

Ahora dirigimos nuestra atención al estudio de la termodinámica, que involucra situaciones en las que la temperatura o el estado (sólido, líquido, gas) de un sistema cambia debido a las transferencias de energía. Como veremos, la termodinámica explica con mucho éxito las propiedades generales de la materia y la correlación entre estas propiedades y la mecánica de los átomos y las moléculas.

Históricamente, el desarrollo de la termodinámica fue paralelo al desarrollo de la teoría atómica de la materia. En la década de 1820, los experimentos químicos proporcionaron pruebas sólidas de la existencia de los átomos. En ese momento, los científicos reconocieron que debe existir una conexión entre la termodinámica y la estructura de la materia. En 1827, el botánico Robert Brown informó que los granos de polen suspendidos en un líquido se mueven erráticamente de un lugar a otro como si estuvieran bajo constante agitación. En 1905, Albert Einstein utilizó la teoría cinética para explicar la causa de este movimiento errático, conocido hoy como movimiento browniano. Einstein explicó este fenómeno suponiendo que los granos están bajo el bombardeo constante de moléculas "invisibles" en el líquido, que se mueven de forma aleatoria. Esta explicación dio a los científicos una idea del concepto de movimiento molecular y dio crédito a la idea de que la materia está formada por átomos. Así se forjó una conexión entre el mundo cotidiano y los diminutos e invisibles bloques de construcción que conforman este mundo.

La termodinámica también aborda cuestiones más prácticas. ¿Se ha preguntado alguna vez cómo un refrigerador puede enfriar su contenido, o qué tipos de transformaciones ocurren en una planta de energía o en el motor de su automóvil, o qué sucede con la energía cinética de un objeto en movimiento cuando el objeto se detiene? Las leyes de la termodinámica se pueden utilizar para proporcionar explicaciones de estos y otros fenómenos.

# Termodinámica



El oleoducto Alyeska cerca del río Tazlina en Alaska. El petróleo en el oleoducto está tibio, y la transferencia de energía del oleoducto podría derretir el permafrost ambientalmente sensible en el suelo. Las estructuras con aletas en la parte superior de los postes de soporte son radiadores térmicos que permiten que la energía se transfiera al aire para proteger el permafrost. (Topham Picturepoint/La imagen funciona)



¿Por qué alguien que diseña una tubería incluiría estos bucles extraños?

Las tuberías que transportan líquidos a menudo contienen bucles para permitir la expansión y contracción a medida que cambia la temperatura. Estudiaremos la expansión térmica en este capítulo. (Lowell Georgia/CORBIS)

- 19.1 Temperatura y la Ley Cero de la Termodinámica
- 19.2 Termómetros y la Escala de Temperatura Celsius
- 19.3 El termómetro de gas de volumen constante y la escala de temperatura absoluta
- 19.4 Expansión térmica de sólidos y líquidos
- 19.5 Descripción macroscópica de un gas ideal

# 19 Temperatura

En nuestro estudio de la mecánica, definimos cuidadosamente conceptos como masa, fuerza y energía cinética para facilitar nuestro enfoque cuantitativo. Asimismo, una descripción cuantitativa de los fenómenos térmicos requiere definiciones cuidadosas de términos tan importantes como temperatura, calor y energía interna. Este capítulo comienza con una discusión sobre la temperatura.

A continuación, consideraremos la importancia al estudiar los fenómenos térmicos de la sustancia particular que estamos investigando. Por ejemplo, los gases se expanden apreciablemente cuando se calientan, mientras que los líquidos y los sólidos se expanden solo un poco.

Este capítulo concluye con un estudio de los gases ideales en la escala macroscópica.

Aquí nos interesan las relaciones entre cantidades tales como la presión, el volumen y la temperatura de un gas. En el Capítulo 21, examinaremos los gases a escala microscópica, utilizando un modelo que representa los componentes de un gas como partículas pequeñas.

## 19.1 Temperatura y Ley Cero de Termodinámica

A menudo asociamos el concepto de temperatura con qué tan caliente o frío se siente un objeto cuando lo tocamos. De esta forma, nuestros sentidos nos proporcionan una indicación cualitativa de la temperatura. Nuestros sentidos, sin embargo, no son confiables ya menudo nos engañan. Para

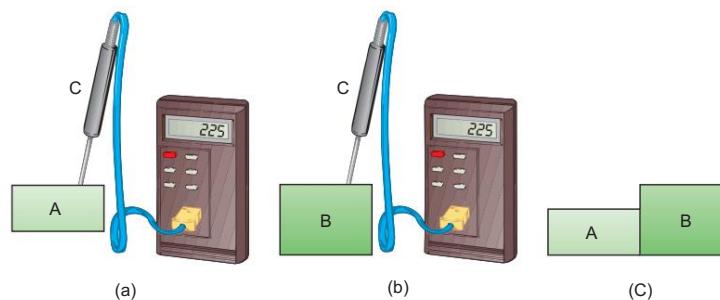


Figura 19.1 La ley cero de la termodinámica. (a, b) Si se mide que las temperaturas de A y B son iguales poniéndolas en contacto térmico con un termómetro (objeto C), no se intercambiará energía entre ellas cuando se pongan en contacto térmico entre sí (C).

Por ejemplo, si saca una bandeja de hielo de metal y una caja de cartón con verduras congeladas del congelador, la bandeja de hielo se siente más fría que la caja aunque ambas estén a la misma temperatura. Los dos objetos se sienten diferentes porque el metal transfiere energía por calor a un ritmo mayor que el cartón. Lo que necesitamos es un método fiable y reproducible para medir el calor o el frío relativos de los objetos en lugar de la tasa de transferencia de energía. Los científicos han desarrollado una variedad de termómetros para realizar tales mediciones cuantitativas.

Dos objetos a diferentes temperaturas iniciales eventualmente alcanzan una temperatura intermedia cuando se ponen en contacto entre sí. Por ejemplo, cuando se mezclan agua caliente y agua fría en una bañera, la temperatura final de la mezcla se encuentra entre las temperaturas inicial caliente y fría. Asimismo, cuando se deja caer un cubo de hielo en una taza de café caliente, el cubo de hielo se derrite y la temperatura del café disminuye.

Imagine que dos objetos se colocan en un contenedor aislado de tal manera que interactúan entre sí pero no con el medio ambiente. Si los objetos están a diferentes temperaturas, la energía se transfiere entre ellos, incluso si inicialmente no están en contacto físico entre sí. Los mecanismos de transferencia de energía del Capítulo 8 en los que nos centraremos son el calor y la radiación electromagnética. Para los propósitos de esta discusión, supongamos que dos objetos están en contacto térmico entre sí si estos procesos pueden intercambiar energía entre ellos debido a una diferencia de temperatura. El equilibrio térmico es una situación en la que dos objetos no intercambiarán energía por calor o radiación electromagnética si se pusieran en contacto térmico.

Consideremos dos objetos A y B, que no están en contacto térmico, y un tercer objeto C, que es nuestro termómetro. Deseamos determinar si A y B están en equilibrio térmico entre sí. Primero se coloca el termómetro (objeto C) en contacto térmico con el objeto A hasta que se alcanza el equilibrio térmico<sup>1</sup>, como se muestra en la figura 19.1a. A partir de ese momento, la lectura del termómetro se mantiene constante y registramos esta lectura. Luego se retira el termómetro del objeto A y se coloca en contacto térmico con el objeto B, como se muestra en la figura 19.1b.

La lectura se registra nuevamente después de alcanzar el equilibrio térmico. Si las dos lecturas son iguales, el objeto A y el objeto B están en equilibrio térmico entre sí. Si se ponen en contacto entre sí como en la figura 19.1c, no hay intercambio de energía entre ellos.

Podemos resumir estos resultados en un enunciado conocido como la ley cero de la termodinámica (la ley del equilibrio):

**Si los objetos A y B están separados en equilibrio térmico con un tercer objeto C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.**

**Ley cero de la termodinámica**

<sup>1</sup> Suponemos una cantidad insignificante de transferencias de energía entre el termómetro y el objeto A durante el proceso de equilibrio. Sin esta suposición, que también se hace para el termómetro y el objeto B, la medición de la temperatura de un objeto perturba el sistema de modo que la temperatura medida es diferente de la temperatura inicial del objeto. En la práctica, cada vez que mide una temperatura con un termómetro, mide el sistema perturbado, no el sistema original.

Esta afirmación se puede demostrar fácilmente de forma experimental y es muy importante porque nos permite definir la temperatura. Podemos pensar en la temperatura como la propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos. Dos objetos en equilibrio térmico entre sí están a la misma temperatura. Por el contrario, si dos objetos tienen diferentes temperaturas, no están en equilibrio térmico entre sí.

**Pregunta rápida 19.1** Dos objetos, con diferentes tamaños, masas y temperaturas, se colocan en contacto térmico. ¿En qué dirección viaja la energía? (a) La energía viaja del objeto más grande al objeto más pequeño. (b) La energía viaja del objeto con más masa al que tiene menos masa. (c) La energía viaja del objeto a mayor temperatura al objeto a menor temperatura.

## 19.2 Termómetros y Celsius

### La escala de temperatura

Los termómetros son dispositivos que se utilizan para medir la temperatura de un sistema. Todos los termómetros se basan en el principio de que alguna propiedad física de un sistema cambia a medida que cambia la temperatura del sistema. Algunas propiedades físicas que cambian con la temperatura son (1) el volumen de un líquido, (2) las dimensiones de un sólido, (3) la presión de un gas a volumen constante, (4) el volumen de un gas a presión constante, (5) la resistencia eléctrica de un conductor y (6) el color de un objeto.

Un termómetro común en el uso diario consta de una masa de líquido, generalmente mercurio o alcohol, que se expande en un tubo capilar de vidrio cuando se calienta (Fig. 19.2). En este caso, la propiedad física que cambia es el volumen de un líquido. Cualquier cambio de temperatura en el rango del termómetro se puede definir como proporcional al cambio en la longitud de la columna de líquido. El termómetro se puede calibrar poniéndolo en contacto térmico con un sistema natural que permanece a temperatura constante. Uno de estos sistemas es una mezcla de agua y hielo en equilibrio térmico a presión atmosférica. En la escala de temperatura Celsius, se define que esta mezcla tiene una temperatura de cero grados Celsius, que se escribe como  $0^{\circ}\text{C}$ ; esta temperatura se llama el punto de hielo del agua. Otro sistema comúnmente utilizado es una mezcla de agua y vapor en equilibrio térmico a presión atmosférica; su temperatura se define como  $100^{\circ}\text{C}$ , que es el punto de vapor del agua. Una vez establecidos los niveles de líquido en el termómetro en estos dos puntos, el

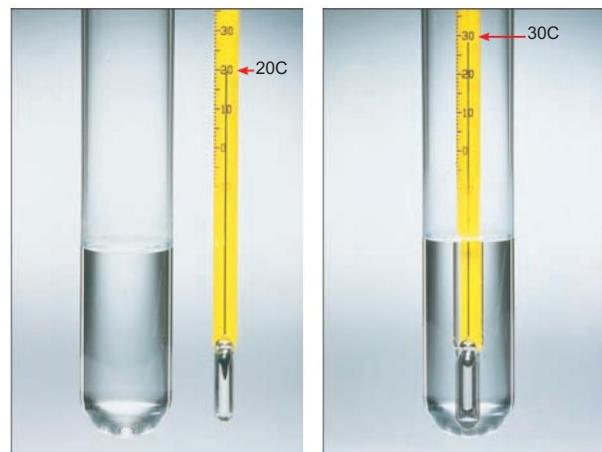


Figura 19.2 Como resultado de la expansión térmica, el nivel del mercurio en el termómetro aumenta a medida que el mercurio es calentado por el agua en el tubo de ensayo.

la longitud de la columna de líquido entre los dos puntos se divide en 100 segmentos iguales para crear la escala Celsius. Por lo tanto, cada segmento denota un cambio de temperatura de un grado Celsius.

Los termómetros calibrados de esta manera presentan problemas cuando se necesitan lecturas extremadamente precisas. Por ejemplo, las lecturas dadas por un termómetro de alcohol calibrado en los puntos de hielo y vapor del agua pueden coincidir con las que da un termómetro de mercurio solo en los puntos de calibración. Debido a que el mercurio y el alcohol tienen diferentes propiedades de expansión térmica, cuando un termómetro lee una temperatura de, por ejemplo, 50°C, el otro puede indicar un valor ligeramente diferente. Las discrepancias entre termómetros son especialmente grandes cuando las temperaturas a medir están lejos de los puntos de calibración.<sup>2</sup> Un problema

práctico adicional de cualquier termómetro es el rango limitado de temperaturas en las que se puede usar. Un termómetro de mercurio, por ejemplo, no puede usarse por debajo del punto de congelación del mercurio, que es de 39 °C, y un termómetro de alcohol no es útil para medir temperaturas superiores a 85 °C, el punto de ebullición del alcohol. Para superar este problema, necesitamos un termómetro universal cuyas lecturas sean independientes de la sustancia utilizada en él. El termómetro de gas, discutido en la siguiente sección, se acerca a este requisito.

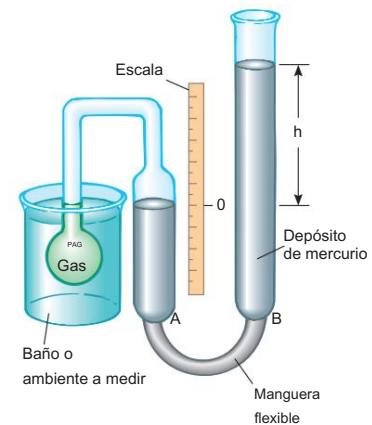


Figura 19.3 Un termómetro de gas de volumen constante mide la presión del gas contenido en el matraz sumergido en el baño. El volumen de gas en el matraz se mantiene constante subiendo o bajando el depósito B para mantener el nivel de mercurio en la columna A constante.

## 19.3 El termómetro de gas de volumen constante y la escala de temperatura absoluta

Una versión de un termómetro de gas es el aparato de volumen constante que se muestra en la figura 19.3. El cambio físico explotado en este dispositivo es la variación de la presión de un volumen fijo de gas con la temperatura. El matraz se sumerge en un baño de agua helada y el depósito de mercurio B se sube o baja hasta que la parte superior del mercurio en la columna A esté en el punto cero de la escala. La altura  $h$ , la diferencia entre los niveles de mercurio en el depósito B y la columna A, indica la presión en el matraz a 0°C.

A continuación, el matraz se sumerge en agua en el punto de vapor. El depósito B se vuelve a ajustar hasta que la parte superior del mercurio en la columna A esté nuevamente en cero en la escala, lo que asegura que el volumen del gas sea el mismo que cuando el matraz estaba en el baño de hielo (de ahí la designación "volumen constante"). Este ajuste del depósito B da un valor para la presión del gas a 100°C. Estos dos valores de presión y temperatura se grafican como se muestra en la Figura 19.4. La línea que conecta los dos puntos sirve como curva de calibración para temperaturas desconocidas. (Otros experimentos muestran que una relación lineal entre la presión y la temperatura es una muy buena suposición.) Para medir la temperatura de una sustancia, el matraz de gas de la figura 19.3 se coloca en contacto térmico con la sustancia y se ajusta la altura del depósito B, hasta que la parte superior de la columna de mercurio en A esté en cero en la escala. La altura de la columna de mercurio en B indica la presión del gas; conociendo la presión, la temperatura de la sustancia se encuentra utilizando el gráfico de la figura 19.4.

Ahora suponga que las temperaturas de diferentes gases a diferentes presiones iniciales se miden con termómetros de gas. Los experimentos muestran que las lecturas del termómetro son casi independientes del tipo de gas utilizado, siempre que la presión del gas sea baja y la temperatura esté muy por encima del punto en el que el gas se licua (Fig. 19.5). La concordancia entre los termómetros que utilizan varios gases mejora a medida que se reduce la presión.

Si extendemos las líneas rectas de la figura 19.5 hacia las temperaturas negativas, encontramos un resultado notable: en todos los casos, ¡la presión es cero cuando la temperatura es de 273,15 °C! Este hallazgo sugiere algún papel especial que debe jugar esta temperatura particular. Se utiliza como base para la escala de temperatura absoluta, que establece

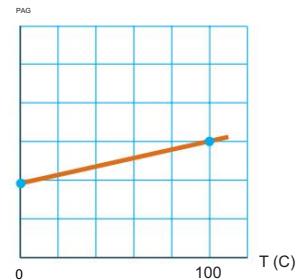


Figura 19.4 Gráfico típico de presión versus temperatura tomado con un termómetro de gas de volumen constante. Los dos puntos representan temperaturas de referencia conocidas (los puntos de hielo y vapor del agua).

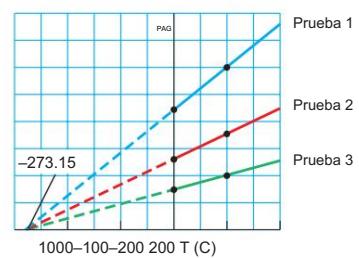


Figura 19.5 Presión versus temperatura para pruebas experimentales en las que los gases tienen diferentes presiones en un termómetro de gas de volumen constante. Observe que, para los tres ensayos, la presión se extrapola a cero a la temperatura de 273,15 °C.

<sup>2</sup> Dos termómetros que usan el mismo líquido también pueden dar lecturas diferentes, debido en parte a las dificultades para construir tubos capilares de vidrio de calibre uniforme.

## PREVENCIÓN DE ERRORES 19.1

Una cuestión de grado

Las notaciones para temperaturas en la escala Kelvin no usan el signo de grado. La unidad para una temperatura Kelvin es simplemente "kelvin" y no "grados Kelvin".

273,15°C como su punto cero. Esta temperatura a menudo se denomina cero absoluto. Se indica como un cero porque a una temperatura más baja, la presión del gas se volvería negativa, lo cual no tiene sentido. El tamaño de un grado en la escala de temperatura absoluta se elige para que sea idéntico al tamaño de un grado en la escala Celsius. Por lo tanto, la conversión entre estas temperaturas es

$$CT = T - 273,15$$

(19.1)

donde TC es la temperatura Celsius y T es la temperatura absoluta.

Debido a que los puntos de hielo y vapor son experimentalmente difíciles de duplicar y dependen de la presión atmosférica, en 1954 el Comité Internacional de Pesos y Medidas adoptó una escala de temperatura absoluta basada en dos nuevos puntos fijos. El primer punto es el cero absoluto. La segunda temperatura de referencia para esta nueva escala se eligió como el punto triple del agua, que es la combinación única de temperatura y presión a la que coexisten en equilibrio el agua líquida, el agua gaseosa y el hielo (agua sólida). Este punto triple se produce a una temperatura de 0,01°C y una presión de 4,58 mm de mercurio. En la nueva escala, que usa la unidad kelvin, la temperatura del agua en el punto triple se fijó en 273,16 kelvin, abreviado 273,16 K. Esta elección se hizo para que la antigua escala de temperatura absoluta basada en los puntos de hielo y vapor coincidiera estrechamente con la nueva escala basada en el punto triple. Esta nueva escala de temperatura absoluta (también llamada escala Kelvin) emplea la unidad SI de temperatura absoluta, el kelvin, que se define como 1/273,16 de la diferencia entre el cero absoluto y la temperatura del punto triple del agua.

La figura 19.6 da la temperatura absoluta para varios procesos y estructuras físicas. La temperatura del cero absoluto (0 K) no se puede alcanzar, aunque los experimentos de laboratorio se han acercado mucho, alcanzando temperaturas de menos de un nanokelvin.

Las escalas de temperatura Celsius, Fahrenheit y Kelvin<sup>3</sup> La ecuación 19.1

muestra que la temperatura Celsius TC se desplaza de la temperatura absoluta (Kelvin) T en 273,15°. Debido a que el tamaño de un grado es el mismo en las dos escalas, una diferencia de temperatura de 5 °C es igual a una diferencia de temperatura de 5 K. Las dos escalas difieren solo en la elección del punto cero. Por lo tanto, la temperatura del punto de hielo en la escala Kelvin, 273,15 K, corresponde a 0,00 °C, y el punto de vapor en la escala Kelvin, 373,15 K, equivale a 100,00 °C.

Una escala de temperatura común en el uso diario en los Estados Unidos es la escala Fahrenheit. Esta escala establece la temperatura del punto de hielo en 32°F y la temperatura del punto de vapor en 212°F. La relación entre las escalas de temperatura Celsius y Fahrenheit es

$$TF = \frac{9}{5}TC + 32°F$$

Podemos usar las ecuaciones 19.1 y 19.2 para encontrar una relación entre los cambios de temperatura en las escalas Celsius, Kelvin y Fahrenheit:

$$\frac{dTC}{dT} = \frac{5}{9} \frac{dTF}{dT}$$

De estas tres escalas de temperatura, solo la escala Kelvin se basa en un verdadero valor cero de temperatura. Las escalas Celsius y Fahrenheit se basan en un cero arbitrario asociado con una sustancia en particular, el agua, en un planeta en particular, la Tierra. Por lo tanto, si encuentra una ecuación que requiere una temperatura T o que implica una relación de temperaturas, debe convertir todas las temperaturas a grados Kelvin. Si la ecuación contiene un cambio en la temperatura T, el uso de temperaturas Celsius le dará la respuesta correcta, a la luz de la Ecuación 19.3, pero siempre es más seguro convertir las temperaturas a la escala Kelvin.

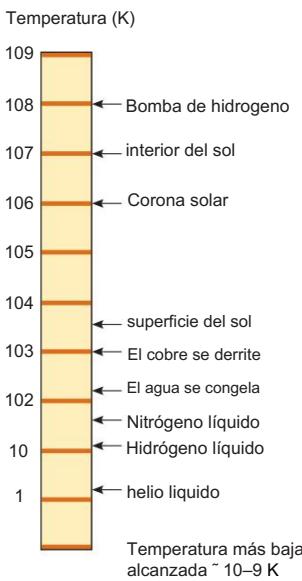


Figura 19.6 Temperaturas absolutas a las que ocurren varios procesos físicos. Note que la escala es logarítmica.

<sup>3</sup> Nombrado en honor a Anders Celsius (1701–1744), Daniel Gabriel Fahrenheit (1686–1736) y William Thomson, Lord Kelvin (1824–1907), respectivamente.

**Prueba rápida 19.2** Considere los siguientes pares de materiales. ¿Qué par representa dos materiales, uno de los cuales es el doble de caliente que el otro? (a) agua hirviendo a 100 °C, un vaso de agua a 50 °C (b) agua hirviendo a 100 °C, metano congelado a 50 °C (c) un cubo de hielo a 20 °C, llamas de un circo -comedor a 233°C (d) ninguno de estos pares

**EJEMPLO 19.1**

## Conversión de temperaturas

En un día en que la temperatura alcanza los 50 °F, ¿cuál es la temperatura en grados Celsius y en Kelvin?

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar En los Estados Unidos, una temperatura de 50°F es bien conocida. En muchas otras partes del mundo, sin embargo, esta temperatura puede no tener sentido porque la gente está familiarizada con la escala de temperatura Celsius.

Categorizar Este ejemplo es un problema de sustitución simple.

Sustituya la temperatura dada en la Ecuación 19.2:

$$CT = \frac{5}{9}TF + 32 = \frac{5}{9}(50) + 32 = 150.322$$

$$10^{\circ}\text{C}$$

Use la ecuación 19.1 para encontrar la temperatura Kelvin:

$$TTC = \frac{5}{9}(10) + 273.15 = 273.15^{\circ}\text{C}$$

$$283\text{K}$$

Un conjunto conveniente de equivalentes de temperatura relacionados con el clima a tener en cuenta es que 0 °C es (literalmente) congelación a 32 °F, 10 °C es fresco a 50 °F, 20 °C es temperatura ambiente, 30 °C es cálido a 86°F, y 40°C es un día caluroso a 104°F.

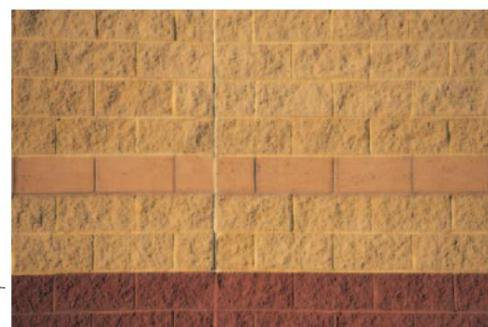
## 19.4 Expansión Térmica de Sólidos y Líquidos

Nuestra discusión sobre el termómetro de líquido hace uso de uno de los cambios más conocidos en una sustancia: a medida que aumenta su temperatura, aumenta su volumen. Este fenómeno, conocido como expansión térmica, juega un papel importante en numerosas aplicaciones de ingeniería. Por ejemplo, las juntas de dilatación térmica como las que se muestran en la figura 19.7 deben incluirse en edificios, carreteras de hormigón, vías férreas, paredes de ladrillo y puentes para compensar los cambios dimensionales que se producen a medida que cambia la temperatura.

La expansión térmica es una consecuencia del cambio en la separación promedio entre los átomos en un objeto. Para entender este concepto, modelemos los átomos como si estuvieran conectados por resortes rígidos como se discutió en la Sección 15.3 y se muestra



(a)



(b)

Figura 19.7 (a) Las juntas de dilatación térmica se utilizan para separar secciones de caminos en puentes. Sin estas juntas, las superficies se pandearían debido a la expansión térmica en los días muy calurosos o se agrietarían debido a la contracción en los días muy fríos. (b) La junta vertical larga se rellena con un material blando que permite que la pared se expanda y contraiga a medida que cambia la temperatura de los ladrillos.

en la figura 15.11b. A temperaturas ordinarias, los átomos de un sólido oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio con una amplitud de aproximadamente  $10^{11}$  m y una frecuencia de aproximadamente 1013 Hz. El espacio medio entre los átomos es de unos  $10^{10}$  m. A medida que aumenta la temperatura del sólido, los átomos oscilan con mayores amplitudes; como resultado, la separación promedio entre ellos aumenta.<sup>4</sup> En consecuencia, el objeto se expande.

Si la expansión térmica es suficientemente pequeña en relación con las dimensiones iniciales de un objeto, el cambio en cualquier dimensión es, en una buena aproximación, proporcional a la primera potencia del cambio de temperatura. Suponga que un objeto tiene una longitud inicial  $L_i$  a lo largo de alguna dirección a cierta temperatura y la longitud aumenta en una cantidad  $L_f$  para un cambio en la temperatura  $T$ . Debido a que es conveniente considerar el cambio fraccionario en la longitud por grado de cambio de temperatura, definimos el promedio coeficiente de expansión lineal como

$$a = \frac{\Delta L / L_i}{\Delta T}$$

**PREVENCIÓN DE ERRORES 19.2** ¿Los agujeros se vuelven más grandes o más pequeños?

Cuando se eleva la temperatura de un objeto, cada dimensión lineal aumenta de tamaño. Eso incluye cualquier agujero en el material, que se expande de la misma manera que si el agujero estuviera lleno con el material, como se muestra en la figura activa 19.8. Tenga en cuenta que la noción de expansión térmica es similar a una ampliación fotográfica.

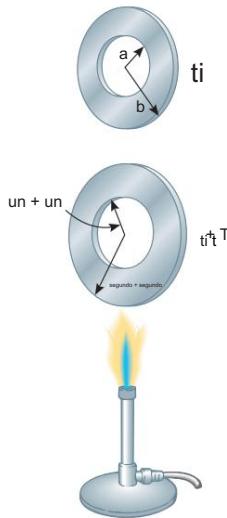


FIGURA ACTIVA 19.8

Expansión térmica de una arandela de metal homogéneo. A medida que la lavadora se calienta, todas las dimensiones aumentan. (La expansión está exagerada en esta figura).

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para comparar expansiones para varias temperaturas del quemador y los materiales con los que está hecha la arandela.

Los experimentos muestran que  $a$  es constante para pequeños cambios de temperatura. Para fines de cálculo, esta ecuación generalmente se reescribe como

$$\Delta L = a L_i \Delta T \quad (19.4)$$

o como

$$\Delta L = L_f - L_i = a L_i (T_f - T_i) \quad (19.5)$$

donde  $L_f$  es la longitud final,  $T_i$  y  $T_f$  son las temperaturas inicial y final, respectivamente, y la constante de proporcionalidad  $a$  es el coeficiente de expansión lineal promedio para un material dado y tiene unidades de  $(^{\circ}\text{C})^{-1}$ .

Puede ser útil pensar en la expansión térmica como un aumento efectivo o como una ampliación fotográfica de un objeto. Por ejemplo, cuando se calienta una arandela de metal (figura activa 19.8), todas las dimensiones, incluido el radio del orificio, aumentan de acuerdo con la ecuación 19.4. Una cavidad en una pieza de material se expande de la misma manera que si la cavidad estuviera llena de material.

La tabla 19.1 enumera los coeficientes promedio de expansión lineal para varios materiales. Para estos materiales,  $a$  es positiva, lo que indica un aumento de longitud al aumentar la temperatura. Sin embargo, ese no es siempre el caso. Algunas sustancias (la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) es un ejemplo) se expanden a lo largo de una dimensión ( $a$  positiva) y se contraen a lo largo de otra ( $a$  negativa) a medida que aumentan sus temperaturas.

Debido a que las dimensiones lineales de un objeto cambian con la temperatura, se deduce que el área de la superficie y el volumen también cambian. El cambio de volumen es proporcional al volumen inicial  $V_i$  y al cambio de temperatura según la relación

$$\Delta V = b V_i \Delta T \quad (19.6)$$

donde  $b$  es el coeficiente promedio de expansión de volumen. Para encontrar la relación entre  $b$  y  $a$ , suponga que el coeficiente promedio de expansión lineal del sólido es el mismo en todas las direcciones; es decir, suponga que el material es isotrópico. Considere una caja sólida de dimensiones  $w$ ,  $h$  y  $h$ . Su volumen a cierta temperatura  $T_i$  es  $V_i = w h^2$ . Si la temperatura cambia a  $T_f$ , su volumen cambia a  $V_f$ , donde cada dimensión cambia según la Ecuación 19.4. Por lo tanto,

$$V_f = V_i (1 + a \Delta T)^3$$

$$= V_i (1 + a \Delta T)^3$$

$$= V_i (1 + a \Delta T)^3$$

$$= V_i (1 + a \Delta T)^3 = V_i (1 + a \Delta T)^3$$

<sup>4</sup> Más precisamente, la expansión térmica surge de la naturaleza asimétrica de la curva de energía potencial de los átomos en un sólido, como se muestra en la figura 15.11a. Si los osciladores fueran verdaderamente armónicos, las separaciones atómicas promedio no cambiarían independientemente de la amplitud de la vibración.

TABLA 19.1

Coeficientes de expansión promedio para algunos materiales cerca de la temperatura ambiente

Material	(A) (°C)1	Expansión de volumen promedio	
		lineal promedio	Coeficiente de expansión Coeficiente
Aluminio	24 106 19	alcohol, etilo	1,12 104 1,24
latón y bronce	106 17 106	Benceno	104 1,5 104
Cobre	9 106 3,2	Acetona	4,85 104
Vidrio (ordinario)	106 29	Glicerina	1,82 104 9,0
Vidrio (Pyrex)	106 11 106	Mercurio	104 9,6 104
Dirigir	0,9 106 12	Trementina	3,67 103
Acero	106	Gasolina	3,665 103
Invar (aleación Ni-Fe)		Aire a 0°C	
Concreto		heliooma	

<sup>a</sup> Los gases no tienen un valor específico para el coeficiente de expansión de volumen porque la cantidad de expansión depende del tipo de proceso a través del cual se lleva el gas. Los valores dados aquí suponen que el gas experimenta una expansión a presión constante.

Dividiendo ambos lados por  $V_i$  y despejando el término  $V/V_i$ , obtenemos el cambio fraccionario de volumen:

$$\frac{\Delta V}{V_i} = \frac{3\alpha \Delta T + 1}{3} \alpha \Delta T^2 + \frac{1}{3} \alpha \Delta T^3$$

Como  $\alpha$  es grande para valores típicos de  $T$  (100°C), podemos despreciar los términos  $3(\alpha \Delta T)^2$  y  $(\alpha \Delta T)^3$ . Al hacer esta aproximación, vemos que

$$\frac{\Delta V}{V_i} = 3\alpha \Delta T + \frac{1}{3} \alpha \Delta T^2$$

La comparación de esta expresión con la ecuación 19.6 muestra que

segundo 3a

De manera similar, puede demostrar que el cambio de área de una placa rectangular está dado por  $A_2 - A_1 = 2aA_1 \alpha T$  (vea el problema 41).

Como indica la tabla 19.1, cada sustancia tiene su propio coeficiente de expansión promedio característico. Un mecanismo simple llamado tira bimetálica, que se encuentra en dispositivos prácticos como los termostatos, usa la diferencia en los coeficientes de expansión para diferentes materiales. Consiste en dos tiras delgadas de metales diferentes unidos entre sí. A medida que aumenta la temperatura de la tira, los dos metales se expanden en cantidades diferentes y la tira se dobla como se muestra en la figura 19.9.

**Pregunta rápida 19.3** Si se le pide que fabrique un termómetro de vidrio muy sensible, ¿cuál de los siguientes líquidos de trabajo elegiría? (a) mercurio (b) alcohol (c) gasolina (d) glicerina

**Prueba rápida 19.4** Dos esferas están hechas del mismo metal y tienen el mismo radio, pero una es hueca y la otra sólida. Las esferas pasan por el mismo aumento de temperatura. ¿Qué esfera se expande más? (a) La esfera sólida se expande más. (b) La esfera hueca se expande más. (c) Se expanden en la misma cantidad. (d) No hay suficiente información para decir.

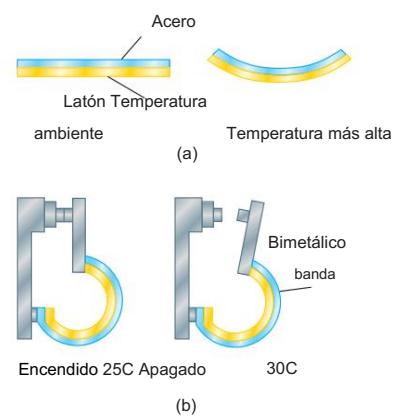


Figura 19.9 (a) Una tira bimetálica se dobla cuando cambia la temperatura porque los dos metales tienen diferentes coeficientes de expansión. (b) Una tira bimetálica utilizada en un termostato para romper o hacer contacto eléctrico.

