2} H \frac{dr}{r} = -2\pi kD \int_{T_s}^{T_r} dT$$

Sacando la constante  $H$  de la integral de la izquierda y llevando a cabo las integraciones, obtenemos

$$H \ln \frac{r_2}{r_1} = -2\pi kD(T_R - T_S) = 2\pi kD(T_S - T_R).$$

Resolviendo para  $H$  e insertando los valores numéricos, hallamos

$$\begin{aligned} H &= \frac{2\pi kD(T_S - T_R)}{\ln(r_2/r_1)} \\ &= \frac{2\pi(0.048 \text{ W/m}\cdot\text{K})(6.2 \text{ m})(89 \text{ K})}{\ln(7.9 \text{ cm}/2.7 \text{ cm})} = 155 \text{ W}. \end{aligned}$$

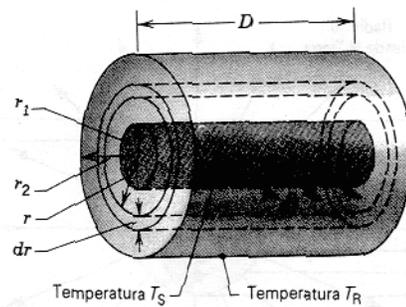
(b) Para reducir la pérdida de calor a la mitad, debemos aumentar  $r_2$  al valor  $r_2'$ , de modo que el denominador de la expresión de arriba para  $H$  resulte el doble de grande; esto es,

$$\frac{\ln(r_2'/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} = 2.$$

Resolviendo para  $r_2'$ , hallamos

$$r_2' = \frac{r_2^2}{r_1} = \frac{(7.9 \text{ cm})^2}{2.7 \text{ cm}} = 23 \text{ cm}.$$

Entonces, ¡necesitamos casi cuatro veces el espesor del aislante para reducir la transferencia de calor a la mitad!. Este efecto es debido al aumento de área, y por lo tanto al aumento de masa, contenidos en cada capa delgada cuando aumentamos el radio en la geometría cilíndrica. Existe más material disponible para conducir calor a los radios exteriores, y por lo tanto debemos



**Figura 21** Problema muestra 7. La superficie interior (radio  $r_1$ ) del aislante de un tubo cilíndrico está a la temperatura  $T_S$  y la superficie exterior (radio  $r_2$ ) está a  $T_R$ . A través de cada capa cilíndrica de aislante, tal como la intermedia de espesor  $dr$  y radio  $r$  que se muestra con líneas de puntos, fluye el mismo calor  $Q$ .

suministrar una cantidad creciente de aislante al crecer  $r$ . Esto difiere de la geometría lineal, en la cual el calor transferido disminuye linealmente al aumentar el espesor del aislante. En la geometría esférica (que pudiera ser apropiada para calcular el calor perdido a partir del núcleo de la Tierra hacia su superficie), el cálculo es también diferente; véase el problema 61.

## PREGUNTAS

1. La temperatura y el calor se confunden a menudo, como cuando decimos "hoy hará frío". A modo de ejemplo, distinga estos dos conceptos tan cuidadosamente como pueda.
2. Dé un ejemplo de un proceso en que no se transfiera ningún calor a o desde el sistema pero la temperatura del sistema cambie.
3. ¿Es el equivalente mecánico del calor un concepto físico o simplemente un factor de conversión para convertir energía de unidades de calor a unidades mecánicas y viceversa?
4. ¿Puede considerarse el calor como una forma de energía almacenada (o potencial)? ¿Contradice tal interpretación al concepto de calor como energía en el proceso de transferencia debida a una diferencia de temperatura?
5. ¿Puede añadirse calor a una sustancia sin causar que la temperatura de la sustancia se eleve? De ser así, ¿contradice esto el concepto de calor como energía en el proceso de transferencia debido a una diferencia de temperatura?
6. ¿Por qué debe suministrarse energía calorífica para fundir hielo si, después de todo, la temperatura no cambia?
7. Explique el hecho de que la presencia de un cuerpo grande de agua cercano, como el mar o el océano, tiende a moderar los extremos de temperatura del clima en la tierra adyacente.
8. Cuando se calienta el hielo se funde, formando un líquido, y luego hierve. Sin embargo, cuando se calienta bióxido de carbono sólido se convierte directamente al estado de vapor (decimos que *se sublima*) sin pasar por el estado líquido. ¿Cómo podría producirse bióxido de carbono líquido?
9. En tiempo de hielo se colocan unas ollas con agua caliente y fría. Explique (a) si las ollas tienen tapa, el agua fría se congelará primero pero (b) si las ollas no tienen tapa, es posible que el agua caliente se congele primero.
10. El aumento de presión siempre favorece la condensación y por lo general favorece la solidificación. Explique estas tendencias del cambio de estado en términos microscópicos.
11. ¿Por qué aumenta con la presión la temperatura de ebullición de un líquido?
12. Un bloque de madera y un bloque de metal están a la misma temperatura. Cuando los bloques se sienten fríos, el metal se siente más frío que la madera; cuando los bloques se sienten calientes, el metal se siente más caliente que la madera. Explique. ¿A qué temperatura se sentirán los bloques igualmente fríos o calientes?
13. ¿Cómo puede usted usar mejor una cucharilla para enfriar una taza de café? Agitándola, lo cual implica efectuar un trabajo, parecería calentar al café en vez de enfriarlo.
14. ¿Por qué, durante el frío las plantas quedan protegidas bajo una capa de nieve? En las temporadas de heladas, los productores de cítricos en Florida rocían a menudo sus frutos con agua, a sabiendas de que se congelará. ¿Por qué ayuda esto?