## EJEMPLO 19.2

## Expansión de una vía férrea

Un segmento de vía férrea de acero tiene una longitud de 30.000 m cuando la temperatura es de 0.0°C

- (A) ¿Cuál es su longitud cuando la temperatura es de  $40.0^{\circ}\text{C}$ ?

## SOLUCIÓN

Conceptualizar Debido a que el riel es relativamente largo, esperamos obtener un aumento medible en la longitud para un aumento de temperatura de 40°C.

Categorizar Evaluaremos un aumento de longitud utilizando la discusión de esta sección, por lo que este ejemplo es un problema de sustitución.

Use la Ecuación 19.4 y el valor del coeficiente de expansión lineal de la Tabla 19.1:

Encuentre la nueva longitud de la pista:

¢L aLi ¢T 311 106 1°C2                          <sup>1</sup>4 130.000 m2 140.0°C2 0.013 m

<sup>1</sup>4 130.000 m<sup>2</sup> 140.0°C2 0.013 m

(B) Suponga que los extremos del riel se sujetan rígidamente a  $0.0^{\circ}\text{C}$  para evitar la expansión. ¿Cuál es el esfuerzo térmico que se establece en el riel si su temperatura se eleva a  $40.0^{\circ}\text{C}$ ?

## SOLUCIÓN

Categorizar Esta parte del ejemplo es un problema de análisis porque necesitamos usar conceptos de otro capítulo

Analizar El esfuerzo térmico es el mismo que el esfuerzo de tensión en la situación en la que el riel se expande libremente y luego se comprime con una fuerza mecánica  $F$  de regreso a su longitud original.

Encuentre el esfuerzo de tracción de la Ecuación 12.6 utilizando el módulo de Young para el acero de la Tabla 12.1.

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\ell L}{l_i}$$

$$\frac{F}{A} = 120 \text{ N/m}^2$$

Finaliza La expansión en la parte (A) es de 1,3 cm. Esta expansión es realmente medible como se predijo en el paso de conceptualización. El estrés térmico en la parte (B) se puede evitar dejando pequeños espacios de expansión entre los rieles.

¿Y si? ¿Qué pasa si la temperatura baja a  $40.0^{\circ}\text{C}$ ? ¿Cuál es la longitud del segmento no sujetado?

Respuesta La expresión para el cambio de longitud en la Ecuación 19.4 es la misma ya sea que la temperatura aumente o disminuya. Por lo tanto, si hay un aumento de longitud de 0,013 m cuando la temperatura aumenta 40 °C, hay una disminución de longitud de 0,013 m cuando la temperatura disminuye 40 °C. (Suponemos que  $a$  es constante en todo el rango de temperaturas). La nueva longitud a la temperatura más fría es 30,000 m - 0,013 m = 29,987 m.

### EJEMPLO 19.3

## El corto eléctrico térmico

Un dispositivo electrónico mal diseñado tiene dos pernos unidos a diferentes partes del dispositivo que casi se tocan en su interior como en la figura 19.10. Los pernos de acero y latón tienen diferentes potenciales eléctricos y, si se tocan, se producirá un cortocircuito que dañará el dispositivo. (Estudiaremos el potencial eléctrico en el Capítulo 25.) El espacio inicial entre los extremos de los pernos es de 5,0 mm a 27°C. ¿A qué temperatura se tocarán los pernos? Suponga que la distancia entre las paredes del dispositivo no se ve afectada por el cambio de temperatura.

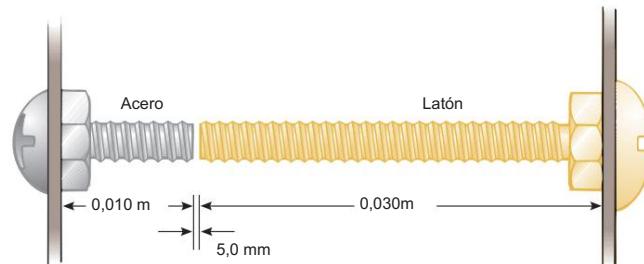


Figura 19.10 (Ejemplo 19.3) Dos pernos unidos a diferentes partes de un dispositivo eléctrico casi se tocan cuando la temperatura es de 27 °C. A medida que aumenta la temperatura, los extremos de los pernos se mueven uno hacia el otro.

## SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine los extremos de ambos pernos expandiéndose en el espacio entre ellos a medida que aumenta la temperatura.

Categorizar Clasificamos este ejemplo como un problema de expansión térmica en el que la suma de los cambios en la longitud de los dos pernos debe ser igual a la longitud del espacio inicial entre los extremos.

Analizar Establecer la suma de los cambios de longitud igual al ancho de la brecha:

$$\phi L_{br} \phi L_{st} = \frac{5.0 \text{ m}}{\phi T_{br} + \phi T_{st}}$$

Resolver para T:

$$\frac{5.0 \text{ m}}{\phi T_{br} + \phi T_{st}}$$

$$\frac{5.0 \text{ m}}{319 \text{ m} + 106 \text{ m} + 106 \text{ m} + 311 \text{ m} + 106 \text{ m} + 106 \text{ m}} = 7.4^\circ\text{C}$$

Encuentre la temperatura a la que se tocan los pernos:

$$T = 27^\circ\text{C}, 7.4^\circ\text{C}, 34^\circ\text{C}$$

Finalizar Esta temperatura es posible si el aire acondicionado del edificio donde se encuentra el dispositivo falla durante un período prolongado en un día de verano muy caluroso.

## El comportamiento inusual del agua

Los líquidos generalmente aumentan de volumen al aumentar la temperatura y tienen coeficientes promedio de expansión de volumen unas diez veces mayores que los de los sólidos.

El agua fría es una excepción a esta regla, como puede ver en su curva de densidad versus temperatura que se muestra en la figura 19.11. A medida que la temperatura aumenta de 0 °C a 4 °C, el agua se contrae y, por lo tanto, aumenta su densidad. Por encima de los 4 °C, el agua se expande al aumentar la temperatura y, por tanto, su densidad disminuye. Por tanto, la densidad del agua alcanza un valor máximo de 1.000 g/cm<sup>3</sup> a 4°C.

Podemos usar este comportamiento inusual de expansión térmica del agua para explicar por qué un estanque comienza a congelarse en la superficie en lugar de en el fondo. Cuando la temperatura del aire cae, por ejemplo, de 7 °C a 6 °C, el agua superficial también se enfriá y, en consecuencia, disminuye su volumen. El agua superficial es más densa que el agua debajo de ella, que no se ha enfriado y ha disminuido de volumen. Como resultado, el agua de la superficie se hunde y el agua más caliente de abajo es forzada a salir a la superficie para enfriarse.

Sin embargo, cuando la temperatura del aire está entre 4°C y 0°C, el agua superficial

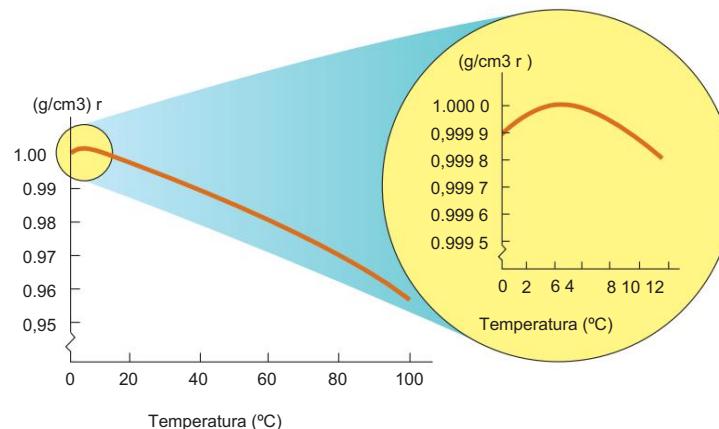


Figura 19.11 La variación en la densidad del agua a presión atmosférica con la temperatura. El recuadro a la derecha muestra que la densidad máxima del agua ocurre a 4°C.

se expande a medida que se enfria, volviéndose menos denso que el agua debajo de él. El proceso de mezcla se detiene y, finalmente, el agua superficial se congela. A medida que el agua se congela, el hielo permanece en la superficie porque el hielo es menos denso que el agua. El hielo continúa acumulándose en la superficie, mientras que el agua cerca del fondo permanece a 4°C. Si ese no fuera el caso, los peces y otras formas de vida marina no sobrevivirían.

## 19.5 Descripción macroscópica de un gas ideal

La ecuación de expansión de volumen  $V \propto T$  se basa en la suposición de que el material tiene un volumen inicial  $V_i$  antes de que ocurra el cambio de temperatura. Tal es el caso de los sólidos y los líquidos porque tienen un volumen fijo a una temperatura dada.

El caso de los gases es completamente diferente. Las fuerzas interatómicas dentro de los gases son muy débiles y, en muchos casos, podemos imaginar que estas fuerzas no existen y, aun así, son muy buenas aproximaciones. Por lo tanto, no hay separación de equilibrio para los átomos ni volumen "estándar" a una temperatura dada; el volumen depende del tamaño del recipiente. Como resultado, no podemos expresar cambios en el volumen  $V$  en un proceso en un gas con la Ecuación 19.6 porque no tenemos definido el volumen  $V_i$  al comienzo del proceso. Las ecuaciones que involucran gases contienen el volumen  $V$ , en lugar de un cambio en el volumen desde un valor inicial, como variable.

Para un gas, es útil saber cómo se relacionan las cantidades volumen  $V$ , presión  $P$  y temperatura  $T$  para una muestra de gas de masa  $m$ . En general, la ecuación que interrelaciona estas cantidades, llamada ecuación de estado, es muy complicada. Sin embargo, si el gas se mantiene a muy baja presión (o baja densidad), la ecuación de estado es bastante simple y se puede encontrar experimentalmente. Tal gas de baja densidad se conoce comúnmente como gas ideal.

<sup>5</sup> Podemos usar el modelo de gas ideal para hacer predicciones que sean adecuadas para describir el comportamiento de los gases reales a bajas presiones.

Es conveniente expresar la cantidad de gas en un volumen dado en función del número de moles  $n$ . Un mol de cualquier sustancia es la cantidad de sustancia que contiene el número de Avogadro  $N_A$  6.022 1023 de partículas constituyentes (átomos o moléculas). El número de moles  $n$  de una sustancia está relacionado con su masa  $m$  mediante la expresión

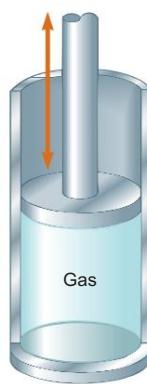


FIGURA ACTIVA 19.12

Un gas ideal confinado en un cilindro cuyo volumen se puede variar por medio de un pistón móvil.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para elegir mantener constante la temperatura o la presión y verifique la ley de Boyle y la ley de Charles.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (19.7)$$

donde  $M$  es la masa molar de la sustancia. La masa molar de cada elemento químico es la masa atómica (de la tabla periódica; consulte el Apéndice C) expresada en gramos por mol. Por ejemplo, la masa de un átomo de He es 4,00 u (unidades de masa atómica), por lo que la masa molar de He es 4,00 g/mol.

Ahora suponga que un gas ideal está confinado en un recipiente cilíndrico cuyo volumen puede variarse por medio de un pistón móvil como en la figura activa 19.12. Si suponemos que el cilindro no tiene fugas, la masa (o el número de moles) del gas permanece constante. Para tal sistema, los experimentos proporcionan la siguiente información:

- Cuando el gas se mantiene a una temperatura constante, su presión es inversamente proporcional al volumen. (Este comportamiento se describe históricamente como la ley de Boyle.) ■
- Cuando la presión del gas se mantiene constante, el volumen es directamente proporcional a la temperatura. (Este comportamiento se describe históricamente como la ley de Charles).
- Cuando el volumen del gas se mantiene constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura. (Este comportamiento se describe históricamente como la ley de Gay-Lussac).

5 Para ser más específicos, las suposiciones aquí son que la temperatura del gas no debe ser demasiado baja (el gas no debe condensarse en un líquido) o demasiado alta y que la presión debe ser baja. El concepto de gas ideal implica que las moléculas del gas no interactúan excepto en caso de colisión y que el volumen molecular es insignificante en comparación con el volumen del recipiente. En realidad, un gas ideal no existe. No obstante, el concepto de gas ideal es muy útil porque los gases reales a bajas presiones se comportan como los gases ideales.

Estas observaciones se resumen en la ecuación de estado de un gas ideal:

$$PV = nRT \quad (19.8)$$

En esta expresión, también conocida como ley de los gases ideales,  $n$  es el número de moles de gas en la muestra y  $R$  es una constante. Los experimentos con numerosos gases muestran que a medida que la presión se acerca a cero, la cantidad  $PV/nT$  se acerca al mismo valor  $R$  para todos los gases. Por esta razón,  $R$  se llama la constante universal de los gases. En unidades del SI, en las que la presión se expresa en pascales ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ) y el volumen en metros cúbicos, el producto  $PV$  tiene unidades de newton·metros, o julios, y  $R$  tiene el valor

$$R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (19.9)$$

Si la presión se expresa en atmósferas y el volumen en litros ( $1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$ ), entonces  $R$  tiene el valor

$$R = 0.08206 \text{ L} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$$

Utilizando este valor de  $R$  y la Ecuación 19.8 se muestra que el volumen ocupado por 1 mol de cualquier gas a presión atmosférica y a  $0^\circ\text{C}$  ( $273 \text{ K}$ ) es de  $22.4 \text{ L}$ .

La ley de los gases ideales establece que si el volumen y la temperatura de una cantidad fija de gas no cambian, la presión también permanece constante. Considere una botella de champán que se agita y luego arroja líquido cuando se abre, como se muestra en la figura 19.13. Un concepto erróneo común es que la presión dentro de la botella aumenta cuando se agita la botella. Por el contrario, debido a que la temperatura de la botella y su contenido permanece constante mientras la botella está sellada, también lo hace la presión, como puede demostrarse reemplazando el corcho por un manómetro. La explicación correcta es la siguiente. El gas de dióxido de carbono reside en el volumen entre la superficie del líquido y el corcho. La presión del gas en este volumen se establece por encima de la presión atmosférica en el proceso de embotellado. Al agitar la botella, parte del gas de dióxido de carbono se desplaza hacia el líquido, donde forma burbujas, y estas burbujas se adhieren al interior de la botella. (Al agitar no se genera gas nuevo). Cuando se abre la botella, la presión se reduce a la presión atmosférica, lo que hace que el volumen de las burbujas aumente repentinamente. Si las burbujas están adheridas a la botella (debajo de la superficie del líquido), su rápida expansión expulsa el líquido de la botella. Sin embargo, si primero se golpean los lados y el fondo de la botella hasta que no queden burbujas debajo de la superficie, la caída de presión no expulsa el líquido de la botella cuando se abre el champán.

La ley de los gases ideales a menudo se expresa en términos del número total de moléculas  $N$ . Como el número de moles  $n$  es igual a la relación entre el número total de moléculas y el número de Avogadro  $N_A$ , podemos escribir la ecuación 19.8 como

$$\frac{PV}{nRT} = \frac{N}{N_A} \quad (19.10)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann, que tiene el valor

$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad (19.11)$$

Ecuación de estado de un gas ideal



Figura 19.13 Se agita y abre una botella de champán. El líquido sale a borbotones por la abertura. Un concepto erróneo común es que la presión dentro de la botella aumenta con la agitación.

## PREVENCIÓN DE ERRORES

### 19.3 Tantos $k$ s

Hay una variedad de cantidades físicas para las que se usa la letra  $k$ . Dos que hemos visto anteriormente son la constante de fuerza de un resorte (capítulo 15) y el número de onda de una onda mecánica (capítulo 16). La constante de Boltzmann es otra  $k$ , y veremos que  $k$  se usa para la conductividad térmica en el Capítulo 20 y para una constante eléctrica en el Capítulo 23. Para dar algún sentido a este confuso estado de cosas, usamos un subíndice  $B$  para la constante de Boltzmann para ayudarnos a reconocer él. En este libro, verá la constante de Boltzmann como  $k_B$ , pero puede ver la constante de Boltzmann en otros recursos simplemente como  $k$ .

constante de Boltzmann

**Pregunta rápida 19.5** Un material común para proteger objetos en paquetes se fabrica atrapando burbujas de aire entre láminas de plástico. Este material es más efectivo para evitar que el contenido del paquete se mueva dentro del paquete en (a) un día caluroso (b) un día frío (c) ya sea en días calurosos o fríos.

**Cuestionario rápido 19.6** En un día de invierno, enciende la calefacción y aumenta la temperatura del aire dentro de su casa. Suponga que su hogar tiene la cantidad normal de fugas entre el aire interior y el aire exterior. ¿Es el número de moles de aire en su habitación a la temperatura más alta (a) mayor que antes, (b) menor que antes, o (c) igual que antes?

**EJEMPLO 19.4**

calentar una lata de aerosol

Una lata de aerosol que contiene un gas propulsor al doble de la presión atmosférica (202 kPa) y con un volumen de 125,00 cm<sup>3</sup> está a 22°C. Luego se arroja a un fuego abierto. Cuando la temperatura del gas en la lata llega a 195°C, ¿cuál es la presión dentro de la lata? Suponga que cualquier cambio en el volumen de la lata es despreciable.

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar Intuitivamente, debe esperar que la presión del gas en el recipiente aumente debido al aumento de la temperatura.

Categorizar Modelamos el gas en la lata como ideal y usamos la ley de los gases ideales para calcular la nueva presión.

Analice Reordene la ecuación 19.8:

$$(1) \frac{P_{\text{f}}}{T} = \frac{nR}{V}$$

No escapa aire durante la compresión, por lo que n, y por lo tanto nR, permanece constante. Por lo tanto, establezca el valor inicial del lado izquierdo de la Ecuación (1) igual al valor final:

$$(2) \frac{P_{\text{i}}}{T_{\text{i}}} = \frac{P_{\text{f}} V_{\text{f}}}{T_{\text{f}}}$$

Como se supone que los volúmenes inicial y final del gas son iguales, cancele los volúmenes:

$$(3) \frac{P_{\text{i}}}{T_{\text{i}}} = \frac{P_{\text{f}}}{T_{\text{f}}}$$

Resolver para P<sub>f</sub>:

$$P_{\text{f}} = \frac{T_{\text{f}}}{T_{\text{i}}} P_{\text{i}} = \frac{195}{22} \times 202 \text{ kPa} = 320 \text{ kPa}$$

Finalizar Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la presión ejercida por el gas atrapado como se esperaba. Si la presión aumenta lo suficiente, la lata puede explotar. Debido a esta posibilidad, nunca debe arrojar las latas de aerosol al fuego.

**¿Y si?** Suponga que incluimos un cambio de volumen debido a la expansión térmica de la lata de acero a medida que aumenta la temperatura. ¿Eso altera significativamente nuestra respuesta para la presión final?

Respuesta Debido a que el coeficiente de expansión térmica del acero es muy pequeño, no esperamos un gran efecto en nuestra respuesta final.

Encuentre el cambio en el volumen de la lata usando la Ecuación 19.6 y el valor de a para el acero de la Tabla 19.1:

$$\Delta V = V_f - V_i = \alpha A \Delta T$$

$$= 3311.106 \times 10^{-6} \times 125,00 \text{ cm}^3 \times 1173^\circ\text{C} - 202 \text{ K} = 0,71 \text{ cm}^3$$

Comience con la Ecuación (2) nuevamente y encuentre una ecuación para la presión final:

$$P_f = \frac{T_f}{T_i} P_i = \frac{T_f}{T_i} \frac{P_i V_i}{V_i + \alpha A \Delta T}$$

Este resultado difiere de la Ecuación (3) solo en el factor  $\frac{V_i}{V_i + \alpha A \Delta T}$ . Evalúa este factor:

$$\frac{V_i}{V_i + \alpha A \Delta T} = \frac{125,00 \text{ cm}^3}{125,00 \text{ cm}^3 + 0,71 \text{ cm}^3} = 0,994 \quad 99.4\%$$

Por lo tanto, la presión final diferirá sólo en un 0,6 % del valor calculado sin considerar la dilatación térmica de la lata. Tomando el 99,4% de la presión final anterior, la presión final incluida la expansión térmica es de 318 kPa.

## Resumen

ThomsonNOW® Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para realizar un examen de práctica para este capítulo.

### DEFINICIONES

Dos objetos están en equilibrio térmico entre sí si no intercambian energía cuando están en contacto térmico.

La temperatura es la propiedad que determina si un objeto está en equilibrio térmico con otros objetos. Dos objetos en equilibrio térmico entre sí están a la misma temperatura. La unidad SI de temperatura absoluta es el kelvin, que se define como 1/273,16 de la diferencia entre el cero absoluto y la temperatura del punto triple del agua.

### CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La ley cero de la termodinámica establece que si los objetos A y B están separados en equilibrio térmico con un tercer objeto C, entonces los objetos A y B están en equilibrio térmico entre sí.

Cuando la temperatura de un objeto cambia en una cantidad  $T$ , su longitud cambia en una cantidad  $L$  que es proporcional a  $T$  y a su longitud inicial  $L_i$ :

$$\delta L = a L_i \delta T \quad (19.4)$$

donde la constante  $a$  es el coeficiente promedio de expansión lineal. El coeficiente promedio de expansión de volumen  $b$  para un sólido es aproximadamente igual a  $3a$ .

Un gas ideal es aquel para el cual  $PV/nT$  es constante. Un gas ideal se describe mediante la ecuación de estado,

$$PV = nRT \quad (19.8)$$

donde  $n$  es igual al número de moles del gas,  $P$  es su presión,  $V$  es su volumen,  $R$  es la constante universal de los gases (8,314 J/molK) y  $T$  es la temperatura absoluta del gas. Un gas real se comporta aproximadamente como un gas ideal si tiene una densidad baja.

## Preguntas

denota respuesta disponible en Student Solutions Manual/Study Guide; O denota pregunta objetiva

1. ¿Es posible que dos objetos estén en equilibrio térmico si no están en contacto entre sí? Explicar.
2. Se deja caer un trozo de cobre en un vaso de precipitados con agua. Si la temperatura del agua aumenta, ¿qué sucede con la temperatura del cobre? ¿Bajo qué condiciones están el agua y el cobre en equilibrio térmico?
3. Al describir su próximo viaje a la Luna y tal como se presenta en la película Apolo 13 (Universal, 1995), el astronauta Jim Lovell dijo: "Estaré caminando en un lugar donde hay una diferencia de 400 grados entre la luz del sol y la sombra. ." ¿Qué es lo que es caliente a la luz del sol y frío a la sombra? Suponga que un astronauta parado en la Luna sostiene un termómetro en su mano enguantada. ¿Está el termómetro leyendo la temperatura del vacío en la superficie de la Luna? ¿Lee alguna temperatura? Si es así, ¿qué objeto o sustancia tiene esa temperatura?
4. O ¿Qué pasaría si el vidrio de un termómetro se expandiera más al calentarse que el líquido en el tubo? (a) El termómetro se rompería. (b) No podría usarse para medir la temperatura. (c) Podría usarse para temperaturas solo por debajo de la temperatura ambiente. (d) Tendrías que sostenerlo con la bombilla hacia arriba. (e) Mayor los números se encontrarían más cerca de la bombilla. (f) Los números no estarían espaciados uniformemente.
5. O Suponga que vacía una bandeja de cubitos de hielo en un recipiente parcialmente lleno de agua y cubre el recipiente. Después de media hora, el contenido del recipiente alcanza el equilibrio térmico, con más agua líquida y menos hielo que al principio. ¿Cuál de los siguientes es verdadero? (a) La temperatura del agua líquida es más alta que la temperatura del hielo restante. (b) La temperatura del agua líquida es la misma que la del hielo. (c) La temperatura del agua líquida es menor que la del hielo. (d) Las temperaturas comparativas del agua líquida y el hielo dependen de las cantidades presentes.
6. O El coeficiente de expansión lineal del cobre es 17 106 ( $^{\circ}\text{C}$ ). La Estatua de la Libertad mide 93 m de altura en una mañana de verano cuando la temperatura es de  $25^{\circ}\text{C}$ . Suponga que las placas de cobre que cubren la estatua están montadas borde con borde sin juntas de expansión y no se tuercen ni se unen en el marco que las sostiene a medida que aumenta el calor del día. ¿Cuál es el orden de magnitud del aumento de altura de la estatua? (a) 0,1 mm (b) 1 mm (c) 1 cm (d) 10 cm (e) 1 m (f) 10 m (g) ninguna de estas respuestas

7. Se colocan marcas para indicar la longitud en una cinta de acero en una habitación que tiene una temperatura de 22 °C. ¿Las mediciones realizadas con la cinta en un día en que la temperatura es de 27 °C son demasiado largas, demasiado cortas o precisas? Defiende tu respuesta.
8. Use una tabla periódica de los elementos (vea el Apéndice C) para determinar el número de gramos en un mol de (a) hidrógeno, que tiene moléculas diatómicas; (b) helio; y (c) monóxido de carbono.
9. ¿Qué predice la ley de los gases ideales sobre el volumen de una muestra de gas en el cero absoluto? ¿Por qué esta predicción es incorrecta?
10. O Un globo de caucho se llena con 1 L de aire a 1 atm y 300 K y luego se coloca en un refrigerador criogénico a 100 K. El caucho permanece flexible mientras se enfriá. (i) ¿Qué sucede con el volumen del globo? (a) Disminuye a L. (b) Disminuye a L. (c) Disminuye a  $1 > 13$ . (d) Es constante. (e) Aumenta. (ii) ¿Qué sucede con la presión del aire en el globo? (a) Disminuye a atm. (b) Disminuye a atm. (c) Disminuye a  $1 > 13$  atm. (d) Es constante. (e) Aumenta.
11. O Dos cilindros a la misma temperatura contienen la misma cantidad del mismo tipo de gas. ¿Es posible que el cilindro A tenga tres veces el volumen del cilindro B? Si es así, ¿qué puedes concluir acerca de las presiones que ejercen los gases? (a) La situación no es posible. (b) Es posible, pero no podemos concluir nada acerca de la presión. (c) Sólo es posible si la presión en A es tres veces la presión en B. (d) Las presiones deben ser iguales. (e) La presión en A debe ser un tercio de la presión en B.
12. O Elija todas las respuestas correctas. El gráfico de presión versus temperatura en la figura 19.5 muestra qué para cada muestra de gas. (a) La presión es proporcional a la temperatura Celsius. (b) La presión es una función lineal de la temperatura. (c) La presión aumenta a la misma velocidad que la temperatura. (d) La presión aumenta con la temperatura a una tasa constante.
13. O Un cilindro con un pistón contiene una muestra de un gas delgado. Se puede cambiar el tipo de gas y el tamaño de la muestra. El cilindro se puede colocar en diferentes temperaturas constantes

baños, y el pistón se puede sostener en diferentes posiciones. Clasifique los siguientes casos de acuerdo con la presión del gas de mayor a menor, mostrando cualquier caso de igualdad. (a) Una muestra de oxígeno de 2 mmol se mantiene a 300 K en un recipiente de 100 cm<sup>3</sup>. (b) Una muestra de oxígeno de 2 mmol se mantiene a 600 K en un recipiente de 200 cm<sup>3</sup>. (c) Una muestra de oxígeno de 2 mmol se mantiene a 600 K en un recipiente de 300 cm<sup>3</sup>. (d) Una muestra de 4 mmol de helio se mantiene a 300 K en un recipiente de 200 cm<sup>3</sup>. e) Una muestra de helio de 4 mmol se mantiene a 250 K en un recipiente de 200 cm<sup>3</sup>.

14. El péndulo de cierto reloj de péndulo está hecho de latón. Cuando la temperatura aumenta, ¿aumenta, disminuye o permanece igual el período del reloj? Explicar.
15. El radiador de un automóvil se llena hasta el borde con agua cuando el motor está frío. ¿Qué sucede con el agua cuando el motor está funcionando y el agua se ha elevado a una temperatura alta? ¿Qué tienen los automóviles modernos en sus sistemas de refrigeración para evitar la pérdida de refrigerantes?
16. Las tapas de metal de los frascos de vidrio a menudo se pueden aflojar al pasárselas agua caliente. ¿Por qué funciona eso?
17. Cuando el anillo de metal y la esfera de metal de la figura P19.17 están a temperatura ambiente, la esfera apenas puede atravesar el anillo. Una vez que la esfera se calienta en una llama, no puede pasar a través del anillo. Explicar. ¿Y si? ¿Qué pasa si el anillo se calienta y la esfera se deja a temperatura ambiente? ¿Pasa la esfera por el anillo?

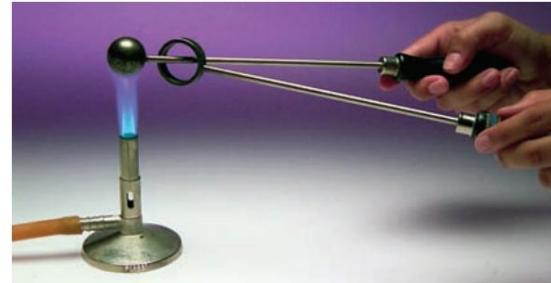


Figura P19.17

## Problemas

**WebAssign** Los problemas de este capítulo se pueden asignar en línea en WebAssign.

**ThomsonNOW®** Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para evaluar su comprensión de los temas de este capítulo con cuestionarios adicionales y preguntas conceptuales.

1, 2, 3 denota sencillo, intermedio, desafiante; indica la solución completa disponible en el Manual de soluciones para estudiantes/Guía de estudio; indica una solución guiada con sugerencias disponibles en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com); denota desarrollo de razonamiento simbólico; denota pedir un razonamiento cualitativo; indica que la computadora es útil para resolver problemas

Sección 19.2 Termómetros y la escala de temperatura Celsius

Sección 19.3 El termómetro de gas de volumen constante y la escala de temperatura absoluta 1. Un termómetro

de gas de volumen constante está calibrado en hielo seco (es decir, evaporando dióxido de carbono en estado sólido, con una temperatura de 80.0 °C) y en etilo hirviendo. alcoholílico

hola (78.0°C). Las dos presiones son 0,900 atm y 1,635 atm. (a) ¿Qué valor Celsius del cero absoluto produce la calibración? ¿Cuál es la presión en (b) el punto de congelación del agua y (c) el punto de ebullición del agua?

2. La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del motor de un automóvil es de 450 °C. Exprese esta diferencia de temperatura en (a) la escala Fahrenheit y (b) la escala Kelvin.

3. El nitrógeno líquido tiene un punto de ebullición de 195,81 °C a presión atmosférica. Exprese esta temperatura (a) en grados Fahrenheit y (b) en kelvins.
4. El punto de fusión del oro es 1 064 °C y su punto de ebullición es 2 660 °C. (a) Exprese estas temperaturas en kelvins. (b) Calcule la diferencia entre estas temperaturas en grados Celsius y Kelvin.

#### Sección 19.4 Expansión Térmica de Sólidos y Líquidos

Nota: la tabla 19.1 está disponible para resolver los problemas de esta sección.

5. Un cable telefónico de cobre esencialmente no tiene pandeo entre los postes separados 35,0 m en un día de invierno cuando la temperatura es de 20,0 °C. ¿Cuánto más largo es el cable en un día de verano cuando TC 35,0 °C?
6. Las secciones de hormigón de cierta supercarretera están diseñadas para tener una longitud de 25,0 m. Las secciones se vierten y curan a 10,0 °C. ¿Qué espacio mínimo debe dejar el ingeniero entre las secciones para eliminar el pandeo si el concreto debe alcanzar una temperatura de 50,0 °C?
7. El elemento activo de cierto láser está hecho de una varilla de vidrio de 30,0 cm de largo y 1,50 cm de diámetro. Si la temperatura de la varilla aumenta en 65,0 °C, ¿cuál es el aumento en (a) su longitud, (b) su diámetro y (c) su volumen? Suponga que el coeficiente promedio de expansión lineal del vidrio es 9,00 10<sup>-6</sup> (°C)<sup>1</sup>.
8. Problema de revisión. Dentro de la pared de una casa, una sección de tubería de agua caliente en forma de L consta de una pieza horizontal recta de 28,0 cm de largo, un codo y una pieza vertical recta de 134 cm de largo (figura P19.8). Un montante y una tabla de piso del segundo piso mantienen estacionarios los extremos de esta sección de tubería de cobre. Encuentre la magnitud y dirección del desplazamiento del codo de la tubería cuando se abre el flujo de agua, elevando la temperatura de la tubería de 18,0 °C a 46,5 °C.



Figura P19.8

9. Un anillo delgado de latón de 10,00 cm de diámetro interior a 20,0 °C se calienta y se desliza sobre una varilla de aluminio de 10,01 cm de diámetro a 20,0 °C. Suponiendo que los coeficientes promedio de expansión lineal son constantes, (a) ¿a qué temperatura debe enfriarse esta combinación para separar las partes? Explique si esta separación es alcanzable. (b) ¿Qué pasa si? ¿Qué pasaría si la barra de aluminio tuviera 10,02 cm de diámetro?
10. A 20,0 °C, un anillo de aluminio tiene un diámetro interior de 5,000 0 cm y una varilla de latón tiene un diámetro de 5,050 0 cm.

(a) Si solo se calienta el anillo, ¿qué temperatura debe alcanzar para que se deslice sobre la barra? (b) ¿Qué pasa si? Si tanto el anillo como la varilla se calientan juntos, ¿qué temperatura deben alcanzar ambos para que el anillo apenas se deslice sobre la varilla? ¿Funcionaría este último proceso? Explicar.

11. Un matraz volumétrico hecho de Pyrex está calibrado a 20,0 °C. Se llena hasta la marca de 100 ml con acetona a 35,0 °C. (a) ¿Cuál es el volumen de la acetona cuando se enfriá a 20,0 °C? (b) ¿Qué tan significativo es el cambio en el volumen del matraz?

12. En un día en que la temperatura es de 20,0 °C, se vierte un camino de concreto de tal manera que los extremos del camino no se pueden mover. (a) ¿Cuál es el esfuerzo en el cemento en un día caluroso de 50,0 °C? (b) ¿Se fractura el concreto? Tome el módulo de Young para el concreto como 7,00 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup> y la resistencia a la compresión como 2,00 10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>.

13. Un cilindro hueco de aluminio de 20,0 cm de profundidad tiene una capacidad interna de 2,000 L a 20,0 °C. Se llena completamente con trementina y luego se calienta lentamente a 80,0 °C. (a) ¿Cuánta trementina rebosa? (b) Si luego el cilindro se enfriá nuevamente a 20,0 °C, ¿a qué distancia por debajo del borde del cilindro retrocede la superficie de la trementina?

14. El puente Golden Gate de San Francisco tiene un vano principal de 1,28 km de longitud, uno de los más largos del mundo.

Imagine que un alambre de acero tenso con esta longitud y un área de sección transversal de 4,00 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup> se coloca sobre la plataforma del puente con sus extremos unidos a las torres del puente y que en este día de verano la temperatura del alambre es de 35,0 °C. (a) Cuando llega el invierno, las torres se mantienen separadas a la misma distancia y el tablero del puente mantiene la misma forma que sus juntas de dilatación abiertas. Cuando la temperatura desciende a 10,0 °C, ¿cuál es la tensión en el alambre? Tome el módulo de Young para el acero como 20,0 10<sup>10</sup> N/m<sup>2</sup>. (b) La deformación permanente ocurre si el esfuerzo en el acero excede su límite elástico de 3,00 X 10<sup>8</sup> N/m<sup>2</sup>. ¿A qué temperatura alcanzaría el alambre su límite elástico? (c) ¿Qué pasa si? Explique cómo cambiarían sus respuestas a las partes (a) y (b) si el puente Golden Gate fuera el doble de largo.

15. Cierto telescopio forma una imagen de parte de un cúmulo de estrellas en un chip detector de carga acoplada de silicio cuadrado de 2,00 cm de lado. Un campo de estrellas se enfoca en el chip cuando se enciende por primera vez y su temperatura es de 20,0 °C. El campo de estrellas contiene 5 342 estrellas dispersas uniformemente. Para que el detector sea más sensible, se enfriá a 100 °C. ¿Cuántas imágenes de estrellas caben entonces en el chip? El coeficiente promedio de expansión lineal del silicio es 4,68 10<sup>-6</sup> (°C)<sup>1</sup>.

Sección 19.5 Descripción macroscópica de un gas ideal 16. El día de tu boda tu amante te regala un anillo de oro de 3,80 g de masa. Cincuenta años después su masa es de 3,35 g. En promedio, ¿cuántos átomos se desgastaron del anillo durante cada segundo de su matrimonio? La masa molar del oro es 197 g/mol.

17. La llanta de un automóvil se infla con aire originalmente a 10,0 °C y presión atmosférica normal. Durante el proceso, el aire se comprime al 28,0% de su volumen original y la temperatura se eleva a 40,0 °C. (a) ¿Cuál es la presión de los neumáticos? (b) Después de conducir el automóvil a alta velocidad, la temperatura del aire de la llanta sube a 85,0 °C y la temperatura de la llanta

el volumen interior aumenta un 2,00%. ¿Cuál es la presión de los neumáticos nuevos (absoluta) en pascales?

18. Un recipiente de 8,00 L contiene gas a una temperatura de 20,0 °C y una presión de 9,00 atm. (a) Determine el número de moles de gas en el recipiente. (b) ¿Cuántas moléculas hay en el recipiente?

19. Un auditorio tiene unas dimensiones de 10,0 m × 20,0 m

30,0 metros. ¿Cuántas moléculas de aire llenan el auditorio a 20,0 °C y una presión de 101 kPa?

20. Un cocinero pone 9,00 g de agua en una olla a presión de 2,00 L y la calienta a 500 °C. ¿Cuál es la presión dentro del recipiente?

21. La masa de un globo aerostático y su carga (sin incluir el aire del interior) es de 200 kg. El aire exterior está a 10,0 °C y 101 kPa. El volumen del globo es de 400 m<sup>3</sup>. ¿A qué temperatura debe calentarse el aire en el globo antes de que el globo despegue? (La densidad del aire a 10,0 °C es de 1,25 kg/m<sup>3</sup>).

22. Tontería de patrón masculino. Tu padre y tu hermano menor se enfrentan al mismo rompecabezas. El rociador de jardín de su padre y el cañón de agua de su hermano tienen tanques con una capacidad de 5,00 L (figura P19.22).

Tu padre pone una cantidad insignificante de fertilizante concentrado en su tanque. Ambos vierten 4,00 L de agua y sellan sus tanques, por lo que los tanques también contienen aire a presión atmosférica. A continuación, cada uno usa una bomba de pistón manual para injectar más aire hasta que la presión absoluta en el tanque alcanza 2,40 atm y se vuelve demasiado difícil mover la manija de la bomba. Ahora cada uno usa su dispositivo para rociar agua, no aire, hasta que el chorro se vuelve débil, como ocurre cuando la presión en el tanque alcanza 1,20 atm. Luego debe bombearlo nuevamente, rociarlo nuevamente, y así sucesivamente. Para lograr rociar toda el agua, cada uno descubre que debe inflar el tanque tres veces. Aquí está el rompecabezas: la mayor parte del agua sale como resultado del segundo bombeo. El primer y el tercer proceso de bombeo parecen tan difíciles como el segundo, pero resultan en una cantidad de agua decepcionantemente pequeña que sale.

Dar cuenta de este fenómeno.



Figura P19.22

23. (a) Halle el número de moles en un metro cúbico de un gas ideal a 20,0 °C y presión atmosférica. (b) Para el aire, el número de moléculas de Avogadro tiene una masa de 28,9 g. Calcular la masa de un metro cúbico de aire. Indique cómo el

El resultado se compara con la densidad tabulada del aire.

24. A 25,0 m por debajo de la superficie del mar (densidad 1,025 kg/m<sup>3</sup>), donde la temperatura es de 5,00 °C, un buzo exhala una burbuja de aire que tiene un volumen de 1,00 cm<sup>3</sup>. Si el

la temperatura de la superficie del mar es de 20,0 °C, ¿cuál es el volumen de la burbuja justo antes de romper la superficie?

25. Un cubo de 10,0 cm de arista contiene aire (con una masa molar equivalente a 28,9 g/mol) a presión atmosférica y temperatura de 300 K. Encuentre (a) la masa del gas, (b) la fuerza gravitatoria ejercida sobre él, y (c) la fuerza que ejerce sobre cada cara del cubo. (d) Comente la razón física por la que una muestra tan pequeña puede ejercer una fuerza tan grande.

26. Estima la masa del aire en tu dormitorio. Indique las cantidades que toma como datos y el valor que mide o estima para cada una.

27. El manómetro de un tanque registra la presión manométrica, que es la diferencia entre la presión interior y exterior. Cuando el tanque está lleno de oxígeno (O<sub>2</sub>), contiene 12,0 kg del gas a una presión manométrica de 40,0 atm. Determine la masa de oxígeno que se ha extraído del tanque cuando la lectura de presión es de 25,0 atm. Suponga que la temperatura del tanque permanece

constante.

28. En los sistemas de vacío más modernos, se alcanzan presiones tan bajas como 109 Pa. Calcule el número de moléculas en un recipiente de 1,00 m<sup>3</sup> a esta presión y una temperatura de 27,0 °C.

29. ¿Cuánta agua cortará una pardela? Para medir qué tan lejos por debajo de la superficie del océano se sumerge un pájaro para atrapar un pez, Will Mackin usó un método originado por Lord Kelvin para los sondeos de la Armada británica. Mackin espolvoreó el interior de los delgados tubos de plástico con azúcar en polvo y luego selló un extremo de cada tubo. Cargando en una playa rocosa por la noche con un faro de minero, agarraría una pardela de Audubon en su nido y le colocaría un tubo en la espalda. Luego atraparía el mismo pájaro la noche siguiente y quitaría el tubo. Despues de cientos de capturas, a las aves les desagradaba por completo, pero no se asustaron permanentemente para alejarlas de la colonia. Suponga que en un ensayo, con un tubo de 6,50 cm de largo, descubrió que había entrado agua en el tubo para eliminar el azúcar a una distancia de 2,70 cm desde el extremo abierto. (a) Encuentre la mayor profundidad a la que se zambulló la pardela, suponiendo que el aire en el tubo se mantuvo a temperatura constante. (b) ¿Se debe unir el tubo al ave en alguna orientación particular para que funcione este método? (La pardela de Audubon puede sumergirse a más del doble de la profundidad calculada, y las especies más grandes pueden sumergirse casi diez veces más profundo).

30. Una habitación de volumen V contiene aire con una masa molar equivalente M (en gramos por mol). Si la temperatura de la habitación se eleva de T<sub>1</sub> a T<sub>2</sub>, ¿qué masa de aire saldrá de la habitación? Suponga que la presión del aire en la habitación se mantiene en P<sub>0</sub>.

#### Problemas adicionales

31. Un estudiante mide la longitud de una varilla de latón con una cinta de acero a 20,0 °C. La lectura es de 95,00 cm. ¿Qué indicará la cinta para la longitud de la varilla cuando la varilla y la cinta estén a (a) 15,0 °C y (b) 55,0 °C?

32. La densidad de la gasolina es de 730 kg/m<sup>3</sup> a 0°C. Su coeficiente promedio de expansión de volumen es 9,60 10<sup>-4</sup> (°C)<sup>-1</sup>. Suponga que 1,00 gal de gasolina ocupa 0,003 80 m<sup>3</sup>. ¿Cuántos kilogramos adicionales de gasolina obtendría si comprara 10,0 galones de gasolina a 0°C en lugar de a 20,0°C de una bomba que no tiene compensación de temperatura?

- 33.** Se construye un termómetro de mercurio como se muestra en la figura P19.33. El tubo capilar tiene un diámetro de 0.004 00 cm y el bulbo tiene un diámetro de 0.250 cm. Ignorando la expansión del vidrio, encuentre el cambio en la altura de la columna de mercurio que ocurre con un cambio de temperatura de 30.0°C.

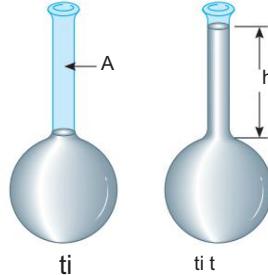


Figura P19.33 Problemas 33 y 34.

- 34.** Un líquido con un coeficiente de expansión de volumen  $b$  llena una capa esférica de volumen  $V_i$  a una temperatura de  $T_i$  (figura P19.33). La coraza está hecha de un material con un coeficiente promedio de expansión lineal  $a$ . El líquido puede expandirse libremente en un capilar abierto de área  $A$  que se proyecta desde la parte superior de la esfera. (a) Suponiendo que la temperatura aumenta en  $T$ , demuestre que el líquido sube en el capilar en la cantidad  $h$  dada por la ecuación  $h = (V_i/A)(b + 3a)T$ . (b) Para un sistema típico como un termómetro de mercurio, ¿por qué es una buena aproximación ignorar la expansión del caparazón?
- 35.** Problema de repaso. Un tubo de aluminio, de 0.655 m de largo a 20.0°C y abierto en ambos extremos, se usa como flauta. La pipa se enfria a una temperatura baja, pero luego se llena con aire a 20,0 °C tan pronto como comienzas a tocarla. Después de eso, ¿en cuánto cambia su frecuencia fundamental cuando la temperatura del metal aumenta de 5,00 °C a 20,0 °C?

**36.** Dos barras de metal están hechas de invar y una de aluminio. El metal A tiene un coeficiente de expansión lineal  $\alpha_A$  y el metal B tiene un coeficiente de expansión lineal  $\alpha_B$ . Los dos metales tienen una longitud inicial  $L_0$  y se unen juntos para formar un triángulo equilátero. (a) Si el triángulo se calienta a una temperatura  $T$ , calcule el cambio en la medida del lado del triángulo. (b) Si el triángulo se calienta a una temperatura  $T$ , calcule el cambio en la medida del lado del triángulo.

- 37.** Un líquido tiene una densidad  $r$ . (a) Demuestre que el cambio fraccionario en la densidad para un cambio en la temperatura  $T$  es  $r/rT$ . ¿Qué significa el signo negativo? (b) El agua dulce tiene una densidad máxima de 1.000 g/cm<sup>3</sup> a 4.0°C. A 10,0 °C, su densidad es de 0,999 7 g/cm<sup>3</sup>. ¿Cuál es  $b$  para el agua en este intervalo de temperatura?

- 38.** Un cilindro está cerrado por un pistón conectado a un resorte de constante 2.00 103 N/m (figura P19.38). Con el resorte relajado, el cilindro se llena con 5.00 L de gas a una presión de 1.00 atm y una temperatura de 20.0°C. (a) Si el pistón tiene un área de sección transversal de 0.010 0 m<sup>2</sup> y una masa despreciable, ¿qué tan alto se elevará cuando la temperatura sea

elevado a 250°C? (b) ¿Cuál es la presión del gas a 250°C?

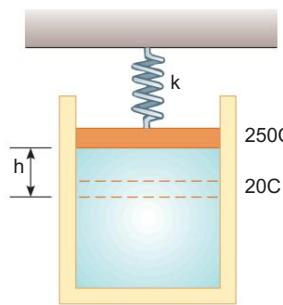


Figura P19.38

- 39.** Un cilindro vertical de área de sección transversal  $A$  está equipado con un pistón sin fricción y de ajuste hermético de masa  $m$  (figura P19.39). (a) Si hay  $n$  moles de un gas ideal en el cilindro a una temperatura de  $T$ , ¿cuál es la altura  $h$  a la que el pistón está en equilibrio por su propio peso? (b) ¿Cuál es el valor de  $h$  si  $n = 0.200$  mol,  $T = 400$  K,  $A = 0.008\ 00\ m^2$  y  $m = 20.0$  kg?

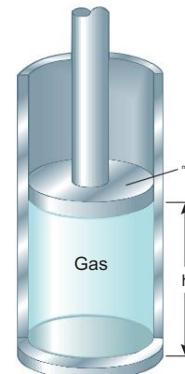


Figura P19.39

- 40.** Una tira bimetálica está hecha de dos cintas de diferentes metales unidas entre sí. (a) Primero suponga que la tira es originalmente recta. A medida que se calienta la tira, el metal con el mayor coeficiente de expansión promedio se expande más que el otro, forzando a la tira a formar un arco con el radio exterior de mayor circunferencia (figura P19.40a, página 550). Deduzca una expresión para el ángulo de flexión  $u$  como función de la longitud inicial de las tiras, sus coeficientes promedio de expansión lineal, el cambio de temperatura y la separación de los centros de las tiras ( $r_2 - r_1$ ). (b) Demuestre que el ángulo de flexión se reduce a cero cuando  $T$  se reduce a cero y también cuando los dos coeficientes de expansión promedio se igualan. (c) ¿Qué pasa si la tira se enfriá? (d) La figura P19.40b muestra una tira bimetálica espiral compacta en un termostato doméstico. Si se interpreta como el ángulo de flexión adicional causado por un cambio de temperatura, la ecuación de la parte (a) también se aplica. El extremo interior de la tira en espiral está fijo y el extremo exterior puede moverse libremente. Suponga que los metales son bronce e invar, el espesor de la tira es de 2 mm y la longitud total de la tira en espiral es de 20,0 cm. Encuentre el ángulo a través del cual gira el extremo libre de la tira cuando la temperatura cambia por

1°C. El extremo libre de la tira sostiene una cápsula parcialmente llena de mercurio, visible sobre la tira en la figura P19.40b. Cuando la cápsula se inclina, el mercurio se desplaza de un extremo al otro para establecer o interrumpir un contacto eléctrico que enciende o apaga el horno.

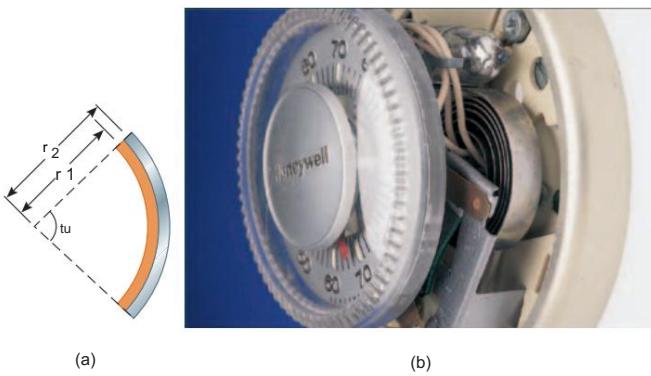


Figura P19.40

- 41** La placa rectangular que se muestra en la figura P19.41 tiene un área  $A_i$  igual a  $w$ . Si la temperatura aumenta en  $T$ , cada dimensión aumenta según la ecuación  $L \propto \alpha_i T$ , donde  $\alpha$  es el coeficiente medio de expansión lineal. Demuestre que el aumento de área es  $A_i 2\alpha_i T$ .

¿Qué aproximación asume esta expresión?

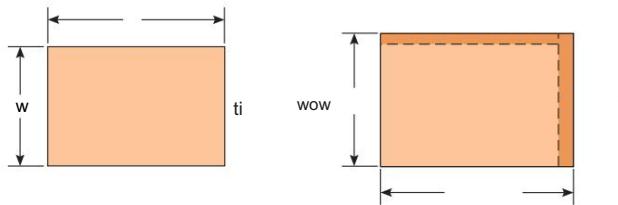


Figura P19.41

- 42** La medición del coeficiente promedio de expansión de volumen de un líquido es complicada porque el recipiente también cambia de tamaño con la temperatura. La figura P19.42 muestra un medio sencillo para superar esta dificultad. Con este aparato, un brazo de un tubo en U se mantiene a 0°C en un baño de agua helada y el otro brazo se mantiene a una temperatura diferente  $T_C$  en un baño de temperatura constante.

El tubo de conexión es horizontal. (a) Explique cómo el uso de este equipo permite la determinación de  $b$  para el líquido a partir de mediciones de las alturas de columna  $h_0$  y  $h_T$  de las columnas de líquido en el tubo en U, sin tener que corregir la expansión del aparato. (b) Deduzca la expresión para  $b$  en términos de  $h_0$ ,  $h_T$  y  $T_C$ .

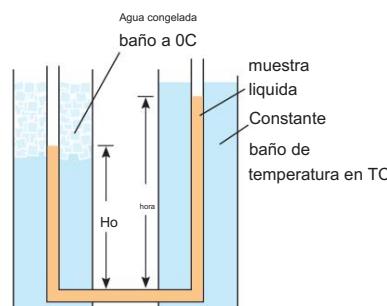


Figura P19.42

- 43** Una varilla de cobre y una varilla de acero difieren en longitud en 5,00 cm a 0 °C. Las varillas se calientan y se enfrian juntas. ¿Es posible que la diferencia de longitud permanezca constante a todas las temperaturas? Explicar. Describa las longitudes a 0 °C con la mayor precisión posible. ¿Puedes decir qué barra es más larga?

- 44** Problema de revisión. Un reloj con un péndulo de latón tiene un período de 1.000 s a 20.0°C. Si la temperatura aumenta a 30.0°C, (a) ¿cuánto cambia el período y (b) cuánto tiempo se adelanta o se atrasa el reloj en una semana?

- 45** Problema de repaso. Considere un objeto con cualquiera de las formas que se muestran en la tabla 10.2. ¿Cuál es el porcentaje de aumento en el momento de inercia del objeto cuando se calienta de 0 °C a 100 °C si está compuesto de (a) cobre o (b) aluminio? Suponga que los coeficientes de expansión lineal promedio que se muestran en la tabla 19.1 no varían entre 0 °C y 100 °C.

- 46** Problema de repaso. (a) Obtenga una expresión para la fuerza de flotación sobre un globo esférico, sumergido en agua, en función de la profundidad debajo de la superficie, el volumen del globo en la superficie, la presión en la superficie y la densidad del globo. agua. (Suponga que la temperatura del agua no cambia con la profundidad.) (b) ¿La fuerza de flotación aumenta o disminuye a medida que se sumerge el globo? (c) ¿A qué profundidad la fuerza de flotación es la mitad del valor de la superficie?

- 47** Dos tramos de concreto de un puente de 250 m de largo se colocan uno al lado del otro de modo que no quede espacio para la expansión (Fig. P19.47a). Si ocurre un aumento de temperatura de 20.0 °C, ¿cuál es la altura  $y$  a la que se elevan los vanos cuando se pandean (figura P19.47b)?

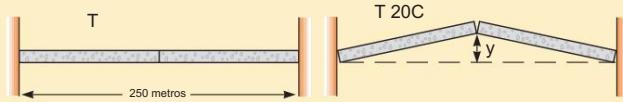


Figura P19.47 Problemas 47 y 48.

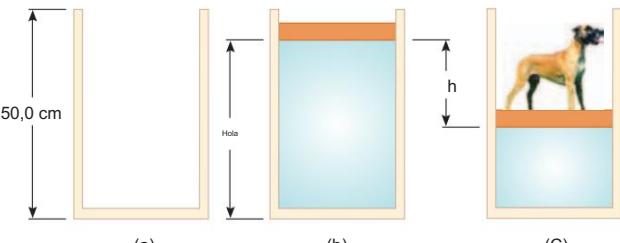
- 48** Dos tramos de hormigón que forman un puente de longitud  $L$  se colocan uno al lado del otro de modo que no quede espacio para la expansión (figura P19.47a). Si ocurre un aumento de temperatura de  $T$ , ¿cuál es la altura  $y$  a la que se elevan los vanos cuando se pandean (figura P19.47b)? **49.** (a) Demuestre que

la densidad de un gas ideal que ocupa un volumen  $V$  está dada por  $\rho = PM/RT$ , donde  $M$  es la masa molar. (b) Determine la densidad del oxígeno gaseoso a presión atmosférica y 20,0 °C.

- 50** (a) Considere la definición del coeficiente de expansión de volumen como

$$b = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \Big|_{P \text{ constante}} = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}$$

Utilice la ecuación de estado de un gas ideal para demostrar que el coeficiente de expansión de volumen de un gas ideal a presión constante está dado por  $b = 1/T$ , donde  $T$  es la temperatura absoluta. (b) ¿Qué valor predice esta expresión para  $b$  a 0 °C? Indique cómo se compara este resultado con los valores experimentales para helio y aire en la Tabla

- 19.1. Observe que estos valores son mucho mayores que los coeficientes de expansión de volumen para la mayoría de los líquidos y sólidos.
- 51.** Comenzando con la ecuación 19.10, demuestre que la presión total  $P$  en un recipiente lleno con una mezcla de varios gases ideales presiones  $P_1 P_2 P_3 \dots$ , donde  $P_1, P_2, \dots$ , son las asegura que cada gas ejercería si él solo llenara el recipiente. (Estas presiones individuales se denominan presiones parciales de los gases respectivos). Este resultado se conoce como la ley de presiones parciales de Dalton.
- 52.** Problema de repaso. Después de una colisión en el espacio exterior, un disco de cobre a  $850^\circ\text{C}$  gira alrededor de su eje con una rapidez angular de  $25,0 \text{ rad/s}$ . A medida que el disco irradia luz infrarroja, su temperatura cae a  $20,0^\circ\text{C}$ . Ningún par externo actúa sobre el disco. (a) ¿Cambia la rapidez angular cuando el disco se enfria? Explique cómo cambia o por qué no. (b) ¿Cuál es su velocidad angular a la temperatura más baja?
- 53.** El gas helio se vende en tanques de acero. Si el helio se usa para inflar un globo, ¿podría el globo levantar el tanque esférico en el que vino el helio? Justifica tu respuesta. El acero se romperá si se somete a un esfuerzo de tracción superior a su límite elástico de  $5\ 108 \text{ N/m}^2$ . Sugerencia: puede considerar una coraza de acero de radio  $r$  y espesor  $t$  que tiene la densidad del hierro y contiene helio a alta presión y está a punto de romperse en dos hemisferios.
- 54.** Un cilindro que tiene un radio de  $40.0 \text{ cm}$  y una profundidad de  $50.0 \text{ cm}$  está lleno de aire a  $20.0^\circ\text{C}$  y  $1.00 \text{ atm}$  (figura P19.54a). Ahora se baja un pistón de  $20.0 \text{ kg}$  dentro del cilindro, comprimiendo el aire atrapado en el interior cuando alcanza la altura de equilibrio  $h$  (figura P19.54b). Finalmente, un perro de  $75.0 \text{ kg}$  se para sobre el pistón, comprimiendo aún más el aire, que permanece a  $20^\circ\text{C}$  (Fig. P19.54c). (a) ¿Qué tan abajo ( $h$ ) se mueve el pistón cuando el perro lo pisa? (b) ¿A qué temperatura debe calentarse el gas para elevar el pistón y el perro nuevamente a su posición alta?
- 
- Figura P19.54
- 55.** La relación  $L_f L_i$  ( $1$  a  $T$ ) es una aproximación válida cuando el coeficiente de expansión promedio es pequeño. Si  $a$  es grande, se debe integrar la relación  $dL/dT aL$  para determinar la longitud final. (a) Suponiendo que el coeficiente de expansión lineal es constante cuando  $L$  varía, determine una expresión general para la longitud final. (b) Dada una barra de  $1.00 \text{ m}$  de longitud y un cambio de temperatura de  $100.0^\circ\text{C}$ , determine el error causado por la aproximación cuando a  $2.00 \text{ 105 } (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$  (un valor típico para un metal) y cuando a  $0.020 \text{ 0 } (\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$  (un valor grande poco realista para la comparación).
- 56.** Un alambre de acero y un alambre de cobre, cada uno de  $2.000 \text{ mm}$  de diámetro, se unen por los extremos. A  $40.0^\circ\text{C}$ , cada uno tiene una longitud sin estirar de  $2.000 \text{ m}$ . Los cables están conectados entre dos soportes fijos separados  $4.000 \text{ m}$  sobre una mesa. El alambre de acero se extiende desde  $x = 2.000 \text{ m}$  hasta  $x = 0$ , el alambre de cobre se extiende desde  $x = 0$  hasta  $x = 2.000 \text{ m}$  y la tensión es despreciable. Luego se baja la temperatura a  $20.0^\circ\text{C}$ . A esta temperatura más baja, encuentre la tensión en el alambre y la coordenada  $x$  de la unión entre los alambres. (Consulte las Tablas 12.1 y 19.1.)
- 57.** Problema de repaso. Una cuerda de guitarra hecha de acero con un diámetro de  $1,00 \text{ mm}$  se estira entre soportes separados  $80,0 \text{ cm}$ . La temperatura es  $0.0^\circ\text{C}$ . (a) Encuentre la masa por unidad de longitud de esta cuerda. (Use el valor  $7.86 \text{ 103 kg/m}^3$  para la densidad.) (b) La frecuencia fundamental de las oscilaciones transversales de la cuerda es de  $200 \text{ Hz}$ . ¿Cuál es la tensión en la cuerda? (c) La temperatura se eleva a  $30.0^\circ\text{C}$ . Encuentre los valores resultantes de la tensión y la frecuencia fundamental. Suponga que tanto el módulo de Young (tabla 12.1) como el coeficiente de expansión promedio (tabla 19.1) tienen valores constantes entre  $0,0^\circ\text{C}$  y  $30,0^\circ\text{C}$ .
- 58.** En una planta de procesamiento químico, una cámara de reacción de volumen fijo  $V_0$  está conectada a una cámara de depósito de volumen fijo  $4V_0$  mediante un pasaje que contiene un tapón poroso termoaislante. El tapón permite que las cámaras estén a diferentes temperaturas. Permite que el gas pase de una cámara a otra, asegurando que la presión sea la misma en ambas. En un punto del procesamiento, ambas cámaras contienen gas a una presión de  $1.00 \text{ atm}$  y una temperatura de  $27.0^\circ\text{C}$ . Las válvulas de admisión y escape al par de cámaras están cerradas. El depósito se mantiene en  $27.0^\circ\text{C}$  mientras la cámara de reacción se calienta a  $400^\circ\text{C}$ . ¿Cuál es la presión en ambas cámaras después de alcanzar estas temperaturas?
- 59.** Una vía férrea de acero de  $1.00 \text{ km}$  está asegurada en ambos extremos cuando la temperatura es de  $20.0^\circ\text{C}$ . A medida que aumenta la temperatura, el riel se pandea y toma la forma de un arco de círculo vertical. Encuentre la altura  $h$  del centro del riel cuando la temperatura es de  $25.0^\circ\text{C}$ . Necesitarás resolver una ecuación trascendental.
- 60.** Problema de revisión. El techo de una casa perfectamente plano forma un ángulo  $u$  con la horizontal. Cuando cambia su temperatura, entre  $T_c$  antes del amanecer de cada día y  $T_h$  a media tarde, el techo se expande y contrae uniformemente con un coeficiente de expansión térmica  $a_1$ . Descansando sobre el techo hay una placa de metal plana y rectangular con un coeficiente de expansión  $a_2$ , mayor que  $a_1$ . La longitud de la placa es  $L$ , medida a lo largo de la pendiente del techo. La componente del peso de la placa perpendicular al techo es soportada por una fuerza normal uniformemente distribuida sobre el área de la placa. El coeficiente de fricción cinética entre la placa y el techo es  $m_k$ . La placa siempre está a la misma temperatura que el techo, por lo que suponemos que su temperatura cambia continuamente. Debido a la diferencia en los coeficientes de expansión, cada parte de la placa se mueve en relación con el techo debajo de ella, a excepción de los puntos a lo largo de cierta línea horizontal que atraviesa la placa llamada línea estacionaria. Si la temperatura aumenta, las partes de la placa debajo de la línea estacionaria se mueven hacia abajo en relación con el techo y sienten una fuerza de fricción cinética que actúa sobre el techo. Los elementos de área por encima de la línea estacionaria se deslizan hacia arriba por el techo y sobre ellos la fricción cinética actúa hacia abajo en forma paralela al techo. La línea estacionaria no ocupa área, por lo que suponemos que no hay fuerza de fricción estática.

ción actúa sobre la placa mientras la temperatura está cambiando. La placa en su conjunto está casi en equilibrio, por lo que la fuerza de fricción neta sobre ella debe ser igual a la componente de su peso que actúa sobre el plano inclinado. (a) Demuestre que la línea estacionaria está a una distancia de

$$\frac{L}{2 \text{ a } 1} = \frac{\text{broncearte}}{mk} b$$

por debajo del borde superior de la placa. (b) Analice las fuerzas que actúan sobre la placa cuando la temperatura descende y demuestre que la línea estacionaria está a la misma distancia sobre el borde inferior de la placa. (c) Demuestre que el

placa baja por el techo como un gusano, moviéndose cada día por la distancia

$$\frac{L}{mk} 1a2 a1 2 1Th Tc2 \tan u$$

(d) Evalúe la distancia que se mueve una placa de aluminio cada día si su longitud es de 1,20 m, la temperatura oscila entre 4,00 °C y 36,0 °C, y el techo tiene una pendiente de 18,5°, un coeficiente de expansión lineal de  $1,50 \times 10^{-5}$  (°C) y un coeficiente de fricción de 0,420 con la placa. (e) ¿Qué pasa si? ¿Qué sucede si el coeficiente de expansión de la placa es menor que el del techo? ¿Subirá la placa por el techo?

## Respuestas a cuestionarios rápidos

- 19.1 (c). La dirección de la transferencia de energía depende únicamente de la temperatura y no del tamaño del objeto o de qué objeto tiene más masa.
- 19.2 (c). La frase "el doble de caliente" se refiere a una proporción de temperaturas. Cuando las temperaturas dadas se convierten a kelvins, solo las de la parte (c) están en la proporción correcta.
- 19.3 (c). La gasolina tiene el mayor coeficiente promedio de volumen expansión.
- 19.4 (c). Una cavidad en un material se expande de la misma manera que si estaban llenos de ese material.

19.5 (a). En un día frío, la presión del aire atrapado en las burbujas se reduce de acuerdo con la ley de los gases ideales. Por lo tanto, el volumen de las burbujas puede ser menor que en un día caluroso y el contenido del paquete puede cambiar más.

19.6 (b). Debido al aumento de temperatura, el aire se expande. En consecuencia, parte del aire se filtra hacia el exterior, dejando menos aire en la casa.



En esta fotografía del lago Bow en el Parque Nacional Banff, Alberta, vemos evidencia de agua en las tres fases. En el lago hay agua líquida, y en el suelo aparece agua sólida en forma de nieve. Las nubes en el cielo consisten en gotitas de agua líquida que se han condensado a partir del vapor de agua gaseoso en el aire. Los cambios de una sustancia de una fase a otra son el resultado de la transferencia de energía. (Jacob Taposchaner/Getty Images)

- 20.1 Calor y energía interna
- 20.2 Calor específico y calorimetría
- 20.3 Calor latente
- 20.4 Trabajo y calor en procesos termodinámicos
- 20.5 La primera ley de la termodinámica
- 20.6 Algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica
- 20.7 Mecanismos de transferencia de energía

# 20 La primera ley de la termodinámica

Hasta alrededor de 1850, los campos de la termodinámica y la mecánica se consideraban dos ramas distintas de la ciencia. La ley de conservación de la energía parecía describir sólo ciertos tipos de sistemas mecánicos. Los experimentos de mediados del siglo XIX realizados por el inglés James Joule y otros, sin embargo, mostraron una fuerte conexión entre la transferencia de energía por calor en procesos térmicos y la transferencia de energía por trabajo en procesos mecánicos. Hoy sabemos que la energía mecánica se puede transformar en energía interna, la cual se define formalmente en este capítulo. Una vez que el concepto de energía se generalizó de la mecánica para incluir la energía interna, la ley de conservación de la energía surgió como una ley universal de naturaleza.