15. Explique por qué las bajas temperaturas y el fuerte viento causan daños en la piel expuesta a la intemperie.
16. Es más probable que un vaso grueso se raje antes que uno delgado cuando se pone agua caliente en él. ¿Por qué?
17. Usted introduce su mano en el horno caliente para retirar una cacerola y se quema los dedos con ella. Sin embargo, el aire en el horno está a la misma temperatura que la cacerola y usted no se quema los dedos con él. ¿Por qué no?
18. Los obreros de la industria metalúrgica saben que pueden sumergir su mano breves momentos en el metal fundido caliente sin sufrir quemadura. Explique.
19. ¿Por qué debe usarse un aislante más grueso en un ático que o buhardilla que en las paredes de una casa?
20. ¿Está siempre a 0°C el hielo? ¿Puede estar más frío? ¿Puede estar más caliente? ¿Qué sucede si hay una mezcla de agua y hielo?
21. (a) ¿Puede calentarse el hielo a una temperatura por encima de los 0°C sin que se funda? Explique. (b) ¿Puede enfriarse el agua a una temperatura abajo de 0°C sin que se congele? Explique. (Véase "The Undercooling of Liquids", por David Turnbull, *Scientific American*, enero de 1965, pág. 38).
22. Explique por qué los dedos se pegan a una charola metálica de hielos que acaba de sacarse del refrigerador.
23. El agua de una marmita hace un ruido burbujeante notable cuando se la calienta hasta la ebullición. Sin embargo, una vez que comienza a hervir, cesa el ruido. ¿Cuál es la explicación? (*Sugerencia:* Piense en el destino de una burbuja de vapor que se eleva desde el fondo de la marmita antes de que el agua se caliente uniformemente.)
24. Es difícil "hervir" un huevo en agua en la cima de una montaña muy alta porque el agua hierve allí a una temperatura relativamente baja. ¿Cuál es una manera sencilla y práctica de vencer esta dificultad?
25. ¿Se cocerá un huevo (en 3 minutos normalmente) más rápidamente si el agua está hirviendo con fuerza que si está hirviendo despacio a fuego lento?
26. El agua es un enfriador mucho mejor que la mayoría de los líquidos. ¿Por qué? ¿Habrá ejemplos en que pudiera preferirse otro líquido?
27. Explique por qué cabría esperar que el calor latente de vaporización de una sustancia fuese considerablemente mayor que su calor latente de fusión.
28. Explique por qué el calor específico a presión constante es mayor que el calor específico a volumen constante.
29. ¿Por qué se desprecia a menudo la diferencia entre  $C_p$  y  $C_v$  en los sólidos?
30. Los gases reales siempre se enfrían al efectuar una expansión libre, mientras que un gas ideal no. Explique.
31. Exponga las similitudes y especialmente las diferencias entre calor, trabajo, y energía interna.
32. Explique el proceso de congelación del agua desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica. Recuerde que el hielo ocupa un volumen más grande que una masa igual de agua.
33. Una botella termo contiene café. El termo es sacudido vigorosamente. Considere al café como el sistema. (a) ¿Se eleva su temperatura? (b) ¿Se le ha añadido calor? (c) ¿Se ha efectuado un trabajo sobre él? (d) ¿Ha cambiado su energía interna?
34. ¿Se conserva la temperatura de un sistema aislado (que no tiene interacción con el entorno)? Explique.
35. ¿Es el calor lo mismo que la energía interna? Si no, dé un ejemplo en el que la energía interna de un sistema cambie sin haber un flujo de calor a través de la frontera del sistema.
36. ¿Puede usted decir si la energía interna de un cuerpo fue adquirida por transferencia de calor o por efectos del trabajo?
37. Si se dan la presión y el volumen de un sistema, ¿queda siempre determinada la temperatura?
38. Teniendo en cuenta que la energía interna de un cuerpo consta de la energía cinética y la energía potencial de sus partículas, ¿cómo distinguiría usted entre la energía interna de un cuerpo y su temperatura?
39. Los gases dentro de dos recipientes idénticos están a 1 atm de presión y a la temperatura ambiente. Uno contiene gas helio (monoatómico, masa molar = 4 g/mol) y el otro contiene un número igual de moles de gas argón (monoatómico, masa molar = 40 g/mol). Si 1 J de calor añadido al gas helio aumenta su temperatura en una cantidad determinada, ¿qué cantidad de calor debe añadirse al gas argón para aumentar su temperatura en la misma cantidad?
40. Explique cómo podríamos mantener un gas a temperatura constante durante un proceso termodinámico.
41. ¿Por qué es más común excitar una radiación a partir de átomos gaseosos por medio del uso de una descarga eléctrica que por medio de métodos térmicos?
42. Hemos visto que la "conservación de la energía" es una ley universal de la naturaleza. Al mismo tiempo, los líderes en las naciones nos instan a cada uno de nosotros a "conservar la energía" (por ejemplo, conduciendo más despacio). Explique los dos significados bastante diferentes de esa recomendación.
43. En un día invernal la temperatura de la superficie interior de una pared es mucho más baja que la temperatura de la habitación y la de la superficie exterior es mucho más alta que la temperatura ambiente exterior. Explique.
44. Los mecanismos fisiológicos que mantienen la temperatura interna de una persona actúan dentro de un intervalo limitado de temperatura externa. Explique cómo puede extenderse este intervalo en ambos extremos con el uso de la ropa. (Véase "Heat, Cold, and Clothing", por James B. Kelley, *Scientific American*, febrero de 1956, pág. 109.)
45. ¿Qué requisitos, a su juicio, debería llenar un material para uso como utensilio de cocina para una buena conductividad térmica, determinada capacidad calorífica, y coeficiente de dilatación?
46. Tanto la conducción del calor como la propagación de las ondas implican la transferencia de energía. ¿Existe alguna diferencia en principio entre estos dos fenómenos?
47. ¿Puede transferirse por radiación la energía calorífica a través de la materia? De ser así, dé un ejemplo. Si no es así, explique por qué.

48. ¿Por qué los utensilios de cocina de acero inoxidable suelen tener una capa de cobre o de aluminio en el fondo?
49. Considere que el calor puede ser transferido por convección y radiación, así como por conducción, y explique

por qué una botella de termo tiene pared doble, y ésta está al vacío y es plateada.

50. Un lago se congela primero en su superficie. ¿Participa la convección en este fenómeno? ¿Qué sucede con la conducción y la radiación?

## PROBLEMAS

### Sección 25-2 Capacidad calorífica y calor específico

- En cierta casa con energía solar, se almacena energía del sol en barriles llenos con agua. En un lapso de cinco días nublados de invierno, se necesitaron 5.22 GJ para mantener el interior de la casa a 22.0°C. Suponiendo que el agua de los barriles estuviera a 50.0°C, ¿qué volumen de agua se necesitó?
- Los icebergs del norte del Atlántico presentan peligros a la navegación (véase la Fig. 22), provocando que la longitud de las rutas de navegación aumente en casi un 30% durante la estación de icebergs. Entre los intentos para destruirlos se cuentan la utilización de explosivos, el bombardeo, el torpedeo, la desintegración, el uso de arietes, y la pintura con negro de humo. Suponga que se intenta la fusión directa del iceberg colocando fuentes de calor en el hielo. ¿Cuánto calor se requeriría para fundir el 10% de un iceberg de 210,000 toneladas métricas? (Una tonelada métrica = 1000 kg.)

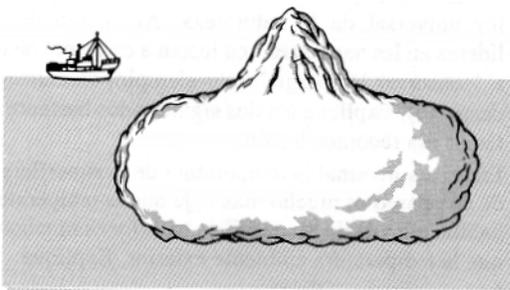


Figura 22 Problema 2.

- ¿Cuánta agua permanece sin congelar después de haber extraído 50.4 kJ de calor de 258 g de agua líquida inicialmente a 0°C?
- Un objeto de 6.50 kg de masa cae desde una altura de 50.0 m y, por medio de una transmisión mecánica, hace girar a una rueda de paletas que agita 520 g de agua. El agua está inicialmente a 15°C. ¿Cuál es la máxima elevación posible de la temperatura?
- (a) Calcule el aumento posible de la temperatura del agua que pasa por las Cataratas del Niágara, de 49.4 m de altura. (b) ¿Qué factores tenderían a impedir esta posible elevación?
- Un pequeño calentador eléctrico por inmersión se utiliza para hervir 136 g de agua para una taza de café instantáneo. El calentador es de 220 watts. Calcule el tiempo necesario para llevar esta agua de 23.5°C al punto de ebullición, despreciando cualquier pérdida de calor.
- Un tazón de 146 g de cobre contiene 223 g de agua; tanto el tazón como el agua están a 21.0°C. Se deja caer en el agua un cilindro de cobre muy caliente de 314 g. Esto hace que el agua hierva, convirtiéndose 4.70 g en vapor, y la temperatura final de todo el sistema es de 100°C. (a) ¿Cuánto calor se transfirió al agua? (b) ¿Cuánto al tazón? (c) ¿Cuál era la temperatura original del cilindro?
- Un atleta necesita perder peso y decide hacerlo levantando pesas. (a) ¿Cuántas veces debe levantar una pesa de 80.0 kg a una altura de 1.30 m para quemar 1 lb de grasa, suponiendo que se requieren 3500 Cal para hacerlo? (b) Si la pesa se levanta una vez cada 4 s, ¿cuánto tiempo le tomará?
- Calcule la cantidad mínima de calor necesario para fundir completamente 130 g de plata inicialmente a 16.0°C. Suponga que el calor específico no cambia con la temperatura. Véanse las tablas 1 y 2.
- Un termómetro de 0.055 kg de masa y 46.1 J/K de capacidad calorífica indica 15.0°C. Luego se le sumerge completamente en 0.300 kg de agua y llega a la misma temperatura final del agua. Si el termómetro indica 44.4°C, ¿cuál era la temperatura del agua antes de la inmersión del termómetro, despreciando otras pérdidas de calor?
- Un jefe de cocina quien, una mañana se encuentra que la estufa no funciona, decide hervir agua para café sacudiéndola en un termo. Suponga que el "chef" usa 560 cm<sup>3</sup> de agua de la llave a 59°F, y que el agua cae 35 cm en cada sacudida, ejecutando el "chef" 30 sacudidas por minuto. Despreciando cualquier pérdida de energía. ¿Durante cuánto tiempo estará sacudiendo el frasco antes de que hierva el agua?
- En un calentador solar de agua, los colectores del tejado, dentro de cuyos tubos circula el agua, captan energía del sol. La radiación solar entra al colector a través de una cubierta transparente y calienta el agua en los tubos; esta agua es bombeada a un tanque de depósito. Suponiendo que la eficiencia de todo el sistema sea de 20% (es decir, se pierde el 80% de la energía solar incidente en el sistema), ¿qué área del colector es necesaria para sacar agua de un tanque de 200 L y elevar su temperatura de 20 a 40°C

en 1.0 h? La intensidad de la luz solar incidente es de  $700 \text{ W/m}^2$ .