Este capítulo se centra en el concepto de energía interna, la primera ley de la termodinámica y algunas aplicaciones importantes de la primera ley. La primera ley de la termodinámica describe sistemas en los que el único cambio de energía es el de la energía interna y las transferencias de energía son por calor y trabajo. Una diferencia importante en nuestra discusión del trabajo en este capítulo con respecto a la mayoría de los capítulos sobre mecánica es que consideraremos el trabajo realizado en sistemas deformables .

## 20.1 Calor y energía interna

### PREVENCIÓN DE ERRORES 20.1

Energía interna, energía térmica y energía de enlace

Al leer otros libros de física, es posible que vea términos como energía térmica y energía de enlace. La energía térmica puede interpretarse como la parte de la energía interna asociada con el movimiento aleatorio de las moléculas y, por lo tanto, relacionada con la temperatura. La energía de enlace es la energía potencial intermolecular. Por lo tanto,

energía interna energía térmica energía de enlace

Aunque este desglose se presenta aquí como aclaración con respecto a otros libros, no utilizaremos estos términos porque no son necesarios.

### PREVENCIÓN DE ERRORES 20.2

El calor, la temperatura y la energía interna son diferentes

Mientras lee el periódico o escucha la radio, esté atento a las frases usadas incorrectamente, incluida la palabra calor , y piense en la palabra adecuada para usar en lugar de calor. Los ejemplos incorrectos incluyen "Cuando el camión frenó hasta detenerse, la fricción generó una gran cantidad de calor" y "El calor de un caluroso día de verano" . . ."

Al principio, es importante hacer una distinción importante entre energía interna y calor, términos que a menudo se usan incorrectamente como sinónimos en el lenguaje popular. La energía interna es toda la energía de un sistema que está asociada con sus componentes microscópicos (átomos y moléculas) cuando se ve desde un marco de referencia en reposo con respecto al centro de masa del sistema. La última parte de esta oración asegura que cualquier energía cinética global del sistema debido a su movimiento a través del espacio no se incluye en la energía interna. La energía interna incluye la energía cinética del movimiento aleatorio de traslación, rotación y vibración de las moléculas; energía potencial vibratoria asociada con fuerzas entre átomos en moléculas; y energía potencial eléctrica asociada con fuerzas entre moléculas. Es útil relacionar la energía interna con la temperatura de un objeto, pero esta relación es limitada.

En la sección 20.3 mostramos que los cambios de energía interna también pueden ocurrir en ausencia de cambios de temperatura.

El calor se define como la transferencia de energía a través de los límites de un sistema debido a una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. Cuando calientas una sustancia, le estás transfiriendo energía al ponerla en contacto con un entorno que tiene una temperatura más alta. Tal es el caso, por ejemplo, cuando colocas una olla de agua fría sobre el quemador de una estufa. El quemador está a una temperatura más alta que el agua, por lo que el agua gana energía. También usaremos el término calor para representar la cantidad de energía transferida por este método.

Como analogía a la distinción entre calor y energía interna, considere la distinción entre trabajo y energía mecánica discutida en el Capítulo 7. El trabajo realizado en un sistema es una medida de la cantidad de energía transferida al sistema desde su entorno, mientras que la mecánica La energía (energía cinética más energía potencial) de un sistema es una consecuencia del movimiento y la configuración del sistema. Por lo tanto, cuando una persona realiza un trabajo sobre un sistema, la energía se transfiere de la persona al sistema. No tiene sentido hablar del trabajo de un sistema; uno puede referirse solo al trabajo realizado en o por un sistema cuando ha ocurrido algún proceso en el que la energía se ha transferido hacia o desde el sistema. Asimismo, no tiene sentido hablar del calor de un sistema; uno puede referirse al calor solo cuando la energía ha sido transferida como resultado de una diferencia de temperatura. Tanto el calor como el trabajo son formas de cambiar la energía de un sistema.

### Unidades de Calor

Los primeros estudios sobre el calor se centraron en el aumento resultante de la temperatura de una sustancia, que a menudo era agua. Las nociones iniciales de calor se basaban en un fluido llamado calórico que fluía de una sustancia a otra y provocaba cambios de temperatura. Del nombre de este mítico fluido deriva una unidad de energía relacionada con los procesos térmicos, la caloría (cal), que se define como la cantidad de energía transferida necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14,5°C a 15,5°C. . 1 (La "Caloría", escrita con una "C" mayúscula y utilizada para describir el contenido energético de los alimentos, es en realidad una kilocaloría.) La unidad de energía en el sistema tradicional estadounidense es la unidad térmica británica (Btu), que es definida como la cantidad de transferencia de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 libra de agua de 63 °F a 64 °F.

Una vez que quedó clara la relación entre la energía en los procesos térmicos y mecánicos, no hubo necesidad de una unidad separada relacionada con los procesos térmicos.

El joule ya ha sido definido como una unidad de energía basada en procesos mecánicos. Los científicos se están alejando cada vez más de la caloría y el Btu y están utilizando el joule cuando describen procesos térmicos. En este libro de texto, el calor, el trabajo y la energía interna generalmente se miden en joules.

<sup>1</sup> Originalmente, la caloría se definió como la transferencia de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua en 1°C. Sin embargo, mediciones cuidadosas mostraron que la cantidad de energía requerida para producir un cambio de 1°C depende en cierta medida de la temperatura inicial; por lo tanto, se desarrolló una definición más precisa.

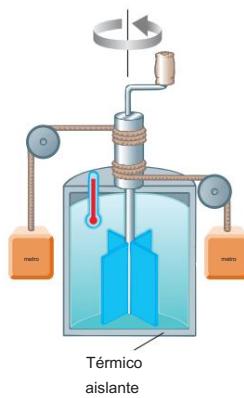


Figura 20.1 Experimento de Joule para determinar el equivalente mecánico del calor. Los bloques que caen hacen girar las paletas, lo que hace que aumente la temperatura del agua.

### El equivalente mecánico del calor

En los capítulos 7 y 8 encontramos que siempre que hay fricción en un sistema mecánico, la energía mecánica en el sistema disminuye; en otras palabras, la energía mecánica no se conserva en presencia de fuerzas no conservativas. Diversos experimentos muestran que esta energía mecánica no desaparece simplemente sino que se transforma en energía interna. Puede realizar un experimento de este tipo en casa martillando un clavo en un trozo de madera. ¿Qué sucede con toda la energía cinética del martillo una vez que hayas terminado? Parte de ella está ahora en la uña como energía interna, como lo demuestra el hecho de que la uña está notablemente más caliente. Aunque esta conexión entre energía mecánica e interna fue sugerida por primera vez por Benjamin Thompson, fue James Prescott Joule quien estableció la equivalencia de la disminución de la energía mecánica y el aumento de la energía interna.

En la figura 20.1 se muestra un diagrama esquemático del experimento más famoso de Joule. El sistema de interés es el agua en un recipiente aislado térmicamente. El trabajo se realiza sobre el agua mediante una rueda de paletas giratoria, que es impulsada por pesados bloques que caen a una velocidad constante. Si se desprecia la energía perdida en los cojinetes ya través de las paredes, la pérdida de energía potencial del sistema bloques-Tierra a medida que caen los bloques es igual al trabajo realizado por la rueda de paletas sobre el agua. Si los dos bloques caen una distancia  $h$ , la pérdida de energía potencial es  $2mgh$ , donde  $m$  es la masa de un bloque; esta energía hace que aumente la temperatura del agua debido a la fricción entre las paletas y el agua. Al variar las condiciones del experimento, Joule descubrió que la pérdida de energía mecánica es proporcional al producto de la masa del agua y el aumento de la temperatura del agua. Se encontró que la constante de proporcionalidad era de aproximadamente  $4,18 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ . Por tanto,  $4,18 \text{ J}$  de energía mecánica elevan la temperatura de  $1 \text{ g}$  de agua en  $1^\circ\text{C}$ . Medidas más precisas tomadas posteriormente demostraron que la proporcionalidad era de  $4,186 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$  cuando la temperatura del agua se elevaba de  $14,5^\circ\text{C}$  a  $15,5^\circ\text{C}$ . Adoptamos este valor de "caloría de 15 grados":

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J} \quad (20.1)$$

igualdad se conoce, por razones puramente históricas, como el equivalente mecánico del calor.



JAMES PRESCOTT JOULE

Físico británico (1818–1889)  
Joule recibió cierta educación formal en matemáticas, filosofía y química de John Dalton, pero en gran parte fue autodidacta. La investigación de Joule condujo al establecimiento del principio de conservación de la energía. Su estudio de la relación cuantitativa entre los efectos eléctricos, mecánicos y químicos del calor culminó con su anuncio en 1843 de la cantidad de trabajo requerido para producir una unidad de energía, llamada equivalente mecánico de calor.

#### EJEMPLO 20.1

#### Perder peso de la manera difícil

Un estudiante come una cena clasificada en 2 000 Calorías. Desea realizar una cantidad equivalente de trabajo en el gimnasio levantando una barra de pesas de 50.0 kg. ¿Cuántas veces debe levantar la barra para gastar tanta energía? Suponga que eleva la barra 2,00 m cada vez que la levanta y que no recupera energía cuando baja la barra.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine al estudiante levantando la barra. Está trabajando en el sistema de la barra y la Tierra, por lo que la energía sale de su cuerpo. La cantidad total de trabajo que debe realizar el alumno es de 2 000 Calorías.

Categorizar Modelamos el sistema de la barra y la Tierra como un sistema no aislado.

Analizar Reducir la ecuación de conservación de la energía, Ecuación 8.2, a la expresión apropiada para el sistema de la barra y la Tierra:

Exprese el cambio en la energía potencial gravitacional del sistema después de levantar la barra una vez:

Exprese la cantidad total de energía que debe transferirse al sistema mediante trabajo para levantar la barra  $n$  veces, suponiendo que no se recupera energía cuando se baja la barra:

Sustituya la Ecuación (2) en la Ecuación (1):

Resolver para  $n$ :

$$\frac{mgh}{n} = \frac{12\,000 \text{ Cal}}{150,0 \text{ kg} \cdot 19,80 \text{ m/s}^2 \cdot 2 \cdot 12,00 \text{ m}^2 / 1.000 \text{ Cal/orcadas} \cdot 4.186 \text{ J/cal}}$$

8.54 103 veces

Finalizar Si el alumno está en buena forma y levanta la barra una vez cada 5 s, tardará unas 12 h en realizar esta hazaña. Claramente, es mucho más fácil para este estudiante perder peso haciendo dieta.

En realidad, el cuerpo humano no es 100% eficiente. Por lo tanto, no toda la energía transformada dentro del cuerpo de la cena se transfiere fuera del cuerpo por el trabajo realizado en la barra. Parte de esta energía se utiliza para bombeo sangre y realizar otras funciones dentro del cuerpo. Por lo tanto, las 2 000 calorías se pueden quemar en menos de 12 h cuando se incluyen estos otros requisitos de energía.

## 20.2 Calor específico y calorimetría

Cuando se agrega energía a un sistema y no hay cambio en la energía cinética o potencial del sistema, la temperatura del sistema generalmente aumenta. (Una excepción a este enunciado es el caso en el que un sistema sufre un cambio de estado, también llamado transición de fase, como se analiza en la siguiente sección). Si el sistema consta de una muestra de una sustancia, encontramos que la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una masa dada de la sustancia en cierta cantidad varía de una sustancia a otra. Por ejemplo, la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de 1 kg de agua en 1 °C es de 4 186 J, pero la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de 1 kg de cobre en 1 °C es sólo de 387 J. En la discusión que sigue, usaremos el calor como nuestro ejemplo de transferencia de energía, pero tenga en cuenta que la temperatura del sistema podría cambiarse por medio de cualquier método de transferencia de energía.

La capacidad calorífica  $C$  de una muestra en particular se define como la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de esa muestra en 1 °C. De esta definición, vemos que si la energía  $Q$  produce un cambio  $T$  en la temperatura de una muestra, entonces

Control de calidad  $\frac{dT}{T}$

(20.2)

El calor específico  $c$  de una sustancia es la capacidad calorífica por unidad de masa. Por lo tanto, si la energía  $Q$  se transfiere a una muestra de una sustancia con masa  $m$  y la temperatura de la muestra cambia en  $T$ , el calor específico de la sustancia es

**TABLA 20.1**

Calores específicos de algunas sustancias a 25 °C y presión atmosférica

Sustancia	Calor específico c		Sustancia	Calor específico c	
	J/kg °C	cal/g °C		J/kg °C	cal/g °C
<b>Sólidos elementales</b>					
Aluminio	900	0.215	Latón	380	0.092
Berilio	1 830	0.436	Vaso	837	0.200
Cadmio	230	0.055	Hielo (5°C)	2 090	0.50
Cobre	387	0.092 4	Mármol	860	0.21
Germanio	322	0.077	Madera	1 700	0.41
Oro	129	0.030 8	Líquidos		
Hierro	448	0.107	Alcohol (etílico)	2 400	0.58
Dirigir	128	0.030 5	Mercurio	140	0.033
Silicio	703	0.168	Agua (15°C)	4 186	1.00
Plata	234	0.056	Gas		
			Vapor (100°C)	2 010	0.48

$$c = \frac{q}{m \Delta T} \quad (20.3)$$

Calor específico

El calor específico es esencialmente una medida de cuán térmicamente insensible es una sustancia a la adición de energía. Cuanto mayor sea el calor específico de un material, más energía se debe agregar a una masa dada del material para causar un cambio de temperatura particular. La tabla 20.1 enumera los calores específicos representativos.

A partir de esta definición, podemos relacionar la energía Q transferida entre una muestra de masa m de un material y su entorno a un cambio de temperatura T como

$$Q = mc \Delta T \quad (20.4)$$

Por ejemplo, la energía requerida para elevar la temperatura de 0.500 kg de agua en 103 J. es Q (0.500 kg)(4 186 J/kg °C)(3.00°C) 6.28 cuando la temperatura aumenta, Q y T se toman como positivos y las transferencias de energía al sistema. Cuando la temperatura disminuye, Q y T son negativos y la energía se transfiere fuera del sistema.

El calor específico varía con la temperatura. Sin embargo, si los intervalos de temperatura no son demasiado grandes, la variación de temperatura puede ignorarse y c puede tratarse como una constante.<sup>2</sup> Por ejemplo, el calor específico del agua varía solo alrededor del 1% de 0 °C a 100 °C presión atmosférica. A menos que se indique lo contrario, despreciaremos tales variaciones.

**Prueba rápida 20.1** Imagine que tiene 1 kg de hierro, vidrio y agua, y las tres muestras están a 10 °C. (a) Clasifique las muestras de la temperatura más baja a la más alta después de agregar 100 J de energía a cada muestra. (b) Clasifique las muestras de menor a mayor cantidad de energía transferida por calor si cada muestra aumenta su temperatura en 20°C.

Observe en la tabla 20.1 que el agua tiene el calor específico más alto de los materiales comunes. Este alto calor específico es en parte responsable de las temperaturas moderadas que se encuentran cerca de grandes masas de agua. A medida que la temperatura de un cuerpo de agua disminuye durante el invierno, la energía se transfiere del agua de enfriamiento al aire por medio del calor, lo que aumenta la energía interna del aire. Debido al alto calor específico

**PREVENCIÓN DE ERRORES 20.3**

Una elección desafortunada de terminología

El nombre calor específico es un vestigio desafortunado de los días en que la termodinámica y la mecánica se desarrollaron por separado. Un nombre mejor sería transferencia de energía específica, pero el término existente está demasiado arraigado para ser reemplazado.

**PREVENCIÓN DE ERRORES 20.4** La energía se puede transferir por cualquier método

El símbolo Q representa la cantidad de energía transferida, pero tenga en cuenta que la transferencia de energía en la Ecuación 20.4 podría ser por cualquiera de los métodos presentados en el Capítulo 8; no tiene que ser calor. Por ejemplo, doblar repetidamente una percha de alambre eleva la temperatura en el punto de doblado por el trabajo.

<sup>2</sup> La definición dada por la Ecuación 20.4 supone que el calor específico no varía con la temperatura en el intervalo  $T_f - T_i$ . En general, si c varía con la temperatura durante el intervalo, la expresión correcta para Q es  $Q = \int_{T_i}^{T_f} c \, dT$ .

de agua, una cantidad relativamente grande de energía se transfiere al aire incluso para cambios de temperatura modestos del agua. Los vientos predominantes en la costa oeste de los Estados Unidos son hacia la tierra (hacia el este). Por lo tanto, la energía liberada por el Océano Pacífico a medida que se enfria mantiene las áreas costeras mucho más cálidas de lo que serían de otro modo. Como resultado, los estados de la costa oeste generalmente tienen un clima invernal más favorable que los estados de la costa este, donde los vientos predominantes no tienden a llevar la energía hacia tierra.

## PREVENCIÓN DE ERRORES

### 20.5 Recuerde el signo negativo

Es fundamental incluir el signo negativo en la Ecuación 20.5. El signo negativo en la ecuación es necesario para mantener la consistencia con nuestra convención de signos para la transferencia de energía. La transferencia de energía  $Q_{\text{caliente}}$  tiene un valor negativo porque la energía sale de la sustancia caliente. El signo negativo en la ecuación asegura que el lado derecho sea un número positivo, consistente con el lado izquierdo, que es positivo porque la energía está entrando en el frío. agua.

## Calorimetría Una

técnica para medir el calor específico consiste en calentar una muestra a una temperatura conocida  $T_x$ , colocarla en un recipiente que contiene agua de masa conocida y medir la temperatura del agua después de alcanzar la temperatura de equilibrio  $T_w$ . Esta técnica se denominó calorimetría, y los dispositivos en los que se produce esta transferencia de energía se denominan calorímetros. Si el sistema de la muestra y el agua está aislado, el principio de conservación de la energía requiere que la cantidad de energía que sale de la muestra (de calor específico desconocido) sea igual a la cantidad de energía que entra al agua.<sup>3</sup> La conservación de la energía nos permite escribir la representación matemática de esta declaración de energía como

$$Q_{\text{frío}} - Q_{\text{caliente}} = 0 \quad (20.5)$$

Supongamos que  $m_x$  es la masa de una muestra de alguna sustancia cuyo calor específico deseamos determinar. Llamemos a su calor específico  $c_x$  y a su temperatura inicial  $T_x$ .

Asimismo, sean  $m_w$ ,  $c_w$  y  $T_w$  los valores correspondientes para el agua. Si  $T_f$  es la temperatura de equilibrio final después de mezclar todo, la ecuación 20.4 muestra que la transferencia de energía para el agua es  $m_w c_w (T_f - T_w)$ , que es positiva porque  $T_w$ , y que la transferencia de energía para la muestra de calor específico desconocido es  $m_x c_x (T_f - T_x)$ , que es negativo. Sustituyendo estas expresiones en la Ecuación 20.5 da

$$m_w c_w (T_f - T_w) = -m_x c_x (T_f - T_x)$$

Resolviendo para  $c_x$  da

$$c_x = \frac{m_w c_w (T_f - T_w)}{m_x (T_f - T_x)}$$

## EJEMPLO 20.2

### Enfriando un lingote caliente

Un lingote de metal de 0.050 kg se calienta a 200.0 °C y luego se deja caer en un calorímetro que contiene 0.400 kg de agua inicialmente a 20.0 °C. La temperatura de equilibrio final del sistema mixto es de 22,4°C. Encuentre el calor específico del metal.

## SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine el proceso que ocurre en el sistema. La energía sale del lingote caliente y va al agua fría, por lo que el lingote se enfria y el agua se calienta. Una vez que ambos están a la misma temperatura, la transferencia de energía se detiene.

Categorizar Usamos una ecuación desarrollada en esta sección, por lo que clasificamos este ejemplo como un problema de sustitución.

Use la Ecuación 20.4 para evaluar cada lado de la Ecuación 20.5:

$$m_w c_w (T_f - T_w) = 0.400 \text{ kg} \cdot 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (22.4^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C})$$

$$= 10.400 \text{ kg} \cdot 14.186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 2.4^\circ\text{C}$$

$$m_x c_x (T_f - T_x) = 0.050 \text{ kg} \cdot c_x \cdot (22.4^\circ\text{C} - 200.0^\circ\text{C})$$

$$= 10.050 \text{ kg} \cdot c_x \cdot -177.6^\circ\text{C}$$

<sup>3</sup> Para mediciones precisas, el contenedor de agua debe incluirse en nuestros cálculos porque también intercambia energía con la muestra. Sin embargo, hacerlo requeriría que conocieras la masa y la composición del contenedor. Si la masa del agua es mucho mayor que la del recipiente, podemos despreciar los efectos del recipiente.

Resuelva para el calor específico del metal:

$c_x = 453 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Lo más probable es que el lingote sea hierro, como puede ver al comparar este resultado con los datos proporcionados en la tabla 20.1. La temperatura del lingote está inicialmente por encima del punto de vapor. Por lo tanto, parte del agua puede vaporizarse cuando el lingote se deja caer en el agua. Suponemos que el sistema está sellado y este vapor no puede escapar. Debido a que la temperatura de equilibrio final es más baja que el punto de vapor, cualquier vapor que resulte se vuelve a condensar en agua.

**¿Y si?** Suponga que está realizando un experimento en el laboratorio que usa esta técnica para determinar el calor específico de una muestra y desea disminuir la incertidumbre general en su resultado final para  $c_x$ . De los datos dados en este ejemplo, ¿cambiar cuál valor sería más efectivo para disminuir la incertidumbre?

**Respuesta** La mayor incertidumbre experimental está asociada con la pequeña diferencia de temperatura de  $2.4^\circ\text{C}$  para el agua. Por ejemplo, usando las reglas para la propagación de la incertidumbre en la Sección B.8 del Apéndice, una incertidumbre de  $0.1^\circ\text{C}$  en cada uno de  $T_f$  y  $T_w$  conduce a una incertidumbre del 8% en su diferencia. Para que esta diferencia de temperatura sea mayor experimentalmente, el cambio más efectivo es disminuir la cantidad de agua.

---

### EJEMPLO 20.3

Tiempo de diversión para un vaquero

Un vaquero dispara una bala de plata con una rapidez inicial de  $200 \text{ m/s}$  contra la pared de pino de una cantina. Suponga que toda la energía interna generada por el impacto permanece en la bala. ¿Cuál es el cambio de temperatura de la bala?

#### SOLUCIÓN

**Conceptualizar** Imagine experiencias similares que haya tenido en las que la energía mecánica se transforma en energía interna cuando se detiene un objeto en movimiento. Por ejemplo, como se mencionó en la Sección 20.1, un clavo se calienta después de golpearlo varias veces con un martillo.

**Categorizar** La viñeta se modela como un sistema aislado. No se realiza trabajo sobre el sistema porque la fuerza de la pared se mueve sin desplazamiento. Este ejemplo es similar al patinador que se empuja contra una pared en la Sección 9.7.

Allí, la pared no realiza ningún trabajo sobre el patinador y la energía potencial almacenada en el cuerpo de las comidas anteriores se transforma en energía cinética. Aquí, la pared no realiza ningún trabajo sobre la bala y la energía cinética se transforma en energía interna.

Analizar Reduzca la ecuación de conservación de la energía,

$\Delta E_{\text{int}} = 0$

Ecuación 8.2, a la expresión apropiada para el sistema de la bala:

El cambio en la energía interna de la bala es el mismo que ocurriría si la energía fuera transferida por calor desde una estufa a la bala. Usando este concepto, evalúe el cambio en la energía interna de la bala:

$\Delta E_{\text{int}} = Q = mc\Delta T$

Sustituya la Ecuación (2) en la Ecuación (1):

$10 = \frac{1}{2}mv^2 - mc\Delta T$

Resuelva para  $T$ , usando  $234 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  como el calor específico de la plata (vea la Tabla 20.1):

$$(3) \Delta T = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{mc} = \frac{2v^2}{2c} = \frac{1200 \text{ m/s}^2}{2 \cdot 1234 \text{ J/kg}^\circ\text{C}}$$

$85.5^\circ\text{C}$

Finalizar Observe que el resultado no depende de la masa de la bala.

**¿Y si?** Supongamos que el vaquero se queda sin balas de plata y dispara una bala de plomo a la misma velocidad contra la pared. ¿Será mayor o menor el cambio de temperatura de la bala?

Respuesta La tabla 20.1 muestra que el calor específico del plomo es 128 J/kg °C, que es menor que el de la plata. Por lo tanto, una determinada cantidad de energía de entrada o de transformación aumenta la temperatura de la plata y la temperatura final de la bala de plomo será mayor. En la Ecuación (3), sustituimos el nuevo valor por el calor específico:

$$\frac{cT}{2c} = \frac{\frac{v^2}{2}}{1200 \text{ m/s}^2} = \frac{156^\circ\text{C}}{21128 \text{ J/kg} \cdot \text{K}^2}$$

No se requiere que las balas de plata y plomo tengan la misma masa para determinar este cambio de temperatura. El único requisito es que tengan la misma velocidad.

## 20.3 Calor latente

Como hemos visto en el apartado anterior, una sustancia puede sufrir un cambio de temperatura cuando se transfiere energía entre ella y su entorno. En algunas situaciones, sin embargo, la transferencia de energía no produce un cambio de temperatura. Ese es el caso siempre que las características físicas de la sustancia cambien de una forma a otra; dicho cambio se denomina comúnmente cambio de fase. Dos cambios de fase comunes son de sólido a líquido ( fusión) y de líquido a gas (ebullición); otro es un cambio en la estructura cristalina de un sólido.

Todos estos cambios de fase implican un cambio en la energía interna del sistema pero ningún cambio en su temperatura. El aumento de energía interna en ebullición, por ejemplo, está representado por la ruptura de enlaces entre moléculas en estado líquido; esta ruptura de enlaces permite que las moléculas se separen más en el estado gaseoso, con el correspondiente aumento en la energía potencial intermolecular.

Como era de esperar, diferentes sustancias responden de manera diferente a la adición o eliminación de energía a medida que cambian de fase porque sus arreglos moleculares internos varían. Además, la cantidad de energía transferida durante un cambio de fase depende de la cantidad de sustancia involucrada. (Se necesita menos energía para derretir un cubo de hielo que para descongelar un lago congelado). Si se requiere una cantidad  $Q$  de transferencia de energía para cambiar la fase de una masa  $m$  de una sustancia, el calor latente de la sustancia se define como

$$L = \frac{q}{m} \quad (20.6)$$

Este parámetro se llama calor latente (literalmente, el calor "oculto") porque esta energía añadida o eliminada no da como resultado un cambio de temperatura. El valor de  $L$  para una sustancia depende de la naturaleza del cambio de fase, así como de las propiedades de la sustancia.

De la definición de calor latente, y de nuevo eligiendo el calor como nuestro mecanismo de transferencia de energía, la energía requerida para cambiar la fase de una masa dada  $m$  de una sustancia pura es

Calor latente

$$q = mL \quad (20.7)$$

El calor latente de fusión  $L_f$  es el término que se usa cuando el cambio de fase es de sólido a líquido (fusionar significa "combinar por fusión"), y el calor latente de vaporización  $L_v$  es el término que se usa cuando el cambio de fase es de líquido a gas (el líquido se "vaporiza").<sup>4</sup> Los calores latentes de diversas sustancias varían considerablemente, como muestran los datos de la tabla 20.2. El signo positivo en la Ecuación 20.7 se usa cuando la energía ingresa a un sistema, causando fusión o vaporización. El signo negativo corresponde a la energía que sale de un sistema de tal manera que el sistema se congela o se condensa.

<sup>4</sup> Cuando un gas se enfriá, finalmente se condensa; es decir, vuelve a la fase líquida. La energía cedida por unidad de masa se denomina calor latente de condensación y es numéricamente igual al calor latente de vaporización. Asimismo, cuando un líquido se enfriá, finalmente se solidifica y el calor latente de solidificación es numéricamente igual al calor latente de fusión.

**TABLA 20.2****Calores latentes de fusión y vaporización**

Sustancia	Derritiendo Punto (°C)	Calor latente de fusión (J/kg)	Hirviendo Punto (°C)	Calor latente de vaporización (J/kg)
Helio	269.65	5,23 103	268.93	2,09 104
Nitrógeno	209.97	2,55 104	195.81	2,01 105
Oxígeno	218.79	1,38 104	182.97	2,13 105
Alcohol etílico	114	1,04 105	78	8,54 105
Agua	0.00	3,33 105	100.00	2,26 106
Azufre	119	3,81 104	444.60	3,26 105
Dirigir	327.3	2,45 104	1 750	8,70 105
Aluminio	660	3,97 105	2 450	1,14 107
Plata	960.80	8,82 104	2 193	2,33 106
Oro	1 063.00	6,44 104	2 660	1,58 106
Cobre	1 083	1,34 105	1 187	5,06 106

Para comprender el papel del calor latente en los cambios de fase, considere la energía requerida para convertir un cubo de hielo de 1,00 g a 30,0 °C en vapor a 120,0 °C. La figura 20.2 indica los resultados experimentales obtenidos cuando se agrega gradualmente energía al hielo. Los resultados se presentan como un gráfico de la temperatura del sistema del cubo de hielo frente a la energía añadida al sistema. Examinemos cada porción del rojo curva.

Parte A. En esta parte de la curva, la temperatura del hielo cambia de 30,0 °C a 0,0 °C. La ecuación 20.4 indica que la temperatura varía linealmente con la energía añadida, por lo que el resultado experimental es una línea recta en el gráfico.

Como el calor específico del hielo es 2 090 J/kg · °C, podemos calcular la cantidad de energía añadida usando la Ecuación

$$20.4: Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 1.00 \text{ kg} \cdot 2090 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (30.0 - 0)^\circ\text{C} = 62700 \text{ J}$$

Parte B. Cuando la temperatura del hielo llega a 0,0 °C, la mezcla de hielo y agua permanece a esta temperatura, aunque se le agregue energía, hasta que todo el hielo se derrita. La energía requerida para derretir 1,00 g de hielo a 0,0 °C es, a partir de la

$$\text{ecuación 20.7, } Q = m \cdot L_f = 1.00 \text{ kg} \cdot 333 \text{ J/kg} = 333 \text{ J}$$

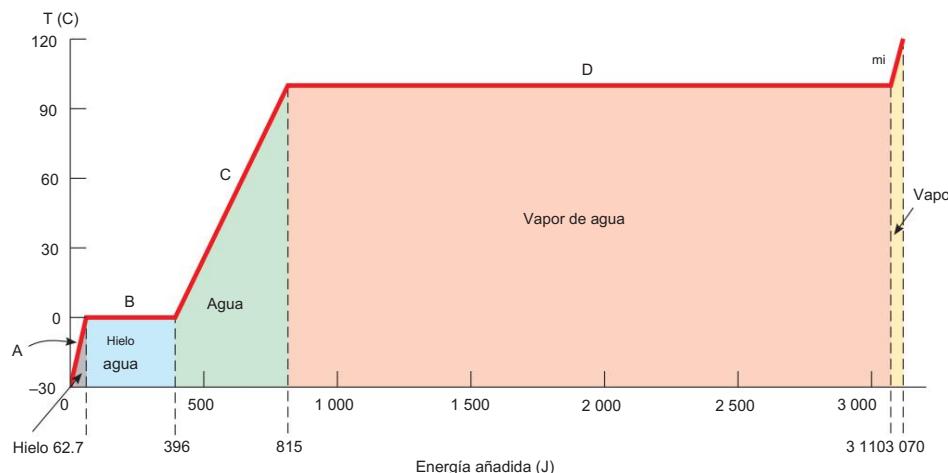


Figura 20.2 Gráfica de temperatura versus energía añadida cuando 1,00 g de hielo inicialmente a 30,0 °C se convierte en vapor a 120,0 °C.

En este punto, nos hemos movido a la marca de 396 J (62.7 J 333 J) en el eje de energía en la Figura 20.2.

Parte C. Entre 0,0 °C y 100,0 °C, no sucede nada sorprendente. No se produce ningún cambio de fase, por lo que toda la energía añadida al agua se utiliza para aumentar su temperatura. La cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de 0.0°C a 100.0°C es

$$Q_{mwcw} \not{c}T = 11,00 \text{ kg} \cdot 103 \text{ J/g°C} \cdot 100,0^\circ\text{C} = 1100,0 \text{ J}$$

Parte D. A 100,0 °C, se produce otro cambio de fase cuando el agua cambia de agua a 100,0 °C a vapor a 100,0 °C. Similar a la mezcla de hielo y agua en la parte B, la mezcla de agua y vapor permanece a 100,0 °C, aunque se le agrega energía, hasta que todo el líquido se convierte en vapor. La energía necesaria para convertir 1,00 g de agua en vapor a 100,0 °C es

$$Q_{mwLv} = 11,00 \text{ kg} \cdot 103 \text{ J/g} \cdot 2,26 = 2,26 \text{ kJ}$$

Parte E. En esta porción de la curva, como en las partes A y C, no ocurre cambio de fase; por lo tanto, toda la energía añadida se utiliza para aumentar la temperatura del vapor. La energía que debe agregarse para elevar la temperatura del vapor de 100.0°C a 120.0°C es

$$Q_{mscs} \not{c}T = 11,00 \text{ kg} \cdot 103 \text{ J/g°C} \cdot 20,0^\circ\text{C} = 20,2 \text{ kJ}$$

La cantidad total de energía que debe agregarse para convertir 1 g de hielo a 30,0 °C en vapor a 120,0 °C es la suma de los resultados de las cinco partes de la curva, que es  $3,11 \times 103 \text{ J}$ . Por el contrario, para enfriar 1 g de vapor a 120.0°C a hielo a 30.0°C, debemos 103 J de energía.

Observe en [eliminar 3.11](#)

la figura 20.2 la cantidad relativamente grande de energía que se transfiere al agua para vaporizarla. Imagine invertir este proceso, con una gran cantidad de energía transferida del vapor para condensarlo en agua. Por eso, una quemadura en la piel por vapor a 100 °C es mucho más dañina que la exposición de la piel al agua a 100 °C. Una gran cantidad de energía entra en la piel del vapor, y el vapor permanece a 100 °C durante mucho tiempo mientras se condensa.

Por el contrario, cuando su piel entra en contacto con agua a 100 °C, la temperatura del agua comienza a bajar inmediatamente a medida que la energía se transfiere del agua a su piel.

Si el agua líquida se mantiene perfectamente quieta en un recipiente muy limpio, es posible que el agua baje de 0°C sin congelarse en hielo. Este fenómeno, llamado sobreenfriamiento, surge porque el agua requiere algún tipo de perturbación para que las moléculas se separen y comiencen a formar la gran estructura abierta de hielo que hace que la densidad del hielo sea menor que la del agua, como se explicó en la Sección 19.4. Si se altera el agua súper enfriada, se congela repentinamente. El sistema cae en la configuración de energía más baja de las moléculas unidas de la estructura del hielo, y la energía liberada eleva la temperatura de nuevo a 0°C.

Los calentadores de manos comerciales consisten en acetato de sodio líquido en una bolsa de plástico sellada. La solución en la bolsa se encuentra en un estado sobreenfriado estable. Cuando los dedos hacen clic en un disco en la bolsa, el líquido se solidifica y la temperatura aumenta, al igual que el agua sobreenfriada que se acaba de mencionar. En este caso, sin embargo, el punto de congelación del líquido es más alto que la temperatura corporal, por lo que la bolsa se siente tibia al tacto. Para reutilizar el calentador de manos, la bolsa debe hervirse hasta que el sólido se licue. Luego, a medida que se enfriá, pasa por debajo de su punto de congelación al estado súper enfriado.

También es posible crear un sobrecalentamiento. Por ejemplo, el agua limpia en una taza muy limpia colocada en un horno de microondas a veces puede subir de temperatura más allá de los 100°C sin hervir porque la formación de una burbuja de vapor en el agua requiere rayones en la taza o algún tipo de impureza en el agua. para servir como un sitio de nucleación. Cuando se retira la taza del horno de microondas, el súper

el agua calentada puede volverse explosiva ya que inmediatamente se forman burbujas y el agua caliente es forzada hacia arriba fuera de la taza.

**Pregunta rápida 20.2** Suponga que se realiza el mismo proceso de agregar energía al cubo de hielo que se analizó anteriormente, pero en su lugar representamos gráficamente la energía interna del sistema como una función de la entrada de energía. ¿Cómo sería este gráfico?

#### EJEMPLO 20.4

#### Enfriando el Vapor

¿Qué masa de vapor inicialmente a 130 °C se necesita para calentar 200 g de agua en un recipiente de vidrio de 100 g de 20,0 °C a 50,0 °C?

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine colocar agua y vapor juntos en un recipiente aislado cerrado. El sistema eventualmente alcanza un estado uniforme de agua con una temperatura final de 50,0°C.

Categorizar En base a nuestra conceptualización de esta situación, categorizamos este ejemplo como uno que involucra una prueba de calorima en la que ocurre un cambio de fase.

Analizar Escriba la Ecuación 20.5 para describir el proceso de calorimetría:

(1) Q frío Q caliente

El vapor pasa por tres procesos: una disminución de la temperatura a 100 °C, condensación en agua líquida y, finalmente, una disminución de la temperatura del agua a 50,0 °C. Encuentre la transferencia de energía en el primer proceso usando la masa desconocida ms del vapor:

$$\begin{aligned} Q_1 &= m_s \cdot c_p \cdot \Delta T \\ &= 103 \text{ J/g°C} \cdot 130,0^\circ\text{C} - 100,0^\circ\text{C} \\ &= 16,03 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Encuentre la transferencia de energía en el segundo proceso, asegurándose de usar un signo negativo en la Ecuación 20.7 porque la energía sale del vapor:

$$Q_2 = m_s \cdot c_p \cdot \Delta T = 12,26 \text{ kJ}$$

Encuentre la transferencia de energía en el tercer proceso:

$$\begin{aligned} Q_3 &= m_s \cdot c_p \cdot \Delta T \\ &= 103 \text{ J/g°C} \cdot 100,0^\circ\text{C} - 50,0^\circ\text{C} \\ &= 10,9 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Sume las transferencias de energía en estas tres etapas:

$$Q_{\text{caliente}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{caliente}} &= 16,03 + 12,26 + 10,9 \\ &= 39,2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

El agua a 20,0 °C y el vidrio se someten a un solo proceso, un aumento de temperatura a 50,0 °C. Encuentre la transferencia de energía en este proceso:

$$\begin{aligned} Q_{\text{frío}} &= m_w \cdot c_p \cdot \Delta T \\ &= 10,200 \text{ kg} \cdot 4,18 \text{ kJ/kg°C} \cdot 50,0^\circ\text{C} - 20,0^\circ\text{C} \\ &= 10,100 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Sustituya las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1) y resuelva para ms :

$$m_s = \frac{Q_{\text{caliente}}}{c_p} = \frac{39,2 \text{ kJ}}{1,00 \text{ kJ/kg°C}} = 39,2 \text{ kg}$$

$$10,9 \text{ g}$$

**¿Y si?** ¿Qué pasa si el estado final del sistema es agua a 100°C? ¿Necesitaríamos más vapor o menos vapor? ¿Cómo cambiaría el análisis anterior?

Respuesta Se necesitaría más vapor para elevar la temperatura del agua y del vaso a 100 °C en lugar de 50,0 °C.

Habrá dos cambios importantes en el análisis. Primero, no tendríamos un término  $Q_3$  para el vapor porque el agua que se condensa del vapor no se enfriará por debajo de los 100°C. En segundo lugar, en  $Q_{frío}$ , el cambio de temperatura sería de 80,0 °C en lugar de 30,0 °C. Para practicar, demuestre que el resultado es una masa requerida de vapor de 31.8 g.

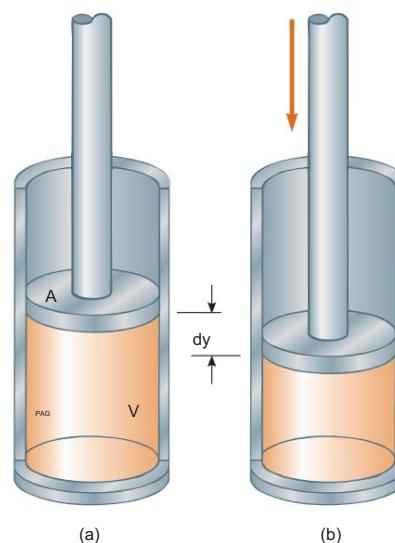
## 20.4 Trabajo y calor en procesos termodinámicos

En termodinámica, describimos el estado de un sistema usando variables como presión, volumen, temperatura y energía interna. Como resultado, estas cantidades pertenecen a una categoría llamada variables de estado. Para cualquier configuración dada del sistema, podemos identificar los valores de las variables de estado. (Para los sistemas mecánicos, las variables de estado incluyen la energía cinética  $K$  y la energía potencial  $U$ ). El estado de un sistema se puede especificar solo si el sistema está internamente en equilibrio térmico. En el caso de un gas en un recipiente, el equilibrio térmico interno requiere que cada parte del gas esté a la misma presión y temperatura.

Una segunda categoría de variables en situaciones que involucran energía son las variables de transferencia. Estas variables son las que aparecen en el lado derecho de la ecuación de conservación de la energía, Ecuación 8.2. Tal variable tiene un valor distinto de cero si ocurre un proceso en el que la energía se transfiere a través de los límites del sistema. La variable de transferencia es positiva o negativa, dependiendo de si la energía entra o sale del sistema. Debido a que una transferencia de energía a través de la frontera representa un cambio en el sistema, las variables de transferencia no están asociadas con un estado dado del sistema, sino con un cambio en el estado del sistema.

En las secciones anteriores, discutimos el calor como una variable de transferencia. En esta sección, estudiamos otra variable de transferencia importante para los sistemas termodinámicos, el trabajo. El trabajo realizado sobre partículas se estudió extensamente en el Capítulo 7, y aquí investigamos el trabajo realizado sobre un sistema deformable, un gas. Considere un gas contenido en un cilindro equipado con un pistón móvil (figura 20.3). En el equilibrio, el gas ocupa un volumen  $V$  y ejerce una presión uniforme  $P$  sobre las paredes del cilindro y sobre el pistón. Si el pistón tiene un área de sección transversal  $A$ , la fuerza ejercida por el gas sobre el pistón es  $F = PA$ . Ahora supongamos que empujamos el pistón hacia adentro y comprimimos el gas casi estáticamente, es decir, lo suficientemente lento como para permitir que el sistema permanezca esencialmente en equilibrio térmico interno en todo momento. A medida que el pistón es empujado hacia abajo por una fuerza de  $dF$  (figura 20.3b), el trabajo realizado por el sistema es  $dF \cdot dy$ . Esta es nuestra definición de trabajo en el Capítulo 7,

Figura 20.3 Se realiza trabajo sobre un gas contenido en un cilindro a una presión  $P$  cuando el pistón se empuja hacia abajo para comprimir el gas.



$$dW = F \, ds = P \, dV$$

donde la magnitud  $F$  de la fuerza externa es igual a  $P_A$  porque el pistón siempre está en equilibrio entre la fuerza externa y la fuerza del gas. En esta discusión se supone que la masa del pistón es despreciable. Como  $A \, dy$  es el cambio de volumen del gas  $dV$ , podemos expresar el trabajo realizado sobre el gas como

$$dW = P \, dV \quad (20.8)$$

Si el gas se comprime,  $dV$  es negativo y el trabajo realizado sobre el gas es positivo.

Si el gas se expande,  $dV$  es positivo y el trabajo realizado sobre el gas es negativo. Si el volumen permanece constante, el trabajo realizado sobre el gas es cero. El trabajo total realizado sobre el gas a medida que su volumen cambia de  $V_i$  a  $V_f$  viene dado por la integral de la Ecuación 20.8:

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P \, dV \quad (20.9)$$

Trabajo realizado sobre un gas

Para evaluar esta integral, debe saber cómo varía la presión con el volumen durante el proceso.

En general, la presión no es constante durante un proceso seguido por un gas, sino que depende del volumen y la temperatura. Si se conocen la presión y el volumen en cada paso del proceso, el estado del gas en cada paso se puede trazar en una representación gráfica llamada diagrama PV como en la figura activa 20.4. Este tipo de diagrama nos permite visualizar un proceso a través del cual avanza un gas. La curva en un diagrama PV se llama el camino tomado entre los estados inicial y final.

Observe que la integral en la Ecuación 20.9 es igual al área bajo una curva en un diagrama fotovoltaico. Por lo tanto, podemos identificar un uso importante para los diagramas PV:

El trabajo realizado sobre un gas en un proceso cuasi-estático que lo lleva de un estado inicial a un estado final es el negativo del área bajo la curva en un diagrama PV, evaluado entre los estados inicial y final.

Para el proceso de comprimir un gas en un cilindro, el trabajo realizado depende del camino particular tomado entre los estados inicial y final, como sugiere la figura activa 20.4. Para ilustrar este punto importante, considere varios caminos diferentes que conectan  $i$  y  $f$  (figura activa 20.5). En el proceso representado en la figura activa 20.5a, el volumen del gas primero se reduce de  $V_i$  a  $V_f$  a presión constante  $P_i$  y luego la presión del gas aumenta de  $P_i$  a  $P_f$  calentándolo a volumen constante  $V_f$ .

El trabajo realizado sobre el gas a lo largo de este camino es  $P_i(V_f - V_i)$ . En la figura activa 20.5b, la presión del gas aumenta de  $P_i$  a  $P_f$  a un volumen constante  $V_i$  y luego el volumen del gas se reduce de  $V_i$  a  $V_f$  a una presión constante  $P_f$ . El trabajo realizado sobre el gas es  $P_f(V_f - V_i)$ . Este valor es mayor que el del proceso.

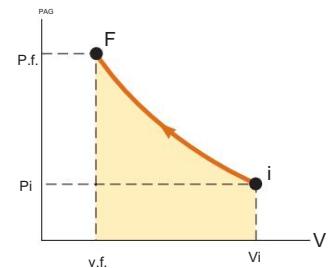


FIGURA ACTIVA 20.4

Un gas se comprime cuasi-estáticamente (lentamente) desde el estado  $i$  al estado  $f$ . El trabajo realizado sobre el gas es igual al negativo del área bajo la curva PV.

El volumen está disminuyendo, por lo que esta área es negativa. Entonces el trabajo realizado sobre el gas es positivo. Un agente externo debe realizar un trabajo positivo sobre el gas para comprimirlo.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para comprender el pistón en la Figura 20.3 y vea el resultado en el diagrama PV en esta figura.

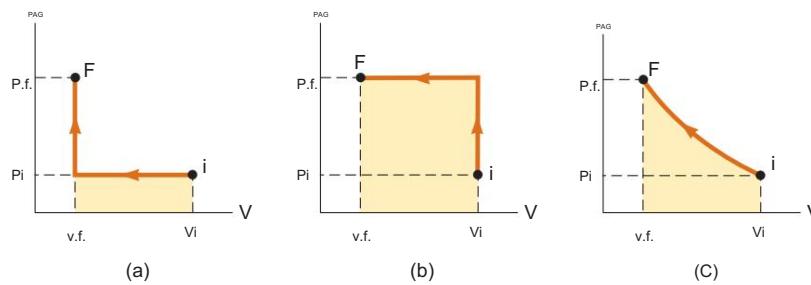


FIGURA ACTIVA 20.5

El trabajo realizado sobre un gas cuando pasa de un estado inicial a un estado final depende del camino entre estos estados.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para elegir una de las tres rutas y ver el movimiento del pistón en la Figura 20.3 y de un punto en el diagrama PV en esta figura.

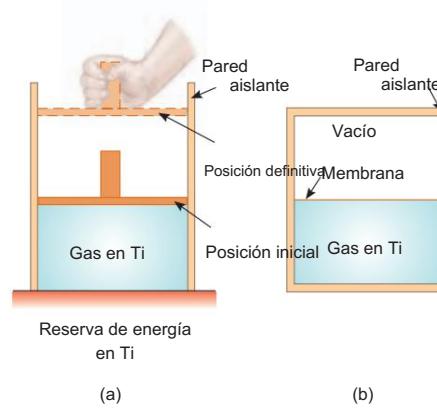


Figura 20.6 (a) Un gas a la temperatura  $T_i$  se expande lentamente mientras absorbe energía de un depósito para mantener una temperatura constante. (b) Un gas se expande rápidamente en una región evacuada después de que se rompe una membrana.

descrito en la figura activa 20.5a porque el pistón se mueve con el mismo desplazamiento por una fuerza mayor. Finalmente, para el proceso descrito en la figura activa 20.5c, donde tanto  $P$  como  $V$  cambian continuamente, el trabajo realizado sobre el gas tiene algún valor entre los valores obtenidos en los dos primeros procesos. Para evaluar el trabajo en este caso, se debe conocer la función  $P(V)$  para que podamos evaluar la integral en la Ecuación 20.9.

La transferencia de energía  $Q$  dentro o fuera de un sistema por calor también depende del proceso. Considere las situaciones representadas en la figura 20.6. En cada caso, el gas tiene el mismo volumen inicial, temperatura y presión, y se supone que es ideal. En la figura 20.6a, el gas está térmicamente aislado de su entorno excepto en la parte inferior de la región llena de gas, donde está en contacto térmico con un depósito de energía. Un reservorio de energía es una fuente de energía que se considera tan grande que una transferencia finita de energía hacia o desde el reservorio no cambia su temperatura.

El pistón es sostenido en su posición inicial por un agente externo como una mano. Cuando la fuerza que sujetó el pistón se reduce ligeramente, el pistón sube muy lentamente hasta su posición final. Debido a que el pistón se mueve hacia arriba, el gas está haciendo trabajo sobre el pistón. Durante esta expansión hasta el volumen final  $V_f$ , el calor del depósito transfiere al gas la energía suficiente para mantener una temperatura constante  $T_i$ .

Ahora considere el sistema completamente aislado térmicamente que se muestra en la figura 20.6b. Cuando se rompe la membrana, el gas se expande rápidamente en el vacío hasta que ocupa un volumen  $V_f$  y está a una presión  $P_f$ . En este caso, el gas no realiza trabajo porque no aplica fuerza; no se requiere fuerza para expandirse en el vacío.

Además, no se transfiere energía por calor a través de la pared aislante.

Los estados inicial y final del gas ideal de la figura 20.6a son idénticos a los estados inicial y final de la figura 20.6b, pero las trayectorias son diferentes. En el primer caso, el gas realiza trabajo sobre el pistón y la energía se transfiere lentamente al gas por calor.

En el segundo caso, no se transfiere energía por calor y el valor del trabajo realizado es cero. Por lo tanto, la transferencia de energía por calor, al igual que el trabajo realizado, depende de los estados inicial, final e intermedio del sistema. En otras palabras, debido a que el calor y el trabajo dependen de la trayectoria, ninguna cantidad está determinada únicamente por los puntos finales de un proceso termodinámico.

## 20.5 La primera ley de la termodinámica

Cuando introdujimos la ley de conservación de la energía en el Capítulo 8, afirmamos que el cambio en la energía de un sistema es igual a la suma de todas las transferencias de energía a través de los límites del sistema. La primera ley de la termodinámica es una especial

caso de la ley de conservación de la energía que describe procesos en los que solo cambia la energía interna<sup>5</sup> y las únicas transferencias de energía son por calor y trabajo:

$$\delta E_{\text{int}} = Q - W \quad (20.10)$$

Una consecuencia importante de la primera ley de la termodinámica es que existe una cantidad conocida como energía interna cuyo valor está determinado por el estado del sistema. La energía interna es, por lo tanto, una variable de estado como la presión, el volumen y la temperatura.

Cuando un sistema experimenta un cambio de estado infinitesimal en el que una pequeña cantidad de energía  $dQ$  se transfiere por calor y se realiza una pequeña cantidad de trabajo  $dW$ , la energía interna cambia en una pequeña cantidad  $\delta E_{\text{int}}$ . Por tanto, para infinitos procesos imales podemos expresar la primera ley como<sup>6</sup>

$$\delta E_{\text{int}} = dQ - dW$$

Investigaremos algunos casos especiales en los que se puede aplicar la primera ley. Primero, considere un sistema aislado, es decir, uno que no interactúa con su entorno.

En este caso, no se produce transferencia de energía por calor y el trabajo realizado sobre el sistema es cero; por lo tanto, la energía interna permanece constante. Es decir, como  $Q = 0$ , se sigue que  $E_{\text{int}} = E_0$ ; por lo tanto,  $E_{\text{int},f} = E_{\text{int},i}$ . Concluimos que la energía interna  $E_{\text{int}}$  de un sistema aislado permanece constante.

A continuación, considere el caso de un sistema que puede intercambiar energía con su entorno y es llevado a través de un proceso cíclico, es decir, un proceso que comienza y termina en el mismo estado. En este caso, el cambio en la energía interna nuevamente debe ser cero porque  $E_{\text{int}}$  es una variable de estado; por lo tanto, la energía  $Q$  añadida al sistema debe ser igual al negativo del trabajo  $W$  realizado sobre el sistema durante el ciclo. Es decir, en un proceso cíclico,

$$\delta E_{\text{int}} = 0 \quad \text{y} \quad Q = -W \quad (\text{proceso cíclico})$$

En un diagrama PV , un proceso cíclico aparece como una curva cerrada. (Los procesos descritos en la figura activa 20.5 están representados por curvas abiertas porque los estados inicial y final difieren). Puede demostrarse que en un proceso cíclico, el trabajo neto realizado en el sistema por ciclo es igual al área encerrada por la trayectoria que representa el proceso en un diagrama PV .

Primera ley  
de la termodinámica

#### PREVENCIÓN DE ERRORES 20.7

Convenciones de doble signo

Algunos libros de física e ingeniería presentan la primera ley como  $E_{\text{int}}$

$Q = W$ , con un signo menos entre el calor y el trabajo. La razón es que el trabajo se define en estos tratamientos como el trabajo realizado por el gas y no sobre el gas, como en nuestro tratamiento. La ecuación equivalente a la Ecuación 20.9 en estos tratamientos define el trabajo como  $V_f P dV$ .

W Por lo tanto, si  $V_f > V_i$  el trabajo es realizado por el gas, la energía está saliendo del sistema, lo que lleva al signo negativo en la primera ley.

En sus estudios en otros cursos de química o ingeniería, o en su lectura de otros libros de física, asegúrese de anotar qué convención de signos se usa para la primera ley.

#### PREVENCIÓN DE ERRORES 20.8 La Primera Ley

Con nuestro enfoque de la energía en este libro, la primera ley de la termodinámica es un caso especial de la ecuación 8.2. Algunos físicos argumentan que la primera ley es la ecuación general para la conservación de la energía, equivalente a la Ecuación 8.2. En este enfoque, la primera ley se aplica a un sistema cerrado (de modo que no hay transferencia de materia), el calor se interpreta para incluir la radiación electromagnética y el trabajo se interpreta para incluir la transmisión eléctrica ("trabajo eléctrico") y ondas mecánicas ("trabajo molecular"). Tenga esto en cuenta si se encuentra con la primera ley en su lectura de otros libros de física.

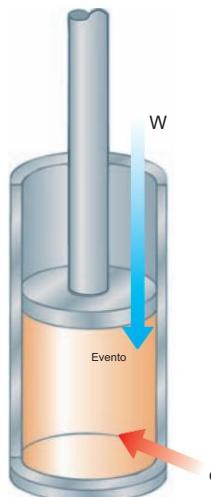
## 20.6 Algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica

En esta sección, consideraremos las aplicaciones de la primera ley a los procesos a través de los cuales se toma un gas. Como modelo, consideraremos la muestra de gas contenida en el aparato de cilindro de pistón en la figura activa 20.7 (página 568). Esta figura muestra el trabajo que se realiza en el gas y la transferencia de energía por medio del calor, por lo que la energía interna del gas aumenta. En la siguiente discusión de varios procesos, vuelva a referirse a esta figura y altere mentalmente las direcciones de la transferencia de energía para reflejar lo que está sucediendo en el proceso.

Antes de aplicar la primera ley de la termodinámica a sistemas específicos, es útil definir primero algunos procesos termodinámicos idealizados. Un proceso adiabático es aquel durante el cual no entra ni sale energía del sistema por calor; es decir,  $Q = 0$ . Un

<sup>5</sup> Es un desafortunado accidente de la historia que el símbolo tradicional para la energía interna sea  $U$ , que también es el símbolo tradicional para la energía potencial como se presentó en el Capítulo 7. Para evitar confusiones entre la energía potencial y la energía interna, usamos el símbolo  $E_{\text{int}}$  para la energía interna. energía en este libro. Sin embargo, si toma un curso avanzado de termodinámica, prepárese para ver que  $U$  se usa como el símbolo de la energía interna en la primera ley.

<sup>6</sup> Observe que  $dQ$  y  $dW$  no son cantidades diferenciales verdaderas porque  $Q$  y  $W$  no son variables de estado, pero  $dE_{\text{int}}$  sí lo es. Debido a que  $dQ$  y  $dW$  son diferenciales inexactas, a menudo se representan con los símbolos  $dQ$  y  $dW$  . Para obtener más detalles sobre este punto, consulte un texto avanzado sobre termodinámica.

**FIGURA ACTIVA 20.7**

La primera ley de la termodinámica iguala el cambio en la energía interna  $E_{int}$  en un sistema a la transferencia de energía neta al sistema por el calor  $Q$  y el trabajo  $W$ . En la situación que se muestra aquí, la energía interna del gas aumenta.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para elegir uno de los cuatro procesos para el gas discutidos en esta sección y vea el movimiento del pistón y de un punto en un diagrama PV.

El proceso adiabático se puede lograr ya sea aislando térmicamente las paredes del sistema o realizando el proceso rápidamente de modo que haya un tiempo insignificante para que la energía se transfiera por calor. La aplicación de la primera ley de la termodinámica a un proceso adiabático da

$$\delta E_{int} = W \quad \text{1 proceso adiabático} \quad (20.11)$$

Este resultado muestra que si un gas se comprime adiabáticamente de modo que  $W$  sea positivo, entonces  $E_{int}$  es positivo y la temperatura del gas aumenta. Por el contrario, la temperatura de un gas disminuye cuando el gas se expande adiabáticamente.

Los procesos adiabáticos son muy importantes en la práctica de la ingeniería. Algunos ejemplos comunes son la expansión de gases calientes en un motor de combustión interna, la licuefacción de gases en un sistema de enfriamiento y la carrera de compresión en un motor diesel.

El proceso descrito en la figura 20.6b, llamado expansión libre adiabática, es único. El proceso es adiabático porque tiene lugar en un recipiente aislado.

Debido a que el gas se expande en el vacío, no aplica una fuerza sobre un pistón como se muestra en la figura 20.6a, por lo que no se realiza trabajo sobre o por el gas. Por lo tanto, en este proceso adiabático, tanto  $Q = 0$  como  $W = 0$ . Como resultado,  $E_{int} = 0$  para este proceso como se puede ver en la primera ley. Es decir, las energías internas inicial y final de un gas son iguales en una expansión libre adiabática. Como veremos en el Capítulo 21, la energía interna de un gas ideal depende únicamente de su temperatura. Por lo tanto, no esperamos cambios de temperatura durante una expansión libre adiabática.

Esta predicción está de acuerdo con los resultados de los experimentos realizados a bajas presiones. (Los experimentos realizados a altas presiones para gases reales muestran un ligero cambio de temperatura después de la expansión debido a las interacciones intermoleculares, que representan una desviación del modelo de un gas ideal).

Un proceso que ocurre a presión constante se llama proceso isobárico. En la figura activa 20.7, se podría establecer un proceso isobárico al permitir que el pistón se mueva libremente para que siempre esté en equilibrio entre la fuerza neta del gas que empuja hacia arriba y el peso del pistón más la fuerza debida a la presión atmosférica que empuja hacia abajo. . El primer proceso en la figura activa 20.5a y el segundo proceso en la figura activa 20.5b son ambos isobáricos.

En tal proceso, los valores del calor y el trabajo por lo general son distintos de cero.

El trabajo realizado sobre el gas en un proceso isobárico es simplemente

#### Proceso isobárico

$$W = P(V_f - V_i) \quad 1 \text{ proceso isobárico} \quad (20.12)$$

donde  $P$  es la presión constante del gas durante el proceso.

Un proceso que tiene lugar a volumen constante se llama proceso isovolumétrico.

En la figura activa 20.7, sujetar el pistón en una posición fija garantizaría un proceso isovolumétrico. El segundo proceso en la figura activa 20.5a y el primer proceso en la figura activa 20.5b son ambos isovolumétricos.

Como el volumen del gas no cambia en tal proceso, el trabajo dado por la Ecuación 20.9 es cero.

Por lo tanto, de la primera ley vemos que en un proceso isovolumétrico, debido a que  $W = 0$ ,

#### Proceso isovolumétrico

$$\delta E_{int} = Q \quad 1 \text{ proceso isovolumétrico} \quad (20.13)$$

Esta expresión especifica que si se agrega energía mediante calor a un sistema que se mantiene a volumen constante, toda la energía transferida permanece en el sistema como un aumento en su energía interna. Por ejemplo, cuando una lata de pintura en aerosol se arroja al fuego, la energía ingresa al sistema (el gas en la lata) por medio del calor a través de las paredes metálicas de la lata. En consecuencia, la temperatura, y por lo tanto la presión, en la lata aumenta hasta que la lata posiblemente explote.

Un proceso que ocurre a temperatura constante se llama proceso isotérmico.

Este proceso se puede establecer sumergiendo el cilindro de la figura activa 20.7 en un baño de agua helada o poniendo el cilindro en contacto con algún otro depósito a temperatura constante. Una gráfica de  $P$  versus  $V$  a temperatura constante para un gas ideal produce una curva hiperbólica llamada isotermia. La energía interna de un gas ideal es una

#### Proceso isotérmico

función de la temperatura solamente. Por lo tanto, en un proceso isotérmico que involucra un gas ideal,  $E_{int} = 0$ . Para un proceso isotérmico, concluimos de la primera ley que la transferencia de energía  $Q$  debe ser igual al negativo del trabajo realizado sobre el gas; es decir,  $Q = -W$ . Cualquier energía que ingresa al sistema por calor se transfiere fuera del sistema por trabajo; como resultado, no ocurre ningún cambio en la energía interna del sistema en un proceso isotérmico.

**Prueba rápida 20.3** En las últimas tres columnas de la siguiente tabla, complete las casillas con los signos correctos (+ o -) para  $Q$ ,  $W$  y  $E_{int}$ . Para cada situación se identifica el sistema a considerar.

Situación	Sistema	$E_{int}$ $Q$ $W$
(a) Inflar rápidamente una llanta de bicicleta	Aire en la bomba	
(b) Recipiente con agua a temperatura ambiente sobre una estufa caliente	agua en la cacerola	
(c) El aire se escapa rápidamente de un globo.	Aire originalmente en el globo	

Expansión isotérmica de un gas ideal Suponga que se

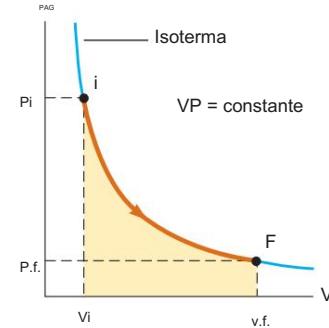
permite que un gas ideal se expanda quasi-estáticamente a temperatura constante.

Este proceso se describe mediante el diagrama PV que se muestra en la figura 20.8. La curva es una hipérbola (consulte el apéndice B, ecuación B.23) y la ley de los gases ideales con  $T$  constante indica que la ecuación de esta curva es  $PV = \text{constante}$ .

Calculemos el trabajo realizado sobre el gas en la expansión del estado  $i$  al estado  $f$ .

El trabajo realizado sobre el gas viene dado por la Ecuación 20.9. Debido a que el gas es ideal y el proceso es casi estático, la ley de los gases ideales es válida para cada punto de la trayectoria. Por lo tanto,

$$W = P dV = \frac{V_f nRT}{V_i} dV = \frac{V_f nRT}{V_i} \ln \frac{V_f}{V_i}$$



Como  $T$  es constante en este caso, se puede eliminar de la integral junto con  $n$  y  $R$ :

$$W = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{V_f dV}{V} = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

Para evaluar la integral, usamos  $(dx/x) \ln x$ . (Consulte el Apéndice B.) La evaluación del resultado en los volúmenes inicial y final da

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (20.14)$$

Numéricamente, este trabajo  $W$  es igual al negativo del área sombreada bajo la curva PV que se muestra en la figura 20.8. Debido a que el gas se expande,  $V_f > V_i$  y el valor del trabajo realizado sobre el gas es negativo, como se esperaba. Si el gas se comprime, entonces  $V_f < V_i$  y el trabajo realizado sobre el gas son positivos.

**Prueba rápida 20.4** Caracterice las trayectorias de la figura 20.9 como isobáricas, isovolumétricas, isotérmicas o adiabáticas. Para la ruta B,  $Q = 0$ .

Figura 20.8 Diagrama PV para una expansión isotérmica de un gas ideal desde un estado inicial hasta un estado final. La curva es una hipérbola.

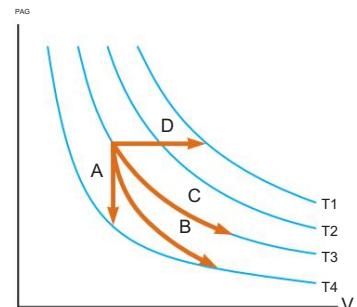


Figura 20.9 (Cuestionario rápido 20.4)  
Identifique la naturaleza de los caminos A, B, C y D.

### EJEMPLO 20.5

### Una expansión isotérmica

Una muestra de 1,0 mol de un gas ideal se mantiene a 0,0 °C durante una expansión de 3,0 L a 10,0 L.

(A) ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas durante la expansión?

### PREVENCIÓN DE ERRORES 20.9

Q 0 en un proceso isotérmico

No caiga en la trampa común de pensar que no debe haber transferencia de energía por calor si la temperatura no cambia como es el caso en un proceso isotérmico. Debido a que la causa del cambio de temperatura puede ser calor o trabajo, la temperatura puede permanecer constante incluso si la energía ingresa al gas por calor, lo que solo puede suceder si la energía que ingresa al gas por calor sale por trabajo.

## SOLUCIÓN

Conceptualizar Ejecute el proceso en su mente: el cilindro en la figura activa 20.7 se sumerge en un baño de agua helada y el pistón se mueve hacia afuera para que aumente el volumen del gas.

Categorizar Evaluaremos los parámetros utilizando las ecuaciones desarrolladas en las secciones anteriores, por lo que clasificamos este ejemplo como un problema de sustitución. Como la temperatura del gas es fija, el proceso es isotérmico.

Sustituya los valores dados en la Ecuación 20.14:

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

$$11,0 \text{ mol} \cdot 18,31 \text{ J/mol} \cdot \ln \frac{10,0 \text{ L}}{13,0 \text{ L}}$$

$$2.7 \text{ kJ}$$

(B) ¿Cuánta transferencia de energía por calor ocurre entre el gas y su entorno en este proceso?

## SOLUCIÓN

Encuentre el calor de la primera ley:

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W$$

$$0 \text{ kJ}$$

$$Q = 2.7 \text{ kJ}$$

(C) Si el gas regresa al volumen original por medio de un proceso isobárico, ¿cuánto trabajo se realiza sobre el gas?

## SOLUCIÓN

Utilice la ecuación 20.12. No se da la presión, así que incorpore la ley de los gases ideales:

$$W = P(V_f - V_i)$$

$$\frac{nRT_i}{V_i} \ln \frac{P_f}{P_i}$$

$$\frac{11,0 \text{ mol} \cdot 18,31 \text{ J/mol} \cdot \ln \frac{10,0 \text{ L}}{13,0 \text{ L}}}{10,0 \text{ m}^3} = 1.6 \text{ kJ}$$

$$1.6 \text{ kJ}$$

Usamos la temperatura y el volumen iniciales para calcular el trabajo realizado porque se desconocía la temperatura final. El trabajo realizado sobre el gas es positivo porque el gas se comprime.