13. Una marmita eléctrica de aluminio tiene una masa de  $0.560 \text{ kg}$  y contiene un elemento calefactor de  $2.40 \text{ kW}$ . Se llena con  $0.640 \text{ l}$  de agua a  $12.0^\circ\text{C}$ . ¿Cuánto tiempo se necesitará (a) para que comience la ebullición y (b) para que la marmita se quede seca? (Suponga que la temperatura de la marmita no sobrepasa los  $100^\circ\text{C}$  en ningún momento.)
14. Para medir el calor específico de un líquido se emplea un *calorímetro de flujo*. Se añade calor en una cantidad conocida a una corriente del líquido que pasa por el calorímetro con un volumen conocido. Entonces, una medición de la diferencia de temperatura resultante entre los puntos de entrada y salida de la corriente de líquido nos permite calcular el calor específico del líquido. Un líquido de  $0.85 \text{ g/cm}^3$  de densidad fluye a través de un calorímetro a razón de  $8.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Se añade calor por medio de un calentador eléctrico en espiral de  $250 \text{ W}$ , y se establece una diferencia de temperatura de  $15^\circ\text{C}$  en condiciones de estado estacionario entre los puntos de entrada y salida del flujo. Halle el calor específico del líquido.
15. El agua estancada a cielo abierto a  $32^\circ\text{C}$  se evapora a causa del escape de algunas de las moléculas de su superficie. El calor de vaporización es aproximadamente igual a  $\epsilon n$ , en donde  $\epsilon$  es la energía media de las moléculas que escapan y  $n$  es el número de moléculas por kilogramo. (a) Halle  $\epsilon$ . (b) ¿Cuál es la razón entre  $\epsilon$  y la energía cinética promedio de las moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , suponiendo que la energía cinética se relaciona con la temperatura de la misma manera que lo hace en los gases?
16. ¿Qué masa de vapor a  $100^\circ\text{C}$  debe mezclarse con  $150 \text{ g}$  de hielo a  $0^\circ\text{C}$ , en un recipiente térmicamente aislado, para producir agua líquida a  $50^\circ\text{C}$ ?
17. Una persona prepara una cantidad de té helado mezclando  $520 \text{ g}$  del té caliente (esencialmente agua) con una masa igual de hielo a  $0^\circ\text{C}$ . ¿Cuáles son la temperatura final y la masa de hielo restante si el té caliente está inicialmente a una temperatura de (a)  $90.0^\circ\text{C}$  y (b)  $70.0^\circ\text{C}$ ?
18. (a) Dos cubos de hielo de  $50 \text{ g}$  cada uno se dejan caer en  $200 \text{ g}$  de agua en un vaso. Si el agua estaba inicialmente a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , y el hielo venía directamente de un congelador a  $-15^\circ\text{C}$ , ¿cuál es la temperatura final de la bebida? (b) Si sólo se hubiera usado un cubo de hielo en (a), ¿cuál sería la temperatura final de la bebida? Desprecie la capacidad calorífica del vaso.
19. Un anillo de cobre de  $21.6 \text{ g}$  tiene un diámetro de  $2.54000 \text{ cm}$  a la temperatura de  $0^\circ\text{C}$ . Una esfera de aluminio tiene un diámetro de  $2.54533 \text{ cm}$  a la temperatura de  $100^\circ\text{C}$ . La esfera se sitúa sobre el anillo (Fig. 23), y se deja que ambos lleguen al equilibrio térmico, sin que se disipe calor alguno al entorno. La esfera pasa justamente a través del anillo a la temperatura de equilibrio. Halle la masa de la esfera.

**Sección 25-3 Capacidades caloríficas de los sólidos**

20. Cierta sustancia tiene una masa molar de  $51.4 \text{ g/mol}$ . Cuando se añaden  $320 \text{ J}$  de calor a una muestra de  $37.1 \text{ g}$

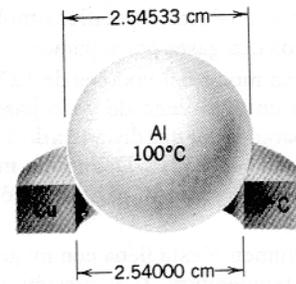


Figura 23 Problema 19.

de este material, su temperatura se eleva de  $26.1$  a  $42.0^\circ\text{C}$ . (a) Halle el calor específico de la sustancia. (b) ¿Cuántos moles de la sustancia están presentes? (c) Calcule la capacidad calorífica molar de la sustancia.

21. Cerca del cero absoluto la capacidad calorífica molar del aluminio varía con la temperatura absoluta  $T$  y está dada por  $C = (3.16 \times 10^{-5})T^3$ , en  $\text{J/mol} \cdot \text{K}$ . Cuánto calor se necesita para elevar la temperatura de  $1.2 \text{ g}$  de aluminio de  $6.6$  a  $15 \text{ K}$ ?
22. Se encuentra que la capacidad calorífica molar de la plata, medida a la presión atmosférica, varía con la temperatura entre  $50$  y  $100 \text{ K}$  según la ecuación empírica

$$C = 0.318T - 0.00109T^2 - 0.628,$$

donde  $C$  está en  $\text{J/mol} \cdot \text{K}$  y  $T$  está en  $\text{K}$ . Calcule la cantidad de calor necesario para elevar  $316 \text{ g}$  de plata desde de  $50.0$  a  $90.0 \text{ K}$ . La masa molar de plata es  $107.87 \text{ g/mol}$ .

23. Partiendo de la figura 3, calcule la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de  $0.45 \text{ mol}$  de carbono de  $200$  a  $500 \text{ K}$ . (Sugerencia: Aproxime la curva real en esta región con un segmento de línea recta.)