## EJEMPLO 20.6

Agua hirviendo

Suponga que 1,00 g de agua se vaporiza isobáricamente a presión atmosférica (1,013 · 105 Pa). Su volumen en estado líquido

es  $V_l = 1.00 \text{ cm}^3$ , y su volumen en estado de vapor es  $V_v = 1671 \text{ cm}^3$ . Encuentre el trabajo realizado en la expansión  $V_i$  y el cambio en la energía interna del sistema. Ignore cualquier mezcla del vapor y el aire circundante; imagine que el vapor simplemente empuja el aire circundante fuera del camino.

## SOLUCIÓN

Conceptualizar Observe que la temperatura del sistema no cambia. Se produce un cambio de fase a medida que el agua se evapora a vapor.

Categorizar Debido a que la expansión tiene lugar a presión constante, clasificamos el proceso como isobárico. Usaremos ecuaciones desarrolladas en las secciones anteriores, por lo que clasificamos este ejemplo como un problema de sustitución.

Use la Ecuación 20.12 para encontrar el trabajo realizado en el sistema cuando el aire es empujado fuera del camino:

$$W = P(V_f - V_i)$$

$$11.013 \cdot 105 \text{ Pa} \cdot 11.671 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 - 1.00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 129 \text{ J}$$

$$129 \text{ J}$$

Use la Ecuación 20.7 y el calor latente de vaporización del agua para encontrar la energía transferida al sistema por el calor:

$$Q = m\Delta h_f + \dot{m}L_v = 11,00 \text{ kg} \cdot 12,26 \text{ J/g} \cdot 106 \text{ g/g} + 11,00 \text{ kg} \cdot 2260 \text{ J/kg}$$

Use la primera ley para encontrar el cambio en la energía interna del sistema:

$$\Delta U = Q - W = 11,00 \text{ kg} \cdot 2260 \text{ J/kg} - 11,00 \text{ kg} \cdot 1169 \text{ J/kg}$$

$$= 2,09 \text{ kJ}$$

El valor positivo de  $\Delta U$  indica que la energía interna del sistema aumenta. La fracción más grande de la energía (2 090 J / 2 260 J 93 %) transferida al líquido se dedica a aumentar la energía interna del sistema. El 7% restante de la energía transferida sale del sistema por el trabajo realizado por el vapor en la atmósfera circundante.

### EJEMPLO 20.7

calentar un sólido

Una barra de cobre de 1.0 kg se calienta a presión atmosférica de manera que su temperatura aumenta de 20°C a 50°C.

(A) ¿Cuál es el trabajo realizado sobre la barra de cobre por la atmósfera circundante?

SOLUCIÓN

Conceptualizar Este ejemplo involucra un sólido, mientras que los dos ejemplos anteriores involucran líquidos y gases. Para un sólido, el cambio de volumen debido a la expansión térmica es muy pequeño.

Categorizar Debido a que la expansión tiene lugar a presión atmosférica constante, clasificamos el proceso como isobárico.

Analizar Calcule el cambio de volumen de la barra de cobre usando la Ecuación 19.6, el coeficiente de expansión lineal promedio para el cobre dado en la Tabla 19.1, y que  $b = 3a$ :

$$\Delta V = bV_0 \alpha \Delta T$$

$$= 331,7 \text{ m}^3 \cdot 105 \text{ K}^{-1} \cdot 14 \text{ K} = 1,5 \text{ m}^3$$

Use la Ecuación 1.1 para expresar el volumen inicial de la barra en términos de la masa de la barra y la densidad del cobre de la Tabla 14.1:

$$\Delta V = \frac{1,0 \text{ kg}}{8,92 \text{ kg/m}^3} \cdot 1,5 \text{ m}^3 = 1,7 \text{ m}^3$$

Encuentre el trabajo realizado en la barra de cobre usando la Ecuación 20.12:

$$W = P \Delta V = 11,013 \text{ Pa} \cdot 1,7 \text{ m}^3 = 18,7 \text{ J}$$

$$= 1,7 \text{ kJ}$$

Debido a que este trabajo es negativo, la barra de cobre realiza trabajo sobre la atmósfera.

(B) ¿Cuánta energía se transfiere a la barra de cobre por calor?

SOLUCIÓN

Utilice la ecuación 20.4 y el calor específico del cobre de la tabla 20.1:

$$Q = mc\Delta T = 11,0 \text{ kg} \cdot 0,023 \text{ kJ/kg} \cdot 30 \text{ K} = 0,621 \text{ kJ}$$

$$= 1,2 \text{ kJ}$$

(C) ¿Cuál es el aumento de energía interna de la barra de cobre?

SOLUCIÓN

Usa la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W = 1,2 \text{ kJ} - 1,7 \text{ kJ} = -0,5 \text{ kJ}$$

Finalizar La mayor parte de la energía transferida al sistema por el calor se destina a aumentar la energía interna del cobre por barra. La fracción de energía utilizada para realizar trabajo en la atmósfera circundante es de solo alrededor de 10%. Por lo tanto, cuando se analiza la expansión térmica de un sólido o un líquido, generalmente se ignora la pequeña cantidad de trabajo realizado sobre o por el sistema.

**TABLA 20.3**

Conductividades Térmicas

Sustancia	Térmico Conductividad (W/m·°C)
Metales (a 25°C)	
Aluminio	238
Cobre	397
Oro	314
Hierro	79.5
Dirigir	34.7
Plata	427
No metales (valores aproximados)	
Amianto	0.08
Concreto	0.8
Diamante	2 300
Vaso	0.8
Hielo	2
Goma	0.2
Aqua	0.6
Madera	0.08
Gases (a 20°C)	
Aire	0.023 4
Helio	0.138
Hidrógeno	0.172
Nitrógeno	0.023 4
Oxígeno	0.023 8

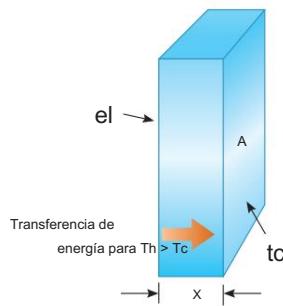


Figura 20.10 Transferencia de energía a través de una losa conductora con un área de sección transversal A y un espesor

X. Las caras opuestas están a diferentes temperaturas Tc y Th.

## Ley de conducción térmica

**20.7 Mecanismos de transferencia de energía**

En el Capítulo 8, presentamos un enfoque global para el análisis de energía de los procesos físicos a través de la Ecuación 8.1, Sistema T, donde T representa la transferencia de energía, que puede ocurrir por varios mecanismos. Anteriormente en este capítulo, discutimos dos de los términos en el lado derecho de esta ecuación, el trabajo W y el calor Q. En esta sección, exploramos más detalles sobre el calor como medio de transferencia de energía y otros dos métodos de transferencia de energía a menudo relacionados con cambios de temperatura: convección (una forma de transferencia de materia TMT) y radiación electromagnética TER.

**Conducción termica**

El proceso de transferencia de energía por calor también puede llamarse conducción o conducción térmica. En este proceso, la transferencia se puede representar a escala atómica como un intercambio de energía cinética entre partículas microscópicas (moléculas, átomos y electrones libres) en el que las partículas menos energéticas ganan energía al chocar con partículas más energéticas. Por ejemplo, si sostiene un extremo de una barra de metal larga e inserta el otro extremo en una llama, encontrará que la temperatura del metal en su mano pronto aumenta. La energía llega a tu mano por medio de conducción. Inicialmente, antes de que la varilla se inserte en la llama, las partículas microscópicas del metal vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio. A medida que la llama eleva la temperatura de la varilla, las partículas cercanas a la llama comienzan a vibrar con amplitudes cada vez mayores. Estas partículas, a su vez, chocan con sus vecinas y transfieren parte de su energía en las colisiones. Lentamente, las amplitudes de vibración de los átomos metálicos y los electrones más y más alejados de la llama aumentan hasta que finalmente se ven afectados los del metal que está cerca de su mano. Este aumento de la vibración se detecta por un aumento en la temperatura del metal y de la mano potencialmente quemada.

La tasa de conducción térmica depende de las propiedades de la sustancia que se calienta. Por ejemplo, es posible mantener una pieza de asbesto en una llama indefinidamente, lo que implica que se conduce muy poca energía a través del asbesto. En general, los metales son buenos conductores térmicos y los materiales como el asbesto, el corcho, el papel y la fibra de vidrio son malos conductores. Los gases también son malos conductores porque la distancia de separación entre las partículas es muy grande. Los metales son buenos conductores térmicos porque contienen una gran cantidad de electrones que son relativamente libres para moverse a través del metal y, por lo tanto, pueden transportar energía a grandes distancias. Por tanto, en un buen conductor como el cobre, la conducción tiene lugar tanto por la vibración de los átomos como por el movimiento de los electrones libres.

La conducción ocurre solo si hay una diferencia de temperatura entre dos partes del medio conductor. Considere una losa de material de espesor x y área de sección transversal A. Una cara de la losa está a una temperatura Tc y la otra cara está a una temperatura Th Tc (figura 20.10). Experimentalmente se encuentra que la energía Q se transfiere en un intervalo de tiempo t de la cara más caliente a la más fría. Se encuentra que la tasa Q/t a la que ocurre esta transferencia de energía es proporcional al área de la sección transversal y la diferencia de temperatura T Th Tc e inversamente proporcional al espesor:  $Q \propto \frac{\phi T}{\text{Un } \phi x}$

$$kA \cdot \frac{\phi T}{dx} \quad (20.15)$$

Observe que tiene unidades de vatios cuando Q está en julios y t está en segundos. Eso no es sorprendente porque es potencia, la tasa de transferencia de energía por calor. Para una losa de espesor infinitesimal dx y diferencia de temperatura dT, podemos escribir la ley de conducción térmica como

donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material y dT/dx es el gradiente de temperatura (la velocidad a la que varía la temperatura con la posición).

Suponga que una barra larga y uniforme de longitud  $L$  está aislada térmicamente de modo que la energía no pueda escapar por calor de su superficie excepto en los extremos, como se muestra en la figura 20.11. Un extremo está en contacto térmico con un depósito de energía a la temperatura  $T_c$  y el otro extremo está en contacto térmico con un depósito a la temperatura  $T_h$ . Cuando se alcanza un estado estacionario, la temperatura en cada punto a lo largo de la barra es constante en el tiempo. En este caso, si suponemos que  $k$  no es función de la temperatura, el gradiente de temperatura es el mismo en todas partes a lo largo de la barra y es

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\text{el } T_c}{L}$$

Por lo tanto, la tasa de transferencia de energía por conducción a través de la varilla es

$$\frac{kA_a T_h T_c L b}{(20.16)}$$

Las sustancias que son buenas conductoras térmicas tienen grandes valores de conductividad térmica, mientras que los buenos aislantes térmicos tienen valores bajos de conductividad térmica. La tabla 20.3 enumera las conductividades térmicas de varias sustancias. Note que los metales son generalmente mejores conductores térmicos que los no metales.

Para una losa compuesta que contiene varios materiales de espesores  $L_1, L_2, \dots$  y la conductividades térmicas  $k_1, k_2, \dots$  el . . . tasa de transferencia de energía a través de la losa en estado estacionario es

$$\frac{A_1 T_h T_c 2}{a_1 L_1 + k_1} \quad (20.17)$$

donde  $T_c$  y  $T_h$  son las temperaturas de las superficies exteriores (que se mantienen constantes) y la suma es sobre todas las losas. El ejemplo 20.8 muestra cómo la ecuación 20.17 resulta de la consideración de dos espesores de materiales.

**Pregunta rápida 20.5** Tienes dos varillas de la misma longitud y diámetro, pero están formadas por diferentes materiales. Las varillas se utilizan para conectar dos regiones a diferentes temperaturas para que la energía se transfiera a través de las varillas por calor. Se pueden conectar en serie como en la figura 20.12a o en paralelo como en la figura 20.12b. ¿En qué caso es mayor la tasa de transferencia de energía por calor? a) La velocidad es mayor cuando las varillas están en serie. (b) La velocidad es mayor cuando las varillas están en paralelo. (c) La tasa es la misma en ambos casos.

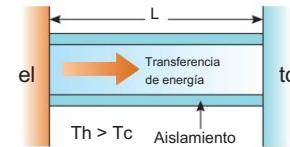


Figura 20.11 Conducción de energía a través de una varilla aislada uniforme de longitud  $L$ . Los extremos opuestos están en contacto térmico con depósitos de energía a diferentes temperaturas.

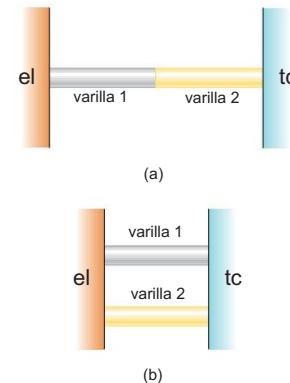


Figura 20.12 (Cuestión rápida 20.5) ¿En qué caso es mayor la tasa de transferencia de energía?

### EJEMPLO 20.8 Transferencia de energía a través de dos losas

Dos losas de espesor  $L_1$  y  $L_2$  y conductividades térmicas  $k_1$  y  $k_2$  están en contacto térmico entre sí, como se muestra en la figura 20.13. Las temperaturas de sus superficies exteriores son  $T_c$  y  $T_h$ , respectivamente, y  $T_h > T_c$ . Determine la temperatura en la interfase y la tasa de transferencia de energía por conducción a través de las losas en la condición de estado estacionario.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Note la frase "en la condición de estado estacionario". Interpretamos esta frase en el sentido de que la energía se transfiere a través de la losa compuesta a la misma velocidad en todos los puntos. De lo contrario, la energía se estaría acumulando o desapareciendo en algún momento. Además, la temperatura varía con la posición en las dos losas, muy probablemente a diferentes velocidades en cada parte de la losa compuesta. Cuando el sistema está en estado estacionario, la interfaz está a una temperatura fija  $T$ .

Categorizar Clasificamos este ejemplo como un problema de conducción térmica en equilibrio e imponemos la condición de que la potencia sea la misma en ambas losas de material.

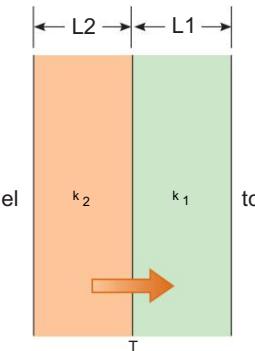


Figura 20.13 (Ejemplo 20.8) Transferencia de energía por conducción a través de dos losas en contacto térmico entre sí. En estado estacionario, la tasa de transferencia de energía a través de la losa 1 es igual a la tasa de transferencia de energía a través de la losa 2.

Analizar Use la Ecuación 20.16 para expresar la velocidad a la que se transfiere la energía a través de la losa 1:

$$(1) \frac{1}{k_1 A_a T \frac{T_c - T_1}{L_1}}$$

Expresse la velocidad a la que se transfiere la energía a través de la losa 2:

$$(2) \frac{2}{k_2 A_a T \frac{T_c - T_2}{L_2}}$$

Establezca estas dos tasas iguales para representar el equilibrio situación:

$$\frac{k_1 A_a T \frac{T_c - T_1}{L_1}}{k_2 A_a T \frac{T_c - T_2}{L_2}}$$

Resolver para T:

$$(3) T = \frac{k_1 L_2 T_c k_2 L_1 T_h}{k_1 L_2 k_2 L_1}$$

Sustituya la Ecuación (3) en la Ecuación (1) o Ecuación (2):

$$(4) \frac{\frac{A_1 T_h T_c}{1 L_1 > k_1 2} \frac{A_2 T_h T_c}{1 L_2 > k_2 2}}{1}$$

Finalizar La extensión de este procedimiento a varias losas de materiales conduce a la Ecuación 20.17.

**¿Y si?** Suponga que está construyendo un contenedor aislado con dos capas de aislamiento y la tasa de transferencia de energía determinada por la Ecuación (4) resulta ser demasiado alta. Tiene suficiente espacio para aumentar el grosor de una de las dos capas en un 20%. ¿Cómo decidirías qué capa elegir?

**Respuesta** Para disminuir la potencia tanto como sea posible, debe aumentar el denominador en la Ecuación (4) tanto como sea posible. Cualquiera que sea el grosor que elija aumentar, L<sub>1</sub> o L<sub>2</sub>, aumenta el término correspondiente L/k en el denominador en un 20%. Para que este cambio porcentual represente el cambio absoluto más grande, desea tomar el 20% del término más grande. Por lo tanto, debe aumentar el espesor de la capa que tiene el mayor valor de L/k.

### Aislamiento del hogar

En la práctica de la ingeniería, el término L/k para una sustancia en particular se conoce como el valor R del material. Por lo tanto, la Ecuación 20.17 se reduce a A<sub>1</sub>T<sub>h</sub>

$$\frac{T_c - T_1}{R_i} \quad (20.18)$$

donde R = L/k. Los valores R para algunos materiales de construcción comunes se dan en la Tabla 20.4. En los Estados Unidos, las propiedades aislantes de los materiales utilizados en

**TABLA 20.4**

#### Valores R para algunos materiales de construcción comunes

Material	Valor R (ft <sup>2</sup> °F h/Btu)
Revestimiento de madera dura (1 pulgada de espesor)	0,91
Tejas de madera (traslapadas)	0,87
Ladrillo (4 pulgadas de espesor)	4,00
Bloque de hormigón (núcleos rellenos)	1,93
Aislamiento de fibra de vidrio (3,5 pulgadas de espesor)	10,90
Aislamiento de fibra de vidrio (6 pulgadas de espesor)	18,80
Tablero de fibra de vidrio (1 pulgada de espesor)	4,35
Fibra de celulosa (1 pulgada de espesor)	3,70
Vidrio plano (0,125 pulg. de espesor)	0,89
Vidrio aislante (espacio de 0,25 pulg.)	1,54
Espacio de aire (3,5 pulg. de espesor)	1,01
Capa de aire estancado	0,17
Paneles de yeso (0,5 pulg. de espesor)	0,45
Revestimiento (0,5 pulg. de espesor)	1,32

los edificios generalmente se expresan en unidades habituales de EE. UU., no en unidades SI. Por lo tanto, en la tabla 20.4, los valores R se dan como una combinación de unidades térmicas británicas, pies, horas y grados Fahrenheit.

En cualquier superficie vertical abierta al aire, una capa muy delgada de aire estancado se adhiere a la superficie. Se debe considerar esta capa al determinar el valor R de una pared. El espesor de esta capa estancada en una pared exterior depende de la velocidad del viento. La transferencia de energía a través de las paredes de una casa en un día ventoso es mayor que en un día en que el aire está en calma. En la Tabla 20.4 se proporciona un valor R representativo para esta capa de aire estancada.

### EJEMPLO 20.9

#### El valor R de una pared típica

Calcule el valor R total para un muro construido como se muestra en la figura 20.14a. Comenzando fuera de la casa (hacia el frente en la figura) y moviéndose hacia adentro, la pared consta de 4 pulgadas de ladrillo, 0,5 pulgadas de revestimiento, un espacio de aire de 3,5 pulgadas de espesor y 0,5 pulgadas de paneles de yeso.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Use la figura 20.14 para ayudar a conceptualizar la estructura del muro.

No olvide las capas de aire estancado dentro y fuera de la casa.

Categorizar Usaremos ecuaciones específicas desarrolladas en esta sección sobre el aislamiento del hogar, por lo que clasificamos este ejemplo como un problema de sustitución.

Use la tabla 20.4 para encontrar el valor R de cada capa:

$$R1 \text{ 1 capa exterior de aire estancado} 2 \text{ } 0,17 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

$$R2 \text{ 1 ladrillo} 2 \text{ } 4,00 \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

$$R3 \text{ 1 revestimiento} 2 \text{ } 1,32 \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

$$R4 \text{ 1 espacio de aire} 2 \text{ } 1,01 \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

$$\text{h} > \text{Btu} \text{ R5 1 panel de yeso} 2 \text{ } 0,45 \text{ pies}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

$$R6 \text{ 1 capa interior de aire estancado} 2 \text{ } 0,17 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

Sume los valores R para obtener el valor R total del muro:

$$R_{\text{total}} \text{ R1 R2 R3 R4 R5 R6}$$

$$7.12 \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} \text{ } \# \text{ h} > \text{Btu}$$

**¿Y si?** Suponga que no está satisfecho con este valor R total para la pared. No puede cambiar la estructura general, pero puede llenar el espacio de aire como en la figura 20.14b. Para maximizar el valor R total, ¿qué material debe elegir para llenar el espacio de aire?

**Respuesta** Mirando la tabla 20.4, vemos que 3,5 pulgadas de aislamiento de fibra de vidrio son más de diez veces más efectivos que 3,5 pulgadas de aire. Por lo tanto, debemos llenar el espacio de aire con aislamiento de fibra de vidrio. El resultado es que agregamos 10,90 ft<sup>2</sup> °F h/Btu de valor R y perdemos 1,01 ft<sup>2</sup> °F h/Btu debido al espacio de aire que hemos reemplazado. El nuevo valor R total es igual a 7,12 ft<sup>2</sup> °F h/Btu 9,89 ft<sup>2</sup> °F h/Btu 17,01 ft<sup>2</sup> °F h/Btu.

## Convección

En un momento u otro, probablemente te hayas calentado las manos sosteniéndolas sobre una llama abierta. En esta situación, el aire directamente encima de la llama se calienta y se expande. Como resultado, la densidad de este aire disminuye y el aire asciende. Este aire caliente calienta tus manos mientras fluye. Se dice que la energía transferida por el movimiento de una sustancia caliente ha sido transferida por convección. Cuando resulta de diferencias en la densidad, como ocurre con el aire alrededor de un fuego, el proceso se denomina convección natural. El flujo de aire en una playa es un ejemplo de convección natural, al igual que la mezcla

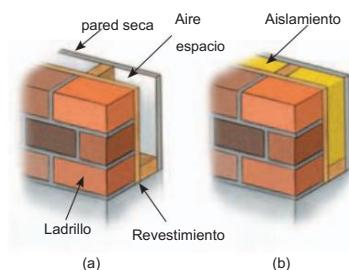


Figura 20.14 (Ejemplo 20.9) Una pared exterior de una casa que contiene (a) un espacio de aire y (b) aislamiento.

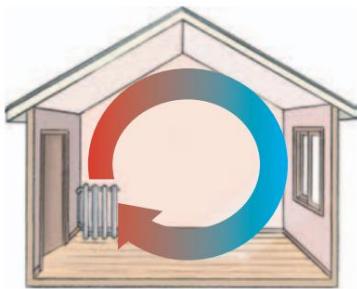


Figura 20.15 Las corrientes de convección se establecen en una habitación calentada por un radiador.

que ocurre cuando el agua superficial de un lago se enfriá y se hunde (consulte la Sección 19.4). Cuando la sustancia calentada es forzada a moverse por un ventilador o una bomba, como en algunos sistemas de calefacción de aire caliente y agua caliente, el proceso se denomina convección forzada.

Si no fuera por las corrientes de convección, sería muy difícil hervir el agua. Como el agua se calienta en una tetera, las capas inferiores se calientan primero. Esta agua se expande y sube a la superficie porque se baja su densidad. Al mismo tiempo, el agua fría más densa en la superficie se hunde hasta el fondo de la tetera y se calienta.

El mismo proceso ocurre cuando una habitación se calienta con un radiador. El radiador caliente calienta el aire en las regiones inferiores de la habitación. El aire caliente se expande y sube hasta el techo debido a su menor densidad. El aire más denso y frío de arriba se hunde y se establece el patrón de corriente de aire continuo que se muestra en la figura 20.15.

## Radiación

El tercer medio de transferencia de energía que discutiremos es la radiación térmica. Todos los objetos irradian energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas (ver Capítulo 34) producidas por las vibraciones térmicas de las moléculas. Es probable que esté familiarizado con la radiación electromagnética en forma de brillo naranja de un quemador de estufa eléctrica, un calentador de espacio eléctrico o las bobinas de una tostadora.

La velocidad a la que un objeto irradia energía es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Conocido como la ley de Stefan, este comportamiento se expresa en forma de ecuación como

la ley de Stefan

SAET4

(20.19)

donde  $P$  es la potencia en vatios de las ondas electromagnéticas radiadas desde la superficie del objeto,  $s$  es una constante igual a  $5.669 \times 10^8 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ,  $A$  es el área superficial del objeto en metros cuadrados,  $e$  es la emisividad y  $T$  es la temperatura de la superficie en kelvins. El valor de  $e$  puede variar entre cero y la unidad dependiendo de las propiedades de la superficie del objeto. La emisividad es igual a la absorvtividad, que es la fracción de la radiación entrante que absorbe la superficie. Un espejo tiene una capacidad de absorción muy baja porque refleja casi toda la luz incidente. Por lo tanto, la superficie de un espejo también tiene una emisividad muy baja. En el otro extremo, una superficie negra tiene alta absorción y alta emisividad. Un absorbedor ideal se define como un objeto que absorbe toda la energía que incide sobre él, y para tal objeto,  $e = 1$ . Un objeto para el que  $e = 1$  a menudo se denomina cuerpo negro. En el capítulo 40 investigaremos los enfoques teóricos y experimentales de la radiación de un cuerpo negro.

Cada segundo, aproximadamente  $1.370 \text{ J}$  de radiación electromagnética del Sol pasa perpendicularmente a través de cada  $1 \text{ m}^2$  en la parte superior de la atmósfera terrestre.

Esta radiación es principalmente luz visible e infrarroja acompañada de una cantidad significativa de radiación ultravioleta. Estudiaremos estos tipos de radiación en detalle en el Capítulo 34. Suficiente energía llega a la superficie de la Tierra cada día para satisfacer todas nuestras necesidades de energía en este planeta cientos de veces, si tan solo pudiera ser capturada y utilizada de manera eficiente. El crecimiento en el número de casas que funcionan con energía solar construidas en los Estados Unidos refleja los crecientes esfuerzos que se están realizando para utilizar esta abundante energía.

Lo que sucede con la temperatura atmosférica durante la noche es otro ejemplo de los efectos de la transferencia de energía por radiación. Si hay una capa de nubes sobre la Tierra, el vapor de agua en las nubes absorbe parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra y la vuelve a emitir a la superficie. En consecuencia, los niveles de temperatura en la superficie siguen siendo moderados. En ausencia de esta capa de nubes, hay menos en el camino para evitar que esta radiación se escape al espacio; por lo tanto, la temperatura desciende más en una noche despejada que en una nublada.

Como un objeto irradia energía a una velocidad dada por la Ecuación 20.19, también absorbe radiación electromagnética de los alrededores, que consisten en otros objetos que irradian energía. Si este último proceso no ocurriera, un objeto eventualmente irradiaría toda su energía y su temperatura alcanzaría el cero absoluto. Si un objeto está a una temperatura  $T$  y sus alrededores están a una temperatura promedio  $T_0$ , la tasa neta de energía ganada o perdida por el objeto como resultado de la radiación es

$$\text{neto } sAe1T4 T^4_2 \quad (20.20)$$

Cuando un objeto está en equilibrio con su entorno, irradia y absorbe energía al mismo ritmo y su temperatura permanece constante. Cuando un objeto está más caliente que su entorno, irradia más energía de la que absorbe y su temperatura disminuye.

#### El frasco Dewar El frasco

Dewar<sup>7</sup> es un recipiente diseñado para minimizar las transferencias de energía por conducción, convección y radiación. Dicho recipiente se utiliza para almacenar líquidos fríos o calientes durante largos períodos de tiempo. (Una botella aislada, como un termo, es un equivalente doméstico común de un matraz Dewar). La construcción estándar (figura 20.16) consta de un recipiente de vidrio Pyrex de doble pared con paredes plateadas. El espacio entre las paredes está evacuado para minimizar la transferencia de energía por conducción y convección.

Las superficies plateadas minimizan la transferencia de energía por radiación porque la plata es un muy buen reflector y tiene una emisividad muy baja. Se obtiene una mayor reducción de la pérdida de energía reduciendo el tamaño del cuello. Los matraces Dewar se utilizan comúnmente para almacenar nitrógeno líquido (punto de ebullición 77 K) y oxígeno líquido (punto de ebullición 90 K).

Para confinar helio líquido (punto de ebullición 4,2 K), que tiene un calor de vaporización muy bajo, a menudo es necesario utilizar un sistema Dewar doble en el que el matraz Dewar que contiene el líquido está rodeado por un segundo matraz Dewar. El espacio entre los dos matraces se llena con nitrógeno líquido.

Los diseños más nuevos de contenedores de almacenamiento utilizan un "súper aislamiento" que consta de muchas capas de material reflectante separadas por fibra de vidrio. Todo este material está en el vacío y no se necesita nitrógeno líquido con este diseño.

<sup>7</sup> Inventado por Sir James Dewar (1842–1923).



Figura 20.16 Vista transversal de un matraz Dewar, que se utiliza para almacenar sustancias frías o calientes.

## Resumen

**ThomsonNOW™** Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para realizar un examen de práctica para este capítulo.

### DEFINICIONES

La energía interna es toda la energía de un sistema que está asociada con los componentes microscópicos del sistema. La energía interna incluye la energía cinética de la traslación aleatoria, la rotación y la vibración de las moléculas, la energía potencial vibratoria dentro de las moléculas y la energía potencial entre las moléculas.

El calor es la transferencia de energía a través del límite de un sistema resultante de una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. El símbolo Q representa la cantidad de energía transferida por este proceso.

Una caloría es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14,5 °C a 15,5 °C.

La capacidad calorífica C de cualquier muestra es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de la muestra en 1°C.

El calor específico c de una sustancia es la capacidad calorífica por unidad masa:

$$c = \frac{q}{m \Delta T} \quad (20.3)$$

El calor latente de una sustancia se define como la relación entre la energía necesaria para provocar un cambio de fase en la masa de la sustancia:

$$L = \frac{q}{\text{metro}} \quad (20.6)$$

(continuado)

## CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La energía  $Q$  requerida para cambiar la temperatura de una masa  $m$  de una sustancia en una cantidad  $T$  es

$$Q = mc \Delta T \quad (20.4)$$

donde  $c$  es el calor específico de la sustancia.

La energía requerida para cambiar la fase de una sustancia pura de la masa  $m$  es

$$Q = mL \quad (20.7)$$

donde  $L$  es el calor latente de la sustancia y depende de la naturaleza del cambio de fase y de la sustancia. El signo positivo se usa si la energía entra al sistema y el signo negativo se usa si la energía sale del sistema.

El trabajo realizado sobre un gas a medida que su volumen cambia de un valor inicial

Vi a un valor final Vf es

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV \quad (20.9)$$

donde  $P$  es la presión del gas, que puede variar durante el proceso. Para evaluar  $W$ , el proceso debe estar completamente especificado; es decir,  $P$  y  $V$  deben conocerse durante cada paso. El trabajo realizado depende del camino recorrido entre los estados inicial y final.

La primera ley de la termodinámica establece que cuando un sistema cambia de un estado a otro, el cambio en su energía interna es

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \quad (20.10)$$

donde  $Q$  es la energía transferida al sistema por el calor y  $W$  es el trabajo realizado en el sistema. Aunque  $Q$  y  $W$  dependen del camino tomado desde el estado inicial hasta el estado final, la cantidad  $E_{\text{int}}$  no depende del camino.

En un proceso cíclico (uno que se origina y termina en el mismo estado),  $E_{\text{int}} = 0$  y por lo tanto  $Q = W$ .

Es decir, la energía transferida al sistema por el calor es igual al negativo del trabajo realizado sobre el sistema durante el proceso.

En un proceso adiabático, no se transfiere energía por calor entre el sistema y su entorno ( $Q = 0$ ).

En este caso, la primera ley da  $E_{\text{int}} = W$ . En la expansión libre adiabática de un gas,  $Q = 0$  y  $W = 0$ , entonces  $E_{\text{int}} = 0$ . Es decir, la energía interna del gas no cambia en tal proceso.

Un proceso isobárico es aquel que ocurre a presión constante. El trabajo realizado sobre un gas en tal proceso es  $W = P(V_f - V_i)$ .

Un proceso isovolumétrico es aquel que ocurre en volumen constante. No se realiza trabajo en dicho proceso, por lo que  $E_{\text{int}} = Q$ .

Un proceso isotérmico es aquel que ocurre a temperatura constante. El trabajo realizado sobre un gas ideal durante un proceso isotérmico es

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (20.14)$$

La conducción puede verse como un intercambio de energía cinética entre moléculas o electrones que chocan. La tasa de transferencia de energía por conducción a través de una losa de área  $A$  es

$$kA \frac{dT}{dx} \quad (20.15)$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del material del que está hecha la losa y  $dT/dx$  es el gradiente de temperatura.

En convección, una sustancia caliente transfiere energía de un lugar a otro.

Todos los objetos emiten radiación térmica en la forma de ondas electromagnéticas a la velocidad

$$4 \pi \sigma T^4 \quad (20.19)$$

## Preguntas

denota respuesta disponible en Student Solutions Manual/Study Guide; O denota pregunta objetiva

1. Distinguir claramente entre temperatura, calor y energía interna.
2. O El alcohol etílico tiene aproximadamente la mitad del calor específico del agua. Suponga que se transfieren cantidades iguales de energía por calor a muestras líquidas de alcohol y agua de igual masa en recipientes separados con aislamiento. El agua sube de temperatura  $25^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuánto subirá la temperatura del alcohol? (a)  $12^{\circ}\text{C}$  (b)  $25^{\circ}\text{C}$  (c)  $50^{\circ}\text{C}$  (d) Depende de la tasa de transferencia de energía. (e) No aumentará de temperatura.
3.

 ¿Qué tiene de malo la siguiente afirmación: "Dados dos cuerpos cualesquiera, el que tiene la temperatura más alta contiene más calor".
4. O El berilio tiene aproximadamente la mitad del calor específico del agua líquida ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Clasifique las cantidades de entrada de energía requeridas para producir los siguientes cambios de mayor a menor. En su clasificación, anote cualquier caso de igualdad. (a) elevar la temperatura de 1 kg de  $\text{H}_2\text{O}$  de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $26^{\circ}\text{C}$  (b) elevar la temperatura de 2 kg de  $\text{H}_2\text{O}$  de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $23^{\circ}\text{C}$  (c) elevar la temperatura de 2 kg de  $\text{H}_2\text{O}$  de  $1^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$  (d) elevar la temperatura de 2 kg de berilio de  $1^{\circ}\text{C}$  a  $2^{\circ}\text{C}$  (e) elevar la temperatura de 2 kg de  $\text{H}_2\text{O}$  de  $1^{\circ}\text{C}$  a  $2^{\circ}\text{C}$  5. ¿Por qué es una persona capaz de quitar un trozo de papel de aluminio seco de un horno caliente con los dedos desnudos, mientras que si hay humedad en el papel se produce una quemadura?
6.