**Sección 25-4 Capacidades caloríficas de un gas ideal**

24. La masa de un átomo de helio es de  $6.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ . Calcule el calor específico a volumen constante del gas helio (en  $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ) a partir de la capacidad calorífica molar a volumen constante.
25. En un experimento, se calientan  $1.35 \text{ mol}$  de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) a presión constante comenzando en  $11.0^\circ\text{C}$ . ¿Cuánto calor debe añadirse al gas para duplicar su volumen?
26. Se calientan doce gramos de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) en un tanque de acero de  $25.0$  a  $125^\circ\text{C}$ . (c) ¿Cuántos moles de nitrógeno están presentes? (b) ¿Cuánto calor se transfiere al nitrógeno?
27. Una muestra de  $4.34 \text{ mol}$  de un gas diatómico ideal experimenta un aumento de temperatura de  $62.4 \text{ K}$  bajo condiciones de presión constante. (a) ¿Cuánto calor se añadió al gas? (b) ¿En cuánto aumentó la energía interna del gas? Véase la ecuación 36 del capítulo 23. (c) ¿En cuánto aumentó la energía cinética interna de traslación del gas?
28. Un recipiente contiene una mezcla de tres gases no reactivos:  $n_1$  moles del primer gas con calor específico molar a volumen constante  $C_{1v}$ , y así sucesivamente. Halle el calor específico molar a volumen constante de la mezcla,

en términos de los calores específicos molares y de las cantidades de los tres gases por separado.

29. La masa atómica molar del yodo es de 127 g. Una onda estacionaria en un tubo lleno de yodo gaseoso a 400 K tiene nodos separados por una distancia de 6.77 cm cuando la frecuencia es de 1000 Hz. Determine mediante estos datos si el yodo gaseoso es un gas monoatómico o diatómico.
30. Una sala de volumen  $V$  está llena con un gas ideal diatómico (aire) a temperatura  $T_1$  y presión  $p_0$ . El aire se calienta a una temperatura más alta  $T_2$ , permaneciendo la presión constante en  $p_0$ , ya que las paredes de la sala no son herméticas. Demuestre que el contenido de energía interna del aire que permanece en la sala es el mismo a  $T_1$  y  $T_2$  y que la energía suministrada por el horno para calentar el aire se ha ido toda para calentar el aire exterior a la sala. Si no añadimos energía al aire, ¿por qué preocuparse por encender el horno? (Desprecie la energía del horno empleada para elevar la temperatura de las paredes, y considere únicamente la energía empleada para elevar la temperatura del aire.)

**Sección 25-6 Aplicaciones de la primera ley**

31. Una muestra de  $n$  moles de un gas ideal experimenta una expansión isotérmica. Halle el flujo de calor hacia el gas en términos de los volúmenes inicial y final y de la temperatura.
32. Un gas encerrado en una cámara pasa por el ciclo mostrado en la figura 24. Determine el calor neto añadido al gas durante el proceso  $CA$  si  $Q_{AB} = 20$  J,  $Q_{BC} = 0$ , y  $W_{BCA} = -15$  J.

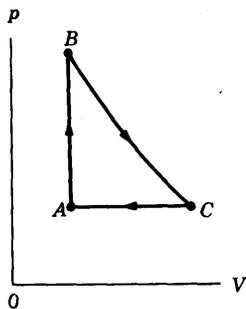


Figura 24 Problema 32.

33. Considere que se efectúa un trabajo de 214 J sobre un sistema y que se extraen 293 J de calor del sistema. En el sentido de la primera ley de la termodinámica, ¿cuáles son los valores (incluyendo los signos algebraicos) de (a)  $W$ , (b)  $Q$ , y (c)  $\Delta E_{int}$ ?
34. La figura 25a muestra un cilindro que contiene gas, el cual está confinado por medio de un émbolo móvil. El cilindro está sumergido en una mezcla de hielo y agua. El émbolo se empuja rápidamente hacia abajo de la posición 1 a la posición 2. El émbolo se mantiene en la posición 2 hasta que el gas está de nuevo a  $0^\circ\text{C}$  y luego se le eleva lentamente

de regreso a la posición 1. La figura 25b es un diagrama  $pV$  del proceso. Si durante el ciclo se funden 122 g de hielo, ¿cuánto trabajo se efectuó sobre el gas?

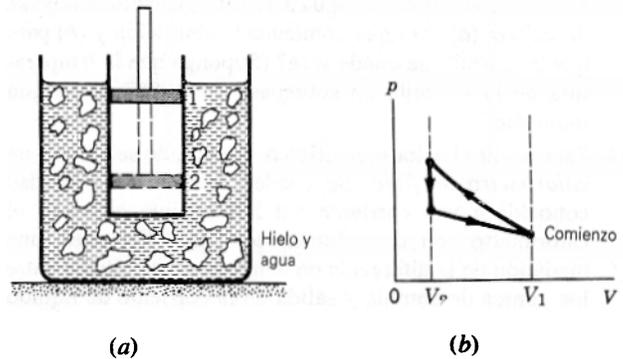


Figura 25 Problema 34.

35. (a) Un gas ideal monoatómico inicialmente a  $19.0^\circ\text{C}$  es comprimido súbitamente a un décimo de su volumen original. ¿Cuál es su temperatura después de la compresión? (b) Haga el mismo cálculo para un gas diatómico.
36. Una cantidad de gas ideal ocupa un volumen inicial  $V_0$  a una presión  $p_0$  y una temperatura  $T_0$ . Se dilata hasta el volumen  $V_1$  (a) a presión constante, (b) a temperatura constante, (c) adiabáticamente. Grafique cada caso en un diagrama  $pV$ . ¿En qué caso es  $Q$  máximo? ¿Mínimo? ¿En qué caso es  $W$  máximo? ¿Mínimo? ¿En qué caso es  $\Delta E_{int}$  máximo? ¿Mínimo?
37. Una cantidad de gas monoatómico ideal consta de  $n$  moles inicialmente a la temperatura  $T_1$ . La presión y el volumen se duplican luego lentamente de manera que se traza una línea recta en un diagrama  $pV$ . En términos de  $n$ ,  $R$ , y  $T_1$ , halle (a)  $W$ , (b)  $\Delta E_{int}$ , y (c)  $Q$ . (d) Si fuésemos a definir un calor específico equivalente para este proceso, ¿cuál sería su valor?
38. En la figura 11, suponga los siguientes valores:  $p_i = 2.20 \times 10^5$  Pa,  $V_i = 0.0120$  m<sup>3</sup>,  $p_f = 1.60 \times 10^5$  Pa,  $V_f = 0.0270$  m<sup>3</sup>. Halle el valor de  $Q$ ,  $W$ , y  $Q + W$  para cada una de las tres trayectorias mostradas. (Sugerencia: Halle  $p$ ,  $V$ ,  $T$  en los puntos  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Suponga un gas monoatómico ideal.)
39. Cuando un sistema se lleva del estado  $i$  al estado  $f$  a lo largo de la trayectoria  $iaf$  en la figura 26, se encuentra que  $Q = 50$  J y  $W = -20$  J. A lo largo de la trayectoria  $ibf$ ,  $Q = 36$  J. (a) ¿Qué valor tiene  $W$  a lo largo de la trayectoria  $ibf$ ? (b) Si  $W = +13$  J para la trayectoria curva de regreso  $fi$ , ¿qué valor tiene  $Q$  en esta trayectoria? (c) Considere que  $E_{int,i} = 10$  J. ¿Cuánto vale  $E_{int,f}$ ? (d) Si  $E_{int,b} = 22$  J, halle  $Q$  para el proceso  $ib$  y para el proceso  $bf$ .
40. Un gas dentro de una cámara experimenta los procesos mostrados en el diagrama  $pV$  de la figura 27. Calcule el calor neto añadido al sistema durante un ciclo completo.
41. Sea 20.9 J el calor añadido a determinado gas ideal. Como resultado, su volumen cambia de 63.0 a 113 cm<sup>3</sup> mientras que la presión permanece constante a 1.00 atm. (a) ¿En cuánto cambió la energía interna del gas? (b) Si la cantidad

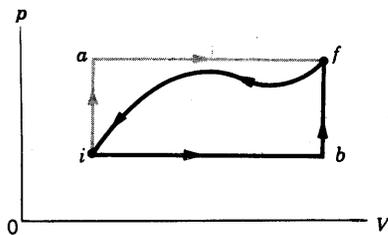


Figura 26 Problema 39.

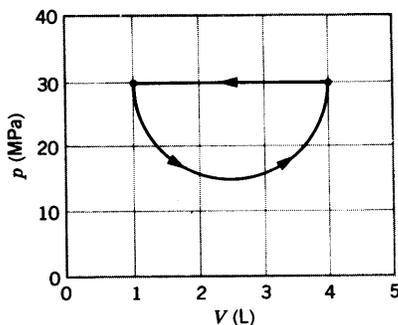


Figura 27 Problema 40.

de gas presente es de  $2.00 \times 10^{-3}$  mol, halle la capacidad calorífica molar a presión constante. (c) Halle la capacidad calorífica molar a volumen constante.

42. La temperatura de 3.15 mol de un gas poliatómico ideal se eleva 52.0 K mediante cada uno de los tres procesos dinámicos diferentes: a volumen constante, a presión constante, y según una compresión adiabática. Complete una tabla que muestre, para cada procedimiento, el calor añadido, el trabajo efectuado sobre el gas, el cambio de energía interna del gas, y el cambio de la energía cinética total de traslación de las moléculas del gas.
43. Una máquina lleva 1.00 mol de un gas monoatómico ideal alrededor del ciclo mostrado en la figura 28. El proceso *AB* tiene lugar a volumen constante, el proceso *BC* es adiabático, y el proceso *CA* tiene lugar a presión constante. (a) Calcule el calor *Q*, el cambio en la energía interna  $\Delta E_{int}$ , y el trabajo *W* para cada uno de los tres procesos y para el ciclo en total. (b) Si la presión inicial en el punto *A* es de 1.00 atm, halle la presión y el volumen en los puntos *B* y *C*. Use  $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  y  $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ .
44. Un cilindro tiene un émbolo de metal de 2.0 kg bien ajustado con área en su sección transversal de  $2.0 \text{ cm}^2$  (figura 29). El cilindro contiene agua y vapor a temperatura constante. Se observa que el émbolo desciende lentamente a razón de  $0.30 \text{ cm/s}$  ya que fluye calor hacia afuera del cilindro a través de sus paredes. Cuando esto sucede, parte del vapor se condensa en la cámara. La densidad del vapor dentro de la cámara es de  $6.0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$  y la presión atmosférica es de 1.0 atm. (a) Calcule la cantidad de condensación del vapor. (b) ¿A qué cantidad está saliendo el calor de la cámara? (c) ¿Cuál es la cantidad de cambio de la energía interna del vapor y del agua dentro de la cámara?

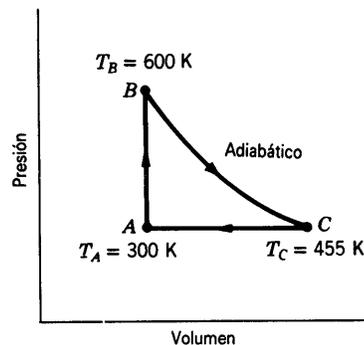


Figura 28 Problema 43.

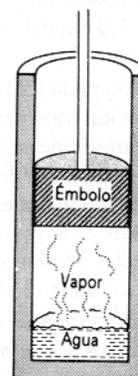


Figura 29 Problema 44.

45. En el motor de una motocicleta, después de que ocurre la combustión en la parte superior del cilindro, el émbolo es forzado hacia abajo mientras la mezcla de los productos gaseosos experimenta una expansión adiabática. Halle la potencia promedio implicada en esta expansión cuando el motor está girando a 4000 rpm, suponiendo que la presión indicada inmediatamente después de la combustión es de 15.0 atm, el volumen inicial es de  $50.0 \text{ cm}^3$ , y el volumen de la mezcla al final de la carrera, de  $250 \text{ cm}^3$ . Suponga que los gases son diatómicos y que el tiempo implicado en la expansión es la mitad del tiempo total del ciclo.