 La temperatura del aire sobre las áreas costeras está profundamente influenciada por el gran calor específico del agua. Una razón es que la energía liberada cuando 1 m<sup>3</sup> de agua se enfriá  $1^{\circ}\text{C}$  elevará la temperatura de un volumen mucho mayor de aire en  $1^{\circ}\text{C}$ . Encuentre este volumen de aire. El calor específico del aire es de aproximadamente 1 kJ/kg  $^{\circ}\text{C}$ . Tome la densidad del aire como 1,3 kg/m<sup>3</sup>.
7. O Suponga que está midiendo el calor específico de una muestra de metal originalmente caliente por el método de mezclas como se describe en el ejemplo 20.2. Debido a que su calorímetro no es perfectamente aislante, la energía puede transferirse por calor entre el contenido del calorímetro y la habitación. Para obtener el resultado más preciso del calor específico del metal, ¿a qué temperatura inicial debe usar agua? (a) ligeramente inferior a la temperatura ambiente (b) igual a la temperatura ambiente (c) ligeramente superior a la temperatura ambiente (d) lo que quieras porque la temperatura inicial no hace ninguna diferencia.
8.

 Utilizando la primera ley de la termodinámica, explique por qué la energía total de un sistema aislado siempre es constante.
9. O Una persona agita una botella aislada sellada que contiene café caliente durante unos minutos. (i) ¿Cuál es el cambio en la temperatura del café? (a) una gran disminución (b) una ligera disminución (c) ningún cambio (d) un ligero aumento (e) un gran aumento (ii) ¿Cuál es el cambio en la energía interna del café? Elija entre las mismas posibilidades.
10. ¿Es posible convertir energía interna en energía mecánica? ¿Energía? Explique con ejemplos.
11. Un piso de baldosas en un baño puede sentirse incómodamente frío para sus pies descalzos, pero un piso alfombrado en una habitación contigua a la misma temperatura se sentirá cálido. ¿Por qué?
12. Es la mañana de un día que se volverá caluroso. Acaba de comprar bebidas para un picnic y las está cargando, con hielo, en un cofre en la parte trasera de su automóvil. Tienes una manta de lana. ¿Deberías envolverlo alrededor del cofre? ¿Hacer eso ayudaría a mantener las bebidas frías, o deberías esperar que la manta de lana las caliente? Tu hermanita te dice enfáticamente que no le gustaría estar envuelta en una manta de lana en un día caluroso. Explique sus respuestas y su respuesta a ella.
13. Al acampar en un cañón en una noche tranquila, un campista nota que tan pronto como el sol golpea los picos circundantes, comienza a soplar una brisa. ¿Qué provoca la brisa?
14. O Un atizador es una varilla rígida no inflamable que se usa para empujar leños encendidos en una chimenea. Para facilitar el uso y la seguridad, el atizador debe estar hecho de un material (a) con calor específico alto y conductividad térmica alta, (b) con calor específico bajo y conductividad térmica baja, (c) con calor específico bajo y conductividad térmica alta, conductividad, o (d) con alto calor específico y baja conductividad térmica.
15. O La estrella A tiene el doble del radio y el doble del tem absoluto temperatura de la estrella B. ¿Cuál es la relación entre la potencia de salida de la estrella A y la de la estrella B? La emisividad de ambas estrellas es esencialmente 1. (a) 4 (b) 8 (c) 16 (d) 32 (e) 64
16. Si el agua es un mal conductor térmico, ¿por qué puede elevarse rápidamente la temperatura en una olla de agua cuando se coloca sobre una llama?
17. Necesitas recoger una olla muy caliente en tu cocina. Tienes un par de almohadillas calientes. Para poder recoger la olla con mayor comodidad, ¿debería remojar las almohadillas en agua fría o mantenerlas secas?
18. Suponga que sirve café caliente para sus invitados, y uno de ellos quiere beberlo con crema, varios minutos más tarde, y luego lo más caliente posible. Para tener el café más caliente, ¿debe la persona agregar la crema justo después de verter el café o justo antes de beberlo? Explicar.
19. O Las señales de advertencia que se ven en las carreteras justo antes de un puente son "Precaución: el puente se congela antes de la superficie de la carretera" o "El puente puede estar helado". ¿Cuál de los tres procesos de transferencia de energía analizados en la sección 20.7 es más importante para que se forme hielo en la superficie de un puente antes que en el resto de la superficie de la carretera en días muy fríos? (a) conducción (b) convección (c) radiación (d) ninguna de estas opciones porque el hielo se congela sin un cambio en la temperatura
20. Un profesor de física deja caer un malvavisco en un frasco de nitrógeno líquido, espera a que cese el hervor más enérgico, lo saca con unas pinzas, lo sacude, se lo mete en la boca, lo mastica y se lo traga. Nubes de cristales de hielo salen de su boca mientras mastica ruidosamente y comenta sobre el sabor dulce. ¿Cómo puede hacer eso sin lesión? Precaución: el nitrógeno líquido puede ser una sustancia peligrosa. No debe intentar esta demostración usted mismo. El maestro podría resultar gravemente herido si no sacudiera el malvavisco, si tocara un diente con las pinzas o si no comenzara con la boca llena de saliva.

21. En 1801, Humphry Davy frotó pedazos de hielo dentro de una casa de hielo. Se aseguró de que nada en el ambiente estuviera a una temperatura más alta que las piezas frotadas. Observó la producción de gotas de agua líquida. Haz una tabla que enumere este y otros experimentos o procesos para ilustrar cada una de las siguientes situaciones. (a) Un sistema puede absorber energía por calor, aumentar la energía interna y aumentar la temperatura. (b) Un sistema puede absorber energía por calor y aumentar su energía interna sin que aumente la temperatura. (c) Un sistema puede absorber energía por calor sin aumentar la temperatura.

tura o en energía interna. (d) Un sistema puede aumentar en energía interna y en temperatura sin absorber energía por calor. (e) Un sistema puede aumentar su energía interna sin absorber energía por calor o aumentar su temperatura. (f) ¿Qué pasa si? Si la temperatura de un sistema aumenta, ¿es necesariamente cierto que aumenta su energía interna?

22. Considera la fotografía de apertura de la Parte 3 (página 531). Analice las funciones de la conducción, la convección y la radiación en el funcionamiento de las aletas de enfriamiento en los postes de apoyo del oleoducto de Alaska.

## Problemas

**WebAssign** Los problemas de este capítulo se pueden asignar en línea en WebAssign.

**ThomsonNOW®** Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para evaluar su comprensión de los temas de este capítulo con cuestionarios adicionales y preguntas conceptuales.

1, 2, 3 denota sencillo, intermedio, desafiante; indica la solución completa disponible en el Manual de soluciones para estudiantes/Guía de estudio; indica una solución guiada con sugerencias disponibles en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com); denota desarrollo de razonamiento simbólico; denota pedir un razonamiento cualitativo; indica que la computadora es útil para resolver problemas

### Sección 20.1 Calor y energía interna

1. En su luna de miel, James Joule probó la conversión de energía mecánica en energía interna midiendo la temperatura del agua que cae. Si el agua en la parte superior de una cascada suiza tiene una temperatura de 10,0 °C y luego cae 50,0 m, ¿qué temperatura máxima en el fondo podría esperar Joule? No logró medir el cambio de temperatura, en parte porque la evaporación enfrió el agua que caía y también porque su termómetro no era lo suficientemente sensible.
2. Considere el aparato de Joule descrito en la figura 20.1. La masa de cada uno de los dos bloques es de 1,50 kg y el tanque aislado se llena con 200 g de agua. ¿Cuál es el aumento en la temperatura del agua después de que los bloques caen una distancia de 3,00 m?

cortinas aislantes o persianas están cerradas sobre las ventanas. Durante el período entre las 5:00 pm y las 7:00 am, la temperatura de la casa bajaría y se requiere una "masa térmica" suficientemente grande para evitar que baje demasiado. La masa térmica puede ser una gran cantidad de piedra (con calor específico 850 J/kg °C) en el suelo y las paredes interiores expuestas a la luz solar. ¿Qué masa de piedra se requiere para que la temperatura no descienda por debajo de 18.0°C durante la noche?

### Sección 20.2 Calor específico y calorimetría

3. La temperatura de una barra de plata aumenta 10,0 °C cuando absorbe 1,23 kJ de energía por calor. La masa de la barra es de 525 g. Determine el calor específico de la plata.
4. El láser Nova en Lawrence Livermore National Labo laboratorio en California se utilizó en los primeros estudios de iniciar la fusión nuclear controlada (Sección 45.4). Entregó 1013 W en un 1,60 Explique intervalo de tiempo de 2,50 ns. potencia de cómo se compara su producción de energía en uno de esos intervalos de tiempo con la energía requerida para hacer una taza de té calentando 0,800 kg de agua de 20,0 °C a 100 °C.
5. El uso sistemático de la energía solar puede generar un gran ahorro en el costo de la calefacción de invierno para una casa típica en el norte de los Estados Unidos. Si la casa tiene un buen aislamiento, puede modelarla como una pérdida de energía por calor constante a razón de 6 000 W en un día de abril cuando la temperatura exterior promedio es de 4 °C y cuando el sistema de calefacción convencional no se usa en absoluto. El colector pasivo de energía solar puede consistir simplemente en ventanas muy grandes en una habitación orientada al sur. La luz del sol que brilla durante el día es absorbida por el suelo, las paredes interiores y los objetos de la habitación, elevando su temperatura a 38,0 °C. A medida que el sol se pone,

6. Una taza de aluminio de 200 g de masa contiene 800 g de agua en equilibrio térmico a 80,0 °C. La combinación de taza y agua se enfria uniformemente de manera que la temperatura disminuye 1.50°C por minuto. ¿A qué velocidad se elimina la energía por el calor? Exprese su respuesta en vatios.
7. Una herradura de hierro de 1,50 kg inicialmente a 600 °C se deja caer en un balde que contiene 20,0 kg de agua a 25,0 °C. ¿Cuál es la temperatura final? (Ignore la capacidad calorífica del recipiente y suponga que una cantidad insignificante de agua se evapora).
8. Se utiliza un taladro eléctrico con una broca de acero de 27,0 g de masa y 0,635 cm de diámetro para perforar un bloque cúbico de acero de 240 g de masa. Suponga que el acero tiene las mismas propiedades que el hierro. El proceso de corte se puede modelar como si ocurriera en un punto de la circunferencia de la broca. Este punto se mueve en espiral a una velocidad constante de 40,0 m/s y ejerce una fuerza de magnitud constante de 3,20 N sobre el bloque. Como se muestra en la figura P20.8, una ranura en la broca transporta las virutas hasta la parte superior del bloque, donde forman una pila alrededor del agujero. El bloque se sujetó en una abrazadera de material de baja conductividad térmica, y la broca se sujetó en un mandril también de este material. Consideraremos encender el taladro por un intervalo de tiempo de 15,0 s. Este intervalo de tiempo es lo suficientemente corto como para que los objetos de acero pierdan solo una cantidad insignificante de energía por conducción, convección y radiación en su entorno. No obstante, 15 s es tiempo suficiente para que la conducción dentro del acero lleve todo a una temperatura uniforme. La temperatura se mide rápidamente con una sonda de termómetro, que se muestra en el lado de

el bloque de la figura. (a) Suponga que la broca está afilada y corta tres cuartos del camino a través del bloque durante 15 s. Encuentre el cambio de temperatura de la cantidad total de acero. (b) ¿Qué pasa si? Ahora suponga que la broca está desafilada y corta solo una octava parte del bloque.

Identifique el cambio de temperatura de la cantidad total de acero en este caso. (c) ¿Qué datos, si los hubiere, son innecesarios para la solución? Explicar.

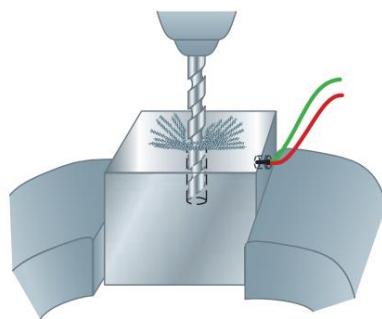


Figura P20.8

9. Un calorímetro de aluminio con una masa de 100 g contiene 250 g de agua. El calorímetro y el agua están en equilibrio térmico a 10,0 °C. Se colocan dos bloques metálicos en el agua. Uno es una pieza de cobre de 50,0 g a 80,0 °C. El otro tiene una masa de 70,0 g y está originalmente a una temperatura de 100°C. Todo el sistema se estabiliza a una temperatura final de 20,0°C. (a) Determine el calor específico de la muestra desconocida. (b) Con los datos de la tabla 20.1, ¿puede hacer una identificación positiva del material desconocido? ¿Puedes identificar un posible material?

Explique sus respuestas.

10. Una moneda de cobre de 3,00 g a 25,0 °C cae 50,0 m al suelo. (a) Suponiendo que el 60,0% del cambio en la energía potencial del sistema centavo-Tierra se destina a aumentar la energía interna del centavo, determine la temperatura final del centavo. (b) ¿Qué pasa si? ¿El resultado depende de la masa del centavo? Explicar.
11. Una combinación de 0,250 kg de agua a 20,0 °C, 0,400 kg de aluminio a 26,0 °C y 0,100 kg de cobre a 100 °C se mezcla en un recipiente aislado y se deja que llegue a equilibrio termal. Ignore cualquier transferencia de energía hacia o desde el recipiente y determine la temperatura final de la mezcla.
12. Dos recipientes aislados térmicamente están conectados por un tubo estrecho provisto de una válvula que inicialmente está cerrada. Un recipiente de 16,8 L de volumen contiene oxígeno a una temperatura de 300 K y una presión de 1,75 atm. El otro recipiente de volumen 22,4 L contiene oxígeno a una temperatura de 450 K y una presión de 2,25 atm. Cuando se abre la válvula, los gases de los dos recipientes se mezclan y la temperatura y la presión se vuelven uniformes. (a) ¿Cuál es la temperatura final? (b) ¿Cuál es la presión final?

### Sección 20.3 Calor latente

13. ¿Cuánta energía se requiere para cambiar un cubo de hielo de 40,0 g de hielo a 10,0°C a vapor a 110°C?
14. Un calorímetro de cobre de 50,0 g contiene 250 g de agua a 20,0 °C. ¿Cuánto vapor debe condensarse en el agua si la temperatura final del sistema debe llegar a 50,0°C?

15. Una bala de plomo de 3,00 g a 30,0 °C se dispara a una velocidad de 240 m/s en un gran bloque de hielo a 0 °C, en el que se incrusta. ¿Qué cantidad de hielo se derrite?

16. Se añade vapor a 100°C a hielo a 0°C. (a) Encuentre la cantidad de hielo derretido y la temperatura final cuando la masa de vapor es de 10,0 g y la masa de hielo es de 50,0 g. (b) ¿Qué pasa si? Repita cuando la masa de vapor sea de 1,00 g y la masa de hielo sea de 50,0 g.

17. Un bloque de cobre de 1,00 kg a 20,0 °C se deja caer en un recipiente grande con nitrógeno líquido a 77,3 K. ¿Cuántos kilogramos de nitrógeno se evaporan cuando el cobre alcanza los 77,3 K? (El calor específico del cobre es 0,092 0 cal/g °C. El calor latente de vaporización del nitrógeno es 48,0 cal/g.)

18. Un automóvil tiene una masa de 1 500 kg y sus frenos de aluminio tienen una masa total de 6,00 kg. (a) Suponga que toda la energía mecánica que desaparece cuando el automóvil se detiene se deposita en los frenos y no se transfiere energía de los frenos por calor. Los frenos están originalmente a 20,0°C. ¿Cuántas veces se puede detener el automóvil desde 25,0 m/s antes de que los frenos comiencen a derretirse? (b) Identifique algunos efectos ignorados en el inciso (a) que son importantes en una evaluación más realista del calentamiento de los frenos.

19. En un recipiente aislado, se agregan 250 g de hielo a 0 °C a 600 g de agua a 18,0 °C. (a) ¿Cuál es la temperatura final del sistema? (b) ¿Cuánto hielo queda cuando el sistema alcanza el equilibrio?

20. Problema de revisión. La siguiente ecuación describe un proceso que ocurre tan rápidamente que se transfiere energía insignificante entre el sistema y el entorno por conducción, convección o radiación:

$$\tau_2 10.012 \ 0 \text{ kg}^2 1300 \text{ m} > \text{s}^2 - \tau_2 10.008 \ 00 \text{ kg}^2 1400 \text{ m} > \text{s}^2$$

$$\tau_2 10.020 \ 0 \text{ kg}^2 120 \text{ m} > \text{s}^2$$

$$10.020 \ 0 \text{ kg}^2 1128 \text{ J} > \text{kg} \ # ^\circ \text{C} 2 1327.3^\circ \text{C} 30.0^\circ \text{C} 2 \text{ m} /$$

$$12.45 \ 104 \text{ J} > \text{kg} 2$$

- (a) Escriba un problema para el cual la ecuación aparecerá en la solución. Proporcione los datos, describa el sistema y describa el proceso en curso. Deje que el problema termine con la afirmación: "Describa el estado del sistema inmediatamente después". (b) Resuelva el problema, incluido el cálculo de la incógnita en la ecuación y la identificación de su significado físico.

### Sección 20.4 Trabajo y calor en procesos termodinámicos Los problemas

4 y 27 del capítulo 7 también se pueden asignar a esta sección.

21. Una muestra de gas ideal se expande al doble de su volumen original de 1,00 m<sup>3</sup> en un proceso cuasiestático para el cual P aV 2, con 5,00 atm/m<sup>6</sup>, como se muestra en la figura P20.21. ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas en expansión?

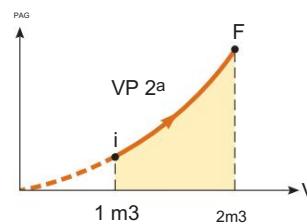


Figura P20.21

22. (a) Determine el trabajo realizado sobre un fluido que se expande de i a f como se indica en la figura P20.22. (b) ¿Qué pasa si? ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el fluido si se comprime de f a i a lo largo de la misma trayectoria?

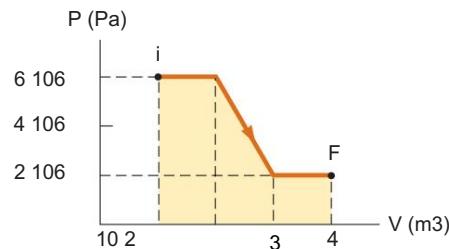


Figura P20.22

23. Un gas ideal está encerrado en un cilindro con un pistón móvil encima. El pistón tiene una masa de 8 000 g y un área de  $5,00 \text{ cm}^2$  y puede deslizarse libremente hacia arriba y hacia abajo, manteniendo constante la presión del gas. ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas cuando la temperatura de 0,200 mol del gas aumenta de  $20,0^\circ\text{C}$  a  $300^\circ\text{C}$ ?
24. Un gas ideal está encerrado en un cilindro que tiene un pistón móvil en la parte superior. El pistón tiene una masa m y un área A y puede deslizarse libremente hacia arriba y hacia abajo, manteniendo constante la presión del gas. ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas cuando la temperatura de n mol del gas se eleva de  $T_1$  a  $T_2$ ?
25. Un mol de un gas ideal se calienta lentamente para que pase del estado  $PV$  ( $P_i, V_i$ ), al ( $3P_i, 3V_i$ ), de forma que la presión del gas sea directamente proporcional al volumen. (a) ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas en el proceso? (b) ¿Cómo se relaciona la temperatura del gas con su volumen durante este proceso?

Sección 20.5 La primera ley de la termodinámica 26. Se lleva un gas a través del proceso cíclico descrito en la figura P20.26. (a) Encuentre la energía neta transferida al sistema por calor durante un ciclo completo. (b) ¿Qué pasa si? Si el ciclo se invierte, es decir, el proceso sigue el camino ACBA, ¿cuál es la entrada de energía neta por ciclo por calor?

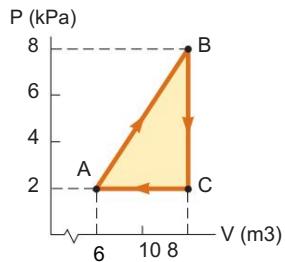


Figura P20.26 Problemas 26 y 29.

27. Un sistema termodinámico experimenta un proceso en el que su energía interna disminuye en 500 J. Durante el mismo intervalo de tiempo, se realizan 220 J de trabajo sobre el sistema. Encuentre la energía transferida hacia o desde él por calor.
28. Una muestra de un gas ideal pasa por el proceso que se muestra en la figura P20.28. De A a B, el proceso es adiabático; de B a C, es isobárico con 100 kJ de energía entrando al sistema por calor. De C a D, el proceso es isotérmico; de D a A, es isobárico con 150 kJ de energía saliendo del

sistema por calor. Determine la diferencia de energía interna  $E_{int,B} - E_{int,A}$ .

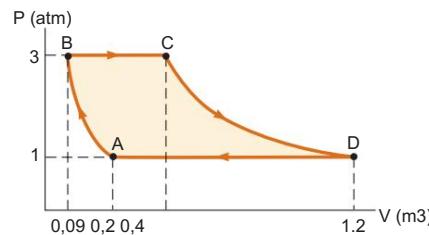


Figura P20.28

29. Considere el proceso cíclico representado en la figura P20.26. Si  $Q$  es negativo para el proceso BC y  $E_{int}$  es negativo para el proceso CA, ¿cuáles son los signos de  $Q$ ,  $W$  y  $E_{int}$  que están asociados con cada proceso?

Sección 20.6 Algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica 30.

Un mol de un gas ideal realiza 3 000 J de trabajo sobre sus alrededores a medida que se expande isotérmicamente hasta una presión final de 1,00 atm y un volumen de 25,0 L. Determine (a) el volumen inicial y (b) la temperatura del gas.

31. Un gas ideal inicialmente a  $300\text{ K}$  sufre una expansión isobárica a 2,50 kPa. Si el volumen aumenta de  $1,00\text{ m}^3$  a  $3,00\text{ m}^3$  y se transfieren 12,5 kJ al gas por calor, ¿cuáles son (a) el cambio en su energía interna y (b) su temperatura final?

32. Un bloque de aluminio de  $1,00\text{ kg}$  se calienta a presión atmosférica de modo que su temperatura aumenta de  $22,0^\circ\text{C}$  a  $40,0^\circ\text{C}$ . Encuentre (a) el trabajo realizado sobre el aluminio, (b) la energía que le agrega el calor y (c) el cambio en su energía interna.

33. ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el vapor cuando hierve 1,00 mol de agua a  $100^\circ\text{C}$  y se convierte en 1,00 mol de vapor a  $100^\circ\text{C}$  a 1,00 atm de presión? Suponga que el vapor se comporta como un gas ideal. Determine el cambio en la energía interna del material a medida que se vaporiza.

34. Un gas ideal inicialmente en  $P_i, V_i$  y  $T_i$  se lleva a través de un ciclo como se muestra en la figura P20.34. (a) Encuentre el trabajo neto realizado sobre el gas por ciclo. (b) ¿Cuál es la energía neta añadida por el calor al sistema por ciclo? (c) Obtenga un valor numérico para el trabajo neto realizado por ciclo para 1,00 mol de gas inicialmente a  $0^\circ\text{C}$ .

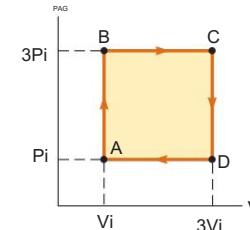


Figura P20.34

35. Una muestra de  $2,00\text{ mol}$  de gas helio inicialmente a  $300\text{ K}$  y  $0,400\text{ atm}$  se comprime isotérmicamente a  $1,20\text{ atm}$ . Al notar que el helio se comporta como un gas ideal, encuentre (a) el volumen final del gas, (b) el trabajo realizado sobre el gas y (c) la energía transferida por el calor.

36. En la figura P20.36, el cambio de energía interna de un gas que se lleva de A a C es de 800 J. El trabajo realizado sobre el gas a lo largo de la trayectoria ABC es de 500 J. (a) ¿Cuánta energía debe agregarse a el sistema por el calor a medida que va de A a través de B a C? (b) Si la presión en el punto A es cinco veces la del punto C, ¿cuál es el trabajo realizado sobre el sistema al ir de C a D? (c) ¿Cuál es la energía intercambiada con los alrededores por calor a medida que el ciclo va de C a A a lo largo del camino verde? (d) Si el cambio en la energía interna al ir del punto D al punto A es de 500 J, ¿cuánta energía debe agregarse al sistema por calor a medida que va del punto C al punto D?



Figura P20.36

## Sección 20.7 Mecanismos de transferencia de energía

37. El cristal de una ventana tiene un área de 3,00 m<sup>2</sup> y un espesor de 0,600 cm. Si la diferencia de temperatura entre sus caras es de 25,0 °C, ¿cuál es la tasa de transferencia de energía por conducción a través de la ventana?
38. Una ventana térmica con un área de 6,00 m<sup>2</sup> está construida con dos capas de vidrio, cada una de 4,00 mm de espesor, separadas entre sí por un espacio de aire de 5,00 mm. Si la superficie interior está a 20,0 °C y la exterior a 30,0 °C, ¿cuál es la tasa de transferencia de energía por conducción a través de la ventana?

39. Una barra de oro (Au) está en contacto térmico con una barra de plata (Ag) de la misma longitud y área (figura P20.39). Un extremo de la barra compuesta se mantiene a 80,0°C y el extremo opuesto a 30,0°C. Cuando la transferencia de energía alcanza el estado estacionario, ¿cuál es la temperatura en la unión?

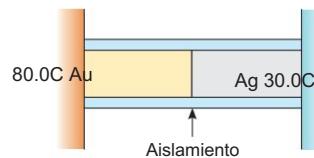


Figura P20.39

40. Calcule el valor R de (a) una ventana hecha de un solo panel de vidrio plano de pulgadas de espesor y (b) una ventana térmica hecha de dos paneles individuales, cada uno de pulgadas de espesor y separados por una pulgada de espesor. espacio aéreo. (c) ¿Por qué factor se reduce la transferencia de energía por calor a través de la ventana al usar la ventana térmica en lugar de la ventana de un solo panel?
41. Un estudiante está tratando de decidir qué ponerse. Su dormitorio está a 20.0°C. La temperatura de su piel es de 35.0°C. El área de su piel expuesta es de 1,50 m<sup>2</sup>. Las personas de todo el mundo tienen la piel oscura en el infrarrojo, con una emisividad de alrededor de 0,900. Encuentre la pérdida neta de energía de su cuerpo por radiación en 10.0 min.
42. La superficie del Sol tiene una temperatura de unos 5 800 K. El radio del Sol es de 6,96 108 m. Calcular

la energía total radiada por el Sol cada segundo. Suponga que la emisividad es 0.986.

43. Para las pruebas bacteriológicas de los suministros de agua y en las clínicas médicas, las muestras deben incubarse de forma rutinaria durante 24 horas a 37 °C. Un baño de temperatura constante estándar con calefacción eléctrica y control termostático no es práctico en lugares devastados por la guerra y países en desarrollo sin líneas eléctricas en funcionamiento continuo. Amy Smith, voluntaria del Cuerpo de Paz e ingeniera del MIT, inventó una incubadora de bajo costo y bajo mantenimiento para satisfacer la necesidad. Consiste en una caja con aislamiento de espuma que contiene varios paquetes de un material ceroso que se derrite a 37,0 °C, intercalados entre tubos, platos o botellas que contienen las muestras de prueba y el medio de cultivo (alimento bacteriano). Fuera de la caja, el material ceroso se derrite primero mediante una estufa o un colector de energía solar. Luego, el material ceroso se coloca en la caja para mantener calientes las muestras de prueba mientras se solidifica. El calor de fusión del material de cambio de fase es de 205 kJ/kg. Modelé el aislamiento como un panel con un área superficial de 0,490 m<sup>2</sup>, un espesor de 4,50 cm y una conductividad de 0,012 0 W/m °C. Suponga que la temperatura exterior es de 23,0 °C durante 12,0 h y de 16,0 °C durante 12,0 h. (a) ¿Qué masa de material ceroso se requiere para realizar la prueba bacteriológica? (b) Explique por qué se puede hacer su cálculo sin conocer la masa de las muestras de prueba o del aislamiento.
44. Una pizza grande y caliente flota en el espacio exterior después de ser desechada como basura de una nave espacial Vogon. ¿Cuál es el orden de magnitud (a) de su tasa de pérdida de energía y (b) de su tasa de cambio de temperatura? Enumere las cantidades que estima y el valor que estima para cada una.
45. El filamento de tungsteno de cierta bombilla de 100 W irradia 2,00 W de luz. (Los otros 98 W se llevan por convección y conducción). El filamento tiene un área superficial de 0,250 mm<sup>2</sup> y una emisividad de 0,950. Encuentre la temperatura del filamento. (El punto de fusión del tungsteno es 3 683 K.)
46. Al mediodía, el Sol entrega 1 000 W a cada metro cuadrado de una carretera asfaltada. Si el asfalto caliente pierde energía solo por radiación, ¿cuál es su temperatura de estado estacionario?
47. A nuestra distancia del Sol, la intensidad de la radiación solar es de 1 370 W/m<sup>2</sup>. La temperatura de la Tierra se ve afectada por el llamado efecto invernadero de la atmósfera, que hace que la emisividad de nuestro planeta para la luz visible sea mayor que su emisividad para la luz infrarroja. A modo de comparación, considere un objeto esférico de radio r sin atmósfera a la misma distancia del Sol que la Tierra. Suponga que su emisividad es la misma para todos los tipos de ondas electromagnéticas y que su temperatura es uniforme sobre su superficie. Explique por qué el área proyectada sobre la cual absorbe la luz solar es  $\pi r^2$  y el área superficial sobre la cual irradia es  $4\pi r^2$ . Calcule su temperatura de estado estacionario. ¿Hace frío? Su cálculo se aplica a (1) la temperatura promedio de la Luna, (2) los astronautas en peligro mortal a bordo de la nave espacial Apolo 13 averiada y (3) una catástrofe global en la Tierra si los incendios generalizados causaran que se acumulara una capa de hollín en todo el atmósfera superior para que la mayor parte de la radiación del Sol fuera absorbida allí y no en la superficie debajo de la atmósfera.

48. Dos bombillas tienen filamentos cilíndricos mucho más largos que de diámetro. Las bombillas de vacío son idénticas excepto que una funciona a una temperatura de filamento de

2 100°C y el otro opera a 2 000°C. (a) Encuentre la relación entre la potencia emitida por la bombilla más caliente y la emitida por la bombilla más fría. (b) Con las bombillas operando a las mismas temperaturas respectivas, la más fría debe modificarse para que emita la misma potencia que la más caliente, haciendo que el filamento de la bombilla más fría sea más grueso. ¿En qué factor debe aumentarse el radio de este filamento?

## Problemas adicionales

49. Un esquiador de fondo de 75,0 kg se mueve horizontalmente sobre la nieve a 0 °C. El coeficiente de fricción entre los esquís y la nieve es 0,200. Suponga que toda la energía interna generada por la fricción se agrega a la nieve, que se pega a sus esquís hasta que se derrite. ¿Qué distancia tiene que esquiar para derretir 1,00 kg de nieve?
50. En un frío día de invierno le compras castañas asadas a un vendedor ambulante. Pones el cambio que te da, monedas que constituyen 9,00 g de cobre a 12,0 °C, en el bolsillo de tu parka de plumas. Su bolsillo ya contiene 14,0 g de monedas de plata a 30,0 °C. Despues de un breve intervalo de tiempo, la temperatura de las monedas de cobre es de 4,00 °C y aumenta a razón de 0,500 °C/s. En este momento, (a) ¿cuál es la temperatura de las monedas de plata y (b) a qué tasa está cambiando?
51. Una barra de aluminio de 0,500 m de largo y con un área de sección transversal de 2,50 cm<sup>2</sup> se inserta en un recipiente térmicamente aislado que contiene helio líquido a 4,20 K. La barra está inicialmente a 300 K. (a) Si la mitad de la barra se inserta en el helio, ¿cuántos litros de helio herven cuando la mitad insertada se enfria a 4.20 K? (Suponga que la mitad superior aún no se enfriá.) (b) Si el extremo superior de la varilla se mantiene a 300 K, ¿cuál es la velocidad de ebullición aproximada del helio líquido después de que la mitad inferior haya alcanzado los 4,20 K?  
(El aluminio tiene una conductividad térmica de 31,0 J/s cm K a 4,2 K; ignore su variación de temperatura. El aluminio tiene un calor específico de 0,210 cal/g °C y una densidad de 2,70 g/cm<sup>3</sup>. La densidad del helio líquido es de 0,125 g / cm<sup>3</sup>.)

52. Un mol de un gas ideal está contenido en un cilindro con un pistón móvil. La presión, el volumen y la temperatura iniciales son  $P_i$ ,  $V_i$  y  $T_i$ , respectivamente. Encuentre el trabajo realizado sobre el gas en los siguientes procesos. En términos operativos, describa cómo llevar a cabo cada proceso. Muestre cada proceso en un diagrama PV : (a) una compresión isobárica en la que el volumen final es la mitad del volumen inicial (b) una compresión isotérmica en la que la presión final es cuatro veces la presión inicial (c) un proceso isovolumétrico en la cual la presión final es tres veces la presión inicial 53. Un calorímetro de flujo es un aparato que se usa para medir el calor

específico de un líquido. La técnica de calorimetría de flujo consiste en medir la diferencia de temperatura entre los puntos de entrada y salida de una corriente de líquido que fluye mientras se agrega energía mediante calor a una velocidad conocida. Un líquido de densidad  $\rho$  fluye a través del calorímetro con caudal volumétrico  $R$ . En estado estacionario, se establece una diferencia de temperatura  $T$  entre los puntos de entrada y salida cuando se suministra energía a un caudal . ¿Cuál es el calor específico del líquido?