**Sección 25-7 La transferencia de calor**

46. Calcule la cantidad de calor que se perdería en un día de invierno muy frío a través de una pared de ladrillos de  $6.2 \text{ m} \times 3.8 \text{ m}$  y 32 cm de espesor. La temperatura del interior es de  $26^\circ \text{C}$  y la temperatura del exterior es de  $-18^\circ \text{C}$ ; suponga que la conductividad térmica del ladrillo es de  $0.74 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .
47. La cantidad promedio a que fluye el calor a través de la superficie de la Tierra en América del Norte es de  $54 \text{ mW/m}^2$ , y la conductividad térmica promedio de las rocas cercanas a la superficie es de  $2.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Suponiendo una temperatura en la superficie de  $10^\circ \text{C}$ , ¿cuál sería la temperatura a una profundidad de 33 km (cerca de la base de la corteza)? Desprecie el calor generado por los elementos radiactivos; puede ignorarse también la curvatura de la Tierra.

48. (a) Calcule la cantidad a la cual fluye el calor del cuerpo a través de la ropa de un esquiador, dados los datos siguientes: el área de la superficie del cuerpo es de  $1.8 \text{ m}^2$  y la ropa tiene un espesor de  $1.2 \text{ cm}$ ; la temperatura de la piel es de  $33^\circ\text{C}$ , mientras que la superficie exterior de la ropa está a  $1.0^\circ\text{C}$ ; la conductividad térmica de la ropa es de  $0.040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . (b) ¿Cuál sería el cambio en la respuesta si, después de una caída, las ropas del esquiador quedasen empapadas de agua? Suponga que la conductividad térmica del agua es de  $0.60 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .
49. Considere la placa mostrada en la figura 16. Suponga que  $\Delta x = 24.9 \text{ cm}$ ,  $A = 1.80 \text{ m}^2$ , y que el material es cobre. Si  $T = -12.0^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 136^\circ\text{C}$ , y que se alcanza el estado permanente, halle (a) el gradiente de temperatura, (b) la cantidad del calor transferido, y (c) la temperatura en un punto de la placa a  $11.0 \text{ cm}$  del extremo de mayor temperatura.
50. Una barra cilíndrica de plata de  $1.17 \text{ m}$  de longitud y  $4.76 \text{ cm}^2$  de área en su sección transversal se aísla para impedir la pérdida de calor a través de su superficie. Los extremos se mantienen a una diferencia de temperatura de  $100^\circ\text{C}$  colocando un extremo en una mezcla de agua y hielo y el otro en agua hirviendo y vapor. (a) Halle la cantidad a la que se transfiere el calor a lo largo de la barra. (b) Calcule la cantidad a la que se funde el hielo en el extremo frío.
51. Para cubrir una abertura de área  $2A$  se dispone de cuatro piezas cuadradas de dos materiales aislantes diferentes, todas con el mismo espesor y área  $A$ . Esto puede hacerse en cualquiera de las dos maneras mostradas en la figura 30. ¿Cuál de los arreglos, (a) o (b), daría el menor flujo de calor, siendo  $k_2 \neq k_1$ ?

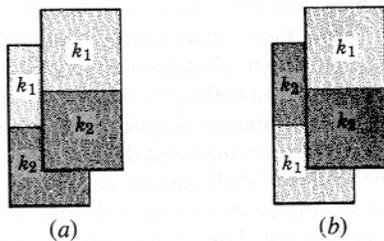


Figura 30 Problema 51.

52. Demuestre que la temperatura  $T_x$  en la superficie de contacto de una placa compuesta (véase el problema muestra 6) está dada por

$$T_x = \frac{R_1 T_1 + R_2 T_2}{R_1 + R_2}$$

53. Un alambre largo de tungsteno de un calefactor está tiene una especificación de  $3.08 \text{ kW/m}$  y un diámetro de  $0.520 \text{ mm}$ . Está empotrado a lo largo del eje de un cilindro de cerámica de  $12.4 \text{ cm}$  de diámetro. Cuando se opera a la potencia especificada, el alambre está a  $1480^\circ\text{C}$  y el exterior del cilindro está a  $22.0^\circ\text{C}$ . Calcule la conductividad térmica de la cerámica.
54. Dos barras rectangulares de metal idénticas están soldadas a tope como se muestra en la figura 31a, y a través de las

barras fluyen  $10 \text{ J}$  de calor en  $2.0 \text{ min}$ . ¿Cuánto tiempo transcurriría para que fluyesen  $30 \text{ J}$  a través de las barras si están soldadas como se muestra en la figura 31b?

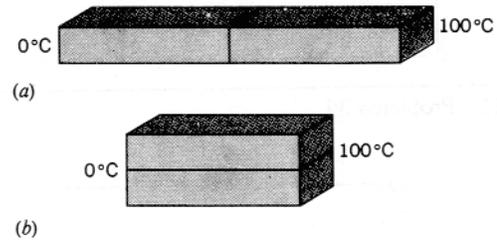


Figura 31 Problema 54.

55. Calcule la cantidad de pérdida de calor a través del vidrio de una ventana de  $1.4 \text{ m}^2$  de área y  $3.0 \text{ mm}$  de espesor si la temperatura del exterior es de  $-20^\circ\text{F}$  y la temperatura del interior es de  $+72^\circ\text{F}$ . (b) Se instala una ventana contra tormentas que tiene el mismo espesor de vidrio pero con un claro de aire de  $7.5 \text{ cm}$  entre las dos ventanas. ¿Cuál será la cantidad de pérdida de calor correspondiente suponiendo que la conducción sea el único mecanismo importante de pérdida de calor?
56. Calcule la cantidad de flujo de calor a través de dos puertas contra tormentas de  $1.96 \text{ m}$  de altura y  $0.770 \text{ m}$  de ancho. (a) Una puerta está hecha de láminas de aluminio de  $1.50 \text{ mm}$  de espesor y una hoja de vidrio de  $3.10 \text{ mm}$  que cubre el  $75.0\%$  de su superficie (se considera que el marco estructural tiene un área despreciable). (b) La segunda puerta está hecha enteramente de abeto con  $2.55 \text{ cm}$  de espesor. Considere que la caída de temperatura a través de las puertas es de  $33.0^\circ\text{C}$  ( $= 59.4^\circ\text{F}$ ). Véase la tabla 5.
57. En la figura 32 se muestra una representación idealizada de la temperatura del aire en función de la distancia desde una ventana de un solo vidrio en un día de invierno en calma. Las dimensiones de la ventana son  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 0.50 \text{ cm}$ . (a) ¿En qué cantidad fluye el calor hacia fuera de la ventana? (Sugerencia: La caída de temperatura a través del vidrio es muy pequeña.) (b) Calcule la diferencia de temperatura entre las superficies interior y exterior del vidrio.
58. Un tanque de agua ha estado a la intemperie en un clima frío hasta que se formó en su superficie una capa de hielo de  $5.0 \text{ cm}$  de espesor (Fig. 33). El aire sobre el hielo está a  $-10^\circ\text{C}$ . Calcule la razón de formación de hielo (en  $\text{cm}$  por hora) en el fondo de la capa de hielo. Considere que la conductividad térmica y la densidad del hielo son  $1.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  y  $0.92 \text{ g/cm}^3$ . Suponga que no fluye calor a través de las paredes del tanque.
59. Se ha formado hielo en un estanque poco profundo y se ha alcanzado un estado estacionario estando el aire de encima del hielo a  $-5.20^\circ\text{C}$  y el fondo del estanque a  $3.98^\circ\text{C}$ . Si la profundidad total del hielo + agua es de  $1.42 \text{ m}$ , ¿qué espesor tiene el hielo? (Suponga que las conductividades térmicas del hielo y el agua son de  $1.67$  y  $0.502 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , respectivamente.)

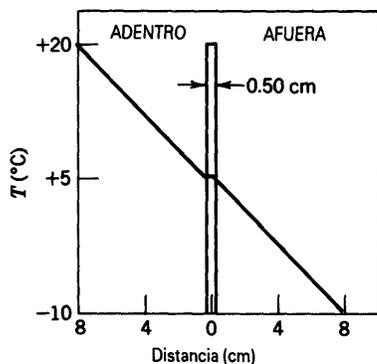


Figura 32 Problema 57.

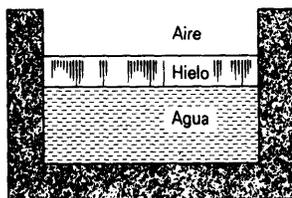


Figura 33 Problema 58.

60. La estructura de una pared consta de un marco de 20 ft × 12 ft hecho de 16 puntales verticales de 2 × 4, cada uno de 12 ft de altura y colocados a 16 in centro a centro. El exterior de la pared está recubierto con hojas de madera chapeada de  $\frac{1}{4}$  in de espesor ( $R = 0.30$ ) y hojas de abeto de  $\frac{3}{4}$  in ( $R = 0.98$ ). El interior está recubierto de yeso de  $\frac{1}{4}$  in ( $R = 0.47$ ), y el espacio entre los puntales está lleno de espuma de poliuretano ( $R = 5.9$  para una capa de 1 in.) Un puntal de "dos por cuatro" tiene realmente un tamaño de 1.75 in × 3.75 in. Suponga que están hechos de madera para la cual  $R = 1.3$  para un tablero de 1 in. (a) ¿A qué

razón fluye el calor a través de esta pared para un diferencia de temperatura de 30 F°? (b) ¿Cuál es el valor de  $R$  para la pared así estructurada? (c) ¿Qué fracción del área de la pared contiene puntales, en comparación con el área de espuma? (d) ¿Qué fracción del flujo de calor pasa a través de los puntales, en comparación con el que pasa por la espuma?

61. Suponiendo que  $k$  sea constante, demuestre que la cantidad radial de flujo de calor en una sustancia entre dos esferas concéntricas está dada por

$$H = \frac{(T_1 - T_2)4\pi kr_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

en donde la esfera interior tiene un radio  $r_1$  y una temperatura  $T_1$ , y la esfera exterior tiene un radio  $r_2$  y una temperatura  $T_2$ .

62. (a) Utilice los datos del problema 47 para calcular la cantidad a la que fluye el calor hacia afuera a través de la superficie de la Tierra. (a) Suponga que este flujo de calor se debe a la presencia de un núcleo caliente en la Tierra y que este núcleo tenga un radio de 3470 km. Suponga también que el material que está entre el núcleo y la superficie de la Tierra no contiene fuentes de calor y tiene una conductividad térmica promedio de 4.2 W/m · K. Use el resultado del problema 61 para calcular la temperatura del núcleo. (Suponga que la superficie de la Tierra está a 0°C.) La respuesta que se obtiene es demasiado grande por un factor de aproximadamente 10. ¿Por qué?

63. A bajas temperaturas (por debajo de unos 50 K), la conductividad térmica de un metal es proporcional a la temperatura absoluta: es decir,  $k = aT$ , donde  $a$  es una constante con un valor numérico que depende del metal en particular. Demuestre que la razón de flujo de calor a través de una barra de longitud  $L$  y área  $A$  en su sección transversal y cuyos extremos están a las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  está dada por

$$H = \frac{aA}{2L} (T_1^2 - T_2^2).$$

(Desprecie la pérdida de calor de la superficie.)