54. Problema de repaso. Continúe con el análisis del Problema 52 en el Capítulo 19. Despues de una colisión entre una gran nave espacial y un asteroide, un disco de cobre de 28,0 m de radio y

de 1,20 m de espesor, a una temperatura de 850°C, está flotando en el espacio, girando alrededor de su eje con una rapidez angular de 25,0 rad/s. A medida que el disco irradia luz infrarroja, su temperatura cae a 20,0°C. Ningún par externo actúa sobre el disco. (a) Encuentre el cambio en la energía cinética del disco. (b) Encuentre el cambio en la energía interna del disco. (c) Encuentre la cantidad de energía que irradia.

55. Problema de repaso. Un meteorito de 670 kg está compuesto de aluminio. Cuando está lejos de la Tierra, su temperatura es de 15 °C y se mueve con una velocidad de 14,0 km/s con respecto al planeta. A medida que choca contra la Tierra, suponga que la energía interna adicional resultante se comparte por igual entre el meteorito y el planeta y que todo el material del meteorito se eleva momentáneamente hasta la misma temperatura final. Encuentre esta temperatura. Suponga que el calor específico del aluminio líquido y gaseoso es de 1 170 J/kg °C.
56. El agua en una tetera eléctrica está hirviendo. La potencia absorbida por el agua es de 1,00 kW. Suponiendo que la presión de vapor en la tetera es igual a la presión atmosférica, determine la velocidad de efusión de vapor del pico de la tetera si el pico tiene un área de sección transversal de 2,00 cm<sup>2</sup>.
57. Una cocina solar consta de una superficie reflectora curva que concentra la luz solar sobre el objeto que se va a calentar (figura P20.57). La energía solar por unidad de área que llega a la superficie de la Tierra en el lugar es de 600 W/m<sup>2</sup>. La cocina está orientada hacia el Sol y tiene un diámetro de cara de 0,600 m. Suponga que el 40,0% de la energía incidente se transfiere a 0,500 L de agua en un recipiente abierto, inicialmente a 20,0 °C. ¿En qué intervalo de tiempo el agua se evapora por completo? (Ignore la capacidad calorífica del recipiente).



Figura P20.57

58. (a) En el aire a 0 °C, un bloque de cobre de 1,60 kg a 0 °C se desliza a 2,50 m/s sobre una capa de hielo a 0 °C. La fricción lleva el bloque al reposo. Encuentra la masa del hielo que se derrite. Para describir el proceso de desaceleración, identifique la entrada  $Q$ ,  $E_{int}$ , de energía  $W$ , el cambio en la entrada de energía interna y el cambio en la energía mecánica  $K$  para el bloque y también para el hielo. (b) Un bloque de hielo de 1,60 kg a 0 °C se desliza a 2,50 m/s sobre una lámina de cobre a 0 °C. La fricción lleva el bloque al reposo. Encuentra la masa del hielo que se derrite. Identifique  $Q$ ,  $W$ ,  $E_{int}$  y  $K$  para el bloque y para la hoja de metal durante el proceso. (c) Una losa delgada de cobre de 1.60 kg a 20 °C se desliza a 2.50 m/s sobre una losa estacionaria idéntica a la misma temperatura. La fricción detiene rápidamente el movimiento. Suponiendo que no se pierde energía en el medio ambiente por el calor, encuentre el cambio de temperatura de ambos objetos. Identifique  $Q$ ,  $W$ ,  $E_{int}$  y  $K$  para cada objeto durante el proceso.

59. Un recipiente para cocinar en un quemador lento contiene 10.0 kg de agua y una masa desconocida de hielo en equilibrio a 0°C. La temperatura de la mezcla se mide en el tiempo t en varios tiempos, y el resultado se representa en la figura P20.59. Durante los primeros 50,0 minutos, la mezcla permanece a 0°C. De 50.0 min a 60.0 min, la temperatura aumenta a 2.00°C. Ignorando la capacidad calorífica del recipiente, determine la masa inicial del hielo.

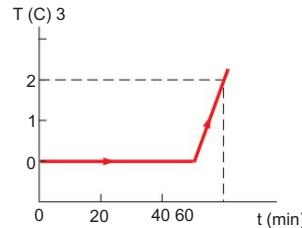


Figura P20.59

60. Un estanque de agua a 0°C se cubre con una capa de hielo de 4,00 cm de espesor. Si la temperatura del aire permanece constante a 10,0 °C, ¿qué intervalo de tiempo se requiere para que el espesor del hielo aumente a 8,00 cm? Sugerencia: Use la Ecuación 20.16 en la forma

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{\phi T}{x}$$

y tenga en cuenta que la energía incremental  $dQ$  extraída del agua a través del espesor  $x$  de hielo es la cantidad requerida para congelar un espesor  $dx$  de hielo. Es decir,  $dQ = LrA dx$ , donde  $r$  es la densidad del hielo,  $A$  es el área y  $L$  es el calor latente de fusión.

61. La conductividad térmica promedio de las paredes (incluidas las ventanas) y el techo de la casa que se muestra en la figura P20.61 es de 0,480 W/m °C y su espesor promedio es de 21,0 cm. La casa se mantiene caliente con gas natural que tiene un calor de combustión (es decir, la energía aportada por metro cúbico de gas quemado) de 9 300 kcal/m<sup>3</sup>. ¿Cuántos metros cúbicos de gas deben quemarse cada día para mantener una temperatura interior de 25,0 °C si la temperatura exterior es de 0,0 °C? Desprecie la radiación y la energía perdida por el calor a través del suelo.

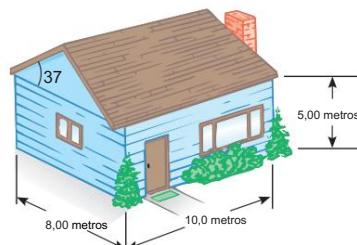


Figura P20.61

62. El interior de un cilindro hueco se mantiene a una temperatura  $T_a$  mientras que el exterior está a una temperatura más baja,  $T_b$  (figura P20.62). La pared del cilindro tiene una conductividad térmica  $k$ . Ignorando los efectos finales, demuestre que la tasa de conducción de energía desde la superficie interna a la externa en la dirección radial es

$$\frac{dQ}{dt} = 2\pi Lk \frac{T_a - T_b}{\ln(r_2/r_1)}$$

Sugerencias: El gradiente de temperatura es  $dT/dr$ . Observe que una corriente de energía radial pasa a través de un cilindro concéntrico de área  $2\pi rL$ .

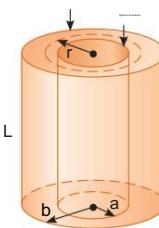


Figura P20.62

63. La sección de pasajeros de un avión de pasajeros tiene la forma de un tubo cilíndrico con una longitud de 35,0 m y un radio interior de 2,50 m. Sus paredes están revestidas con un material aislante de 6,00 cm de espesor y con una conductividad térmica de 4,00 105 cal/s cm °C. Un calefactor debe mantener la temperatura interior a 25,0 °C mientras que la temperatura exterior es de 35,0 °C. ¿Qué potencia debe suministrarse al calentador? (Puede usar el resultado del problema 62).

64. Un estudiante mide los siguientes datos en un experimento de calorimetría diseñado para determinar el calor específico del aluminio:

Temperatura inicial del agua y calorímetro:	70°C
Masa de agua:	0,400 kg
Masa del calorímetro:	0,040 kg
Calor específico del calorímetro:	0,63 kJ/kg °C 27
Temperatura inicial del aluminio:	°C
Masa de aluminio:	0,200 kg
Temperatura final de la mezcla:	66,3°C

Utilice estos datos para determinar el calor específico del aluminio. Explique si su resultado está dentro del 15 % del valor que figura en la tabla 20.1.

65. Una capa esférica tiene un radio interior de 3,00 cm y un radio exterior de 7,00 cm. Está hecho de material con conductividad térmica  $k = 0.800 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ . El interior se mantiene a una temperatura de 5°C y el exterior a 40°C. Despues de un intervalo de tiempo, la capa alcanza un estado estacionario con la temperatura en cada punto dentro de ella permaneciendo constante en el tiempo. (a) Explique por qué la tasa de transferencia de energía debe ser la misma a través de cada superficie esférica, de radio  $r$ , dentro del cascarón y debe satisfacer

$$\frac{dT}{dr} = \frac{4\pi k r^2}{4\pi k r^2} = \frac{1}{r^2}$$

- (b) A continuación, demuestre que



- (c) Encuentre la tasa de transferencia de energía a través de la capa.  
(d) Demostrar que

$$\frac{dT}{dr} = \frac{11,84 m^2 \# ^\circ\text{C}^2}{r^2 dr} = \frac{11,84 m^2 \# ^\circ\text{C}^2}{(3cm)^2 dr}$$

- (e) Encuentre la temperatura dentro del caparazón en función del radio.  
 (f) Encuentre la temperatura en  $r = 5.00 \text{ cm}$ , a la mitad del caparazón.

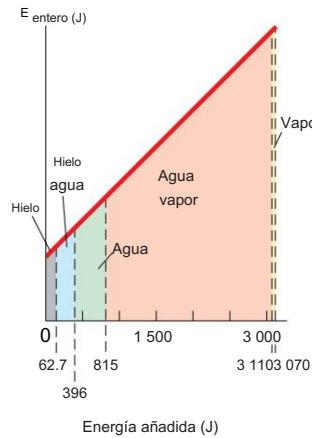
66. Durante los períodos de alta actividad, el Sol tiene más manchas solares de lo habitual. Las manchas solares son más frías que el resto de la capa luminosa de la atmósfera del Sol (la fotosfera). Paradójicamente, la producción de energía total del Sol activo no es inferior a la media, sino igual o ligeramente superior a la media. Resuelva los detalles del siguiente modelo crudo de este fenómeno. Considere un parche de la fotosfera con un área de  $5.10 \times 10^4 \text{ m}^2$ . su emisividad

es 0.965. (a) Encuentre la potencia que irradia si su temperatura es uniformemente de 5 800 K, correspondiente al Sol en reposo. (b) Para representar una mancha solar, suponga que el 10,0 % del área del parche está a 4 800 K y el otro 90,0 % está a 5 890 K. Es decir, una sección con el área de la superficie de la Tierra es 1 000 K más fría que antes y una sección nueve veces más grande es 90 K más caliente. Encuentre la temperatura promedio del parche. Indique cómo se compara con 5 800 K. (c) Halle la potencia de salida del parche. Indique cómo se compara con la respuesta a la parte (a). (El próximo máximo de manchas solares se espera alrededor del año 2012).

## Respuestas a cuestionarios rápidos

20.1 (i) Agua, vidrio, hierro. Debido a que el agua tiene el calor específico más alto ( $4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ), tiene el cambio de temperatura más pequeño. Le sigue el vidrio ( $837 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ) y el hierro el último ( $448 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ). (ii) Hierro, vidrio, agua. Para un aumento de temperatura dado, la transferencia de energía por calor es proporcional al calor específico.

20.2 La figura muestra una representación gráfica de la energía interna del hielo en función de la energía añadida. Observe que este gráfico se ve muy diferente de la figura 20.2 en que no tiene partes planas durante los cambios de fase. Independientemente de cómo varíe la temperatura en la figura 20.2, la energía interna del sistema simplemente aumenta linealmente con la entrada de energía.



### 20.3

Situación	Sistema	Ein QW
(a) Bombeo rápido de aire en la llanta de una bicicleta	bomba	0
Recipiente con agua	Agua en el recipiente	0
(c) El aire se escapa rápidamente de un globo.	Aire originalmente en el globo	0

(a) Debido a que el bombeo es rápido, no entra ni sale energía del sistema por calor. Debido a que  $W = 0$  cuando se realiza trabajo en el sistema, aquí es positivo. Por lo tanto,  $E_{int} QW$  debe ser positivo. El aire en la bomba es más caliente. (b) El sistema no realiza ningún trabajo, pero la energía se transfiere al agua por el calor del quemador caliente, lo que hace que tanto  $Q$  como  $E_{int}$  sean positivos. (c) Nuevamente, no hay transferencias de energía hacia adentro o hacia afuera del sistema por medio del calor, pero las moléculas de aire que escapan del globo realizan un trabajo sobre las moléculas de aire circundantes a medida que las empujan fuera del camino. Por lo tanto,  $W$  es negativo y  $E_{int}$  es negativo. La disminución de la energía interna es evidente porque el aire que escapa se enfriá.

20.4 El camino A es isovolumétrico, el camino B es adiabático, el camino C es isotérmico y el camino D es isobárico.

20.5 (b). Paralelamente, las varillas presentan una mayor área a través que la energía puede transferir y una longitud menor.



Los perros no tienen glándulas sudoríparas como los humanos. Cuando hace calor, un perro jadea para promover la evaporación de la lengua. En este capítulo mostramos que la evaporación es un proceso de enfriamiento basado en la eliminación de moléculas con alta energía cinética de un líquido. (Frank Oberle/Getty Images)

- 21.1 Modelo molecular de un gas ideal
- 21.2 Calor específico molar de un gas ideal
- 21.3 Procesos adiabáticos para un gas ideal
- 21.4 Equipartición de energía 21.5
- Distribución de velocidades moleculares

# 21 La teoría cinética de los gases

En el capítulo 19 analizamos las propiedades de un gas ideal mediante el uso de variables macroscópicas como la presión, el volumen y la temperatura. Estas propiedades a gran escala se pueden relacionar con una descripción a escala microscópica, donde la materia se trata como una colección de moléculas. La aplicación de las leyes del movimiento de Newton de manera estadística a un conjunto de partículas proporciona una descripción razonable de los procesos termodinámicos. Para mantener las matemáticas relativamente simples, consideraremos principalmente el comportamiento de los gases porque en los gases las interacciones entre las moléculas son mucho más débiles que en los líquidos o sólidos.

## 21.1 Modelo molecular de un gas ideal

Comenzamos este capítulo desarrollando un modelo microscópico de un gas ideal, llamado teoría cinética. Al desarrollar este modelo, hacemos las siguientes suposiciones:

1. La cantidad de moléculas en el gas es grande y la separación promedio entre ellas es grande en comparación con sus dimensiones. En otras palabras, las moléculas ocupan un volumen despreciable en el recipiente. Eso es consistente con el modelo de gas ideal, en el que modelamos las moléculas como partículas.
2. Las moléculas obedecen las leyes de movimiento de Newton, pero en conjunto se mueven al azar. Por "al azar" queremos decir que cualquier molécula puede moverse en cualquier dirección con cualquier velocidad.

Supuestos del modelo molecular de un gas ideal

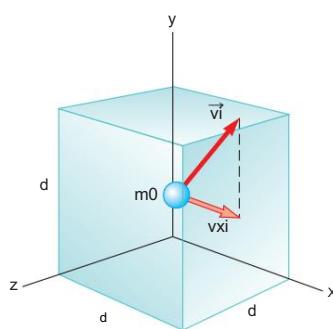


Figura 21.1 Una caja cúbica con lados de longitud  $d$  que contiene un gas ideal. La molécula mostrada se mueve con velocidad  $v_i$

3. Las moléculas interactúan solo por fuerzas de corto alcance durante las colisiones elásticas. Eso es consistente con el modelo de gas ideal, en el que las moléculas no ejercen fuerzas de largo alcance entre sí.
4. Las moléculas chocan elásticamente con las paredes. Estas colisiones conducen a la presión macroscópica sobre las paredes del recipiente.
5. El gas en cuestión es una sustancia pura; es decir, todas las moléculas son idénticas.

Aunque a menudo imaginamos un gas ideal como compuesto de átomos individuales, el comportamiento de los gases moleculares se aproxima bastante bien al de los gases ideales a bajas presiones. Por lo general, las rotaciones o vibraciones moleculares no tienen efecto sobre los movimientos considerados aquí.

Para nuestra primera aplicación de la teoría cinética, obtengamos una expresión para la presión de  $N$  moléculas de un gas ideal en un recipiente de volumen  $V$  en términos de cantidades microscópicas. El recipiente es un cubo con aristas de longitud  $d$  (figura 21.1).

Primero centraremos nuestra atención en una de estas moléculas de masa  $m_0$  y supondremos que se mueve de modo que su componente de velocidad en la dirección  $x$  es  $v_{xi}$  como en la figura activa 21.2. (El subíndice  $i$  aquí se refiere a la  $i$ -ésima molécula, no a un valor inicial).

En breve combinaremos los efectos de todas las moléculas). Cuando la molécula choca elásticamente con cualquier pared (suposición 4), su componente de velocidad perpendicular a la pared se invierte porque la masa de la pared es mucho mayor que la masa de la molécula. Como la componente de cantidad de movimiento  $p_{xi}$  de la molécula es  $m_0 v_{xi}$  antes de la colisión y  $m_0 v_{xi}$  después de la colisión, el cambio en la componente  $x$  de la cantidad de movimiento de la molécula es

$$\Delta p_{xi} = m_0 v_{xi} - m_0 v_{xi} = 2m_0 v_{xi}$$

Como las moléculas obedecen las leyes de Newton (suposición 2), podemos aplicar el teorema del impulso-cantidad de movimiento (ecuación 9.8) a la molécula para dar

$$F_{xi} \Delta t = 2m_0 v_{xi}$$

dónde  $F_{xi}$  en la molécula es la componente  $x$  de la fuerza<sup>1</sup> promedio que la pared ejerce sobre la molécula durante la colisión y  $\Delta t$  es la duración de la colisión. Para que la molécula haga otra colisión con la misma pared después de esta primera colisión, debe viajar una distancia de  $2d$  en la dirección  $x$  (a través del recipiente y de regreso).

Por lo tanto, el intervalo de tiempo entre dos colisiones con la misma pared es

$$\Delta t = \frac{2d}{v_{xi}}$$

La fuerza que provoca el cambio de cantidad de movimiento de la molécula en la colisión con la pared se produce únicamente durante la colisión. Sin embargo, podemos promediar la fuerza durante el intervalo de tiempo para que la molécula se mueva a través del cubo y regrese. En algún momento durante este intervalo de tiempo ocurre la colisión, por lo que el cambio en la cantidad de movimiento para este intervalo de tiempo es el mismo que para la corta duración de la colisión.

Por lo tanto, podemos reescribir el teorema impulso-cantidad de movimiento como

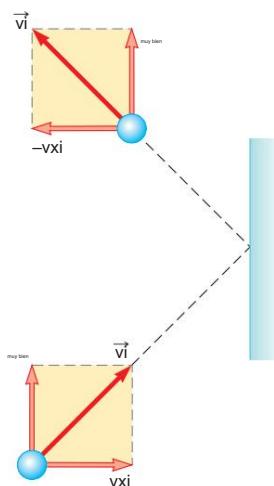
$$F_{xi} \Delta t = 2m_0 v_{xi}$$

donde es<sup>o</sup>el componente de fuerza promedio durante el intervalo de tiempo para que la molécula se mueva a través del cubo y regrese. Debido a que ocurre exactamente una colisión para cada intervalo de tiempo, este resultado también es la fuerza promedio a largo plazo sobre la molécula durante largos intervalos de tiempo que contienen cualquier número de múltiplos de  $\Delta t$ .

Esta ecuación y la anterior nos permiten expresar la componente  $x$  de la fuerza promedio a largo plazo ejercida por la pared sobre la molécula como

$$F_{xi} = \frac{2m_0 v_{xi}}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_{xi}^2}{2d} = \frac{2m_0 v_{xi}}{d}$$

<sup>1</sup> Para esta discusión, usamos una barra sobre una variable para representar el valor promedio de la variable, como la fuerza promedio,  $\bar{F}_{xi}$  en lugar del subíndice "avg" que hemos usado antes. Esta notación es para ahorrar confusión porque ya tenemos una serie de subíndices en las variables.



### FIGURA ACTIVA 21.2

Una molécula choca elásticamente con la pared del recipiente. Su componente  $x$  del impulso se invierte, mientras que su componente  $y$  permanece sin cambios. En esta construcción, suponemos que la molécula se mueve en el plano  $xy$ .

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) e ir a ThomsonNOW para observar las moléculas dentro de un contenedor haciendo colisiones con las paredes del contenedor y entre sí.

Ahora, por la tercera ley de Newton, la componente  $x$  de la fuerza promedio a largo plazo ejercida por la molécula sobre la pared es igual en magnitud y opuesta en dirección:

$$\overline{F_i} = \frac{2}{a m_0 v d} \frac{m_0 v_x}{d}$$

La fuerza promedio total ejercida por el gas sobre la pared se encuentra sumando las fuerzas promedio ejercidas por las moléculas individuales. Agregar términos como el anterior para todas las moléculas da

$$\overline{F_a} = \frac{2 m_0 v_x}{d} \frac{m_0}{d} \frac{a}{a_{i1}} \overline{v_{xi}}$$

donde hemos factorizado la longitud de la caja y la masa  $m_0$  porque la suposición 5 nos dice que todas las moléculas son iguales. Ahora imponemos la suposición 1, que el número de moléculas es grande. Para un pequeño número de moléculas, la fuerza real sobre la pared variaría con el tiempo. Sería distinto de cero durante el breve intervalo de una colisión de una molécula con la pared y cero cuando ninguna molécula golpea la pared. Sin embargo, para un número muy grande de moléculas como el número de Avogadro, estas variaciones en la fuerza se suavizan de modo que la fuerza promedio dada arriba es la misma en cualquier intervalo de tiempo. Por lo tanto, la fuerza constante  $F$  sobre la pared debido a las colisiones moleculares es

$$F = \frac{m_0}{d} \frac{norte}{a_{i1}} \overline{v_{xi}}$$

Para continuar, consideremos cómo expresar el valor promedio del cuadrado de la componente  $x$  de la velocidad para  $N$  moléculas. El promedio tradicional de un conjunto de valores es la suma de los valores sobre el número de valores:

$$\overline{\frac{1}{2} v_x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{xi}^2$$

El numerador de esta expresión está contenido en el lado derecho de la ecuación anterior. Por lo tanto, al combinar las dos expresiones, la fuerza total sobre la pared se puede escribir

$$F = \frac{m_0}{d} \sqrt{\overline{v_x^2}} \quad (21.1)$$

Ahora centrémonos nuevamente en una molécula con componentes de velocidad  $v_{xi}$ ,  $v_{yi}$  y  $v_{zi}$ . El teorema de Pitágoras relaciona el cuadrado de la velocidad de la molécula con los cuadrados de las componentes de la velocidad:

$$\overline{v^2} = \overline{v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2}$$

Por lo tanto, el valor promedio de  $\overline{v^2}$  para todas las moléculas en el recipiente está relacionado con  $\overline{v^2}$  los valores promedio de  $\overline{v_{xi}^2}$ ,  $\overline{v_{yi}^2}$  y  $\overline{v_{zi}^2}$  según la expresión

$$\overline{v^2} = \overline{v_{xi}^2} + \overline{v_{yi}^2} + \overline{v_{zi}^2}$$

Debido a que el movimiento es completamente aleatorio (suposición 2), los valores promedio  $\overline{v_{xi}^2}$ ,  $\overline{v_{yi}^2}$  y  $\overline{v_{zi}^2}$  son iguales entre sí. Usando este hecho y la ecuación anterior, encontramos que

$$\overline{v^2} = 3 \overline{v_{xi}^2}$$

Por lo tanto, de la Ecuación 21.1, la fuerza total ejercida sobre la pared es

$$F = \frac{1}{3N} \frac{2 m_0 v}{d}$$

Usando esta expresión, podemos encontrar la presión total ejercida sobre la pared:

$$\frac{F}{A} = \frac{F}{\text{m}^2} \cdot \frac{\frac{2 m_0 v}{\text{dias}}}{\frac{1}{3} N^3 \text{ dias}} = \frac{1}{3 N b} \frac{m_0 v}{\text{m}^2}$$

Relación entre la presión  
y la energía cinética  
molecular

$$\frac{F}{A} = \frac{\frac{2}{3} N b m_0 v^2}{11.2 m_0 v} \quad (21.2)$$

Este resultado indica que la presión de un gas es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y a la energía cinética de traslación promedio de las moléculas. Al analizar este modelo simplificado de un gas ideal, obtenemos un resultado importante que relaciona la cantidad macroscópica de presión a una cantidad microscópica, el valor medio del cuadrado de la velocidad molecular. Por lo tanto, se ha establecido un vínculo clave entre el mundo molecular y el mundo a gran escala.

Observe que la ecuación 21.2 verifica algunas características de la presión con las que probablemente esté familiarizado. Una forma de aumentar la presión dentro de un recipiente es aumentar el número de moléculas por unidad de volumen  $N/V$  en el recipiente. Eso es lo que haces cuando agregas aire a un neumático. La presión en el neumático también se puede aumentar aumentando la energía cinética de traslación promedio de las moléculas de aire en el neumático. Eso se puede lograr aumentando la temperatura de ese aire, razón por la cual la presión dentro de una llanta aumenta a medida que la llanta se calienta durante los viajes largos por carretera. La flexión continua de la llanta a medida que se mueve a lo largo de la superficie de la carretera da como resultado un trabajo sobre el caucho a medida que se distorsionan partes del neumático, lo que provoca un aumento en la energía interna del caucho. El aumento de la temperatura del caucho da como resultado la transferencia de energía por calor al aire dentro del neumático. Esta transferencia aumenta la temperatura del aire, y este aumento de temperatura produce a su vez un aumento de la presión.

Interpretación molecular de la temperatura Podemos comprender mejor el significado de la temperatura escribiendo primero la ecuación 21.2 en la forma

$$\frac{2}{3} N \frac{1}{12} \frac{m_0 v^2}{2}$$

Comparemos ahora esta expresión con la ecuación de estado de un gas ideal (ecuación 19.10):

$$PV = NkT$$

Recuerde que la ecuación de estado se basa en hechos experimentales relacionados con el comportamiento macroscópico de los gases. Igualando los lados derechos de estas expresiones se obtiene

$$T = \frac{2}{1} \frac{N}{3k} \frac{m_0 v^2}{2} \quad (21.3)$$

La temperatura  
es proporcional a la energía  
cinética promedio.

Este resultado nos dice que la temperatura es una medida directa de la energía cinética molecular promedio. Reorganizando la ecuación 21.3, podemos relacionar la energía cinética molecular de traslación con la temperatura:

$$\frac{1}{2} \frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} k T \quad (21.4)$$

Energía cinética media por  
molécula

Es decir, la energía cinética de traslación promedio por molécula es se sigue que  $\frac{3}{2} k T$  Porque

$$\frac{1}{2} \frac{m_0 v_x^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{m_0 v_y^2}{2} + \frac{1}{2} \frac{m_0 v_z^2}{2} = \frac{3}{2} k T \quad (21.5)$$

De manera similar, para las direcciones y y z ,

$$\frac{1}{2} \frac{m_0 v_y^2}{2} = \frac{1}{2} k T \quad y \quad \frac{1}{2} \frac{m_0 v_z^2}{2} = \frac{1}{2} k T$$

Por lo tanto, cada grado de libertad de traslación contribuye con la misma cantidad de al gas. (En 1 energía,  $\frac{1}{2} k T$  , general, un "grado de libertad" se refiere a una independencia

## TABLA 21.1

Algunas velocidades de raíz cuadrada media (rms)

Gas	Masa molar (g/mol)	vrms a 20°C (m/s)	Gas	Masa molar (g/mol)	vrms a 20°C (m/s)
H <sub>2</sub>	2.02	1902	NO	30.0	494
ÉI	4.00	1352	O <sub>2</sub>	32.0	478
H <sub>2</sub> O	18.0	637	CO <sub>2</sub>	44.0	408
Nordense	20.2	602	SO <sub>2</sub>	64.1	338
N <sub>2</sub> o CO	28.0	511			

dent significa por el cual una molécula puede poseer energía.) Una generalización de este resultado, conocida como el teorema de equipartición de energía, es como sigue:

Cada grado de libertad contribuye a la energía  $\frac{1}{2}NkT$  de un sistema, donde los posibles grados de libertad de  $2kBT$  son aquellos asociados con la translación, rotación y vibración de las moléculas.

Teorema de equipartición de energía

La energía cinética de translación total de N moléculas de gas es simplemente N veces la energía promedio por molécula, que viene dada por la Ecuación 21.4:

$$K_{\text{tot trans}} = N \frac{1}{2} \frac{1}{2m_0v^2} \frac{3}{2} NkT = \frac{3}{2} nRT \quad (21.6)$$

donde hemos usado  $kB R/N_A$  para la constante de Boltzmann y  $n N/N_A$  para el número de moles de gas. Si las moléculas de gas poseen solo energía cinética de translación, la ecuación 21.6 representa la energía interna del gas. Este resultado implica que la energía interna de un gas ideal depende únicamente de la temperatura. Daremos seguimiento a este punto en la Sección 21.2.

Energía cinética de translación total de N moléculas

La raíz cuadrada de se denomina raíz cuadrada media (rms) de la velocidad de las moléculas. De la ecuación 21.4, encontramos que la velocidad rms es

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{2v}{2B} \frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{B}{2} \frac{3RT}{m_0}} \quad (21.7)$$

Velocidad de la raíz cuadrada media

donde M es la masa molar en kilogramos por mol y es igual a  $m_0 N_A$ . Esta expresión muestra que, a una temperatura dada, las moléculas más ligeras se mueven más rápido, en promedio, que las moléculas más pesadas. Por ejemplo, a una temperatura dada, las moléculas de hidrógeno, cuya masa molar es 2,02 10<sup>-3</sup> kg/mol, tienen una velocidad promedio aproximadamente cuatro veces mayor que las moléculas de oxígeno, cuya masa molar es 32,0 10<sup>-3</sup> kg/mol. La tabla 21.1 enumera las velocidades rms para varias moléculas a 20 °C.

## PREVENCIÓN DE ERRORES 21.1

¿La raíz cuadrada del cuadrado?

Sacar la raíz cuadrada de no "deshace" el cuadrado porque hemos sacado un promedio entre elevar al cuadrado y sacar la raíz cuadrada. Aunque la raíz cuadrada de  $1v^2$  se realiza después del promedio, la raíz cuadrada de no es  $vavg$ , sino  $v_{\text{rms}}$ .

**Pregunta rápida 21.1** Dos recipientes contienen un gas ideal a la misma temperatura y presión. Ambos recipientes contienen el mismo tipo de gas, pero el recipiente B tiene el doble del volumen del recipiente A. (i) ¿Cuál es la energía cinética de translación promedio por molécula en el recipiente B? (a) el doble de la del recipiente A (b) la misma que la del recipiente A (c) la mitad de la del recipiente A (d) imposible de determinar (ii) A partir de las mismas opciones, describa la energía interna del gas en el recipiente B.

## EJEMPLO 21.1

Un tanque de helio

Un tanque usado para llenar globos de helio tiene un volumen de 0.300 m<sup>3</sup> y contiene 2.00 mol de gas helio a 20.0 °C. Suponga que el helio se comporta como un gas ideal.

(A) ¿Cuál es la energía cinética de translación total de las moléculas de gas?

## SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine un modelo microscópico de un gas en el que pueda ver cómo las moléculas se mueven por el recipiente más rápidamente a medida que aumenta la temperatura.

Categorizar Evaluamos parámetros con ecuaciones desarrolladas en la discusión anterior, por lo que este ejemplo es un problema de sustitución.

Use la Ecuación 21.6 con n 2.00 mol y T 293 K:

$$K_{\text{tot trans}} = \frac{3}{2} nRT = \frac{3}{2} 12,00 \text{ mol}^2 18,31 \text{ J/mol K} 293 \text{ K}$$

7,30 103 J

(B) ¿Cuál es la energía cinética promedio por molécula?

## SOLUCIÓN

Use la Ecuación 21.4:

$$\bar{T} = \frac{3}{2} \frac{k_B T}{m} = \frac{3}{2} 11.38 \text{ J/K} 293 \text{ K}$$

6,07 1021 J

**¿Y si?** ¿Qué pasa si la temperatura se eleva de 20,0°C a 40,0°C? Como 40,0 es el doble de 20,0, ¿la energía de traslación total de las moléculas del gas es el doble a la temperatura más alta?

Respuesta La expresión de la energía de traslación total depende de la temperatura, y el valor de la temperatura debe expresarse en kelvin, no en grados Celsius. Por lo tanto, la proporción de 40,0 a 20,0 no es la proporción adecuada. Convirtiendo las temperaturas Celsius a Kelvin, 20,0 °C son 293 K y 40,0 °C son 313 K. Por lo tanto, la energía de traslación total aumenta por un factor de solo 313 K/293 K 1,07.

## 21.2 Calor específico molar de un gas ideal

Considere un gas ideal que pasa por varios procesos tales que el cambio de temperatura es  $T_f - T_i$  para todos los procesos. El cambio de temperatura se puede lograr tomando una variedad de caminos de una isotermia a otra, como se muestra en la Figura 21.3. Como  $T$  es el mismo para cada camino, el cambio en la energía interna  $\Delta E_{\text{int}}$  es el mismo para todos los caminos. El trabajo  $W$  realizado sobre el gas (el negativo del área bajo las curvas) es diferente para cada trayectoria. Por lo tanto, según la primera ley de la termodinámica, el calor asociado con un cambio de temperatura dado no tiene un valor único, como se analiza en la Sección 20.4.

Podemos abordar esta dificultad definiendo calores específicos para dos procesos especiales: isovolumétrico e isobárico. Debido a que el número de moles es una medida conveniente de la cantidad de gas, definimos los calores específicos molares asociados con estos procesos de la siguiente manera:

$$Q = nCV \cancel{\frac{\partial T}{\partial V}} \text{ volumen constante} \quad (21.8)$$

$$Q = nCP \cancel{\frac{\partial T}{\partial P}} \text{ presión constante} \quad (21.9)$$

donde  $CV$  es el calor específico molar a volumen constante y  $CP$  es el calor específico molar a presión constante. Cuando se agrega energía a un gas mediante calor a presión constante, no solo aumenta la energía interna del gas, sino que también se realiza un trabajo (negativo) sobre el gas debido al cambio de volumen. Por lo tanto, el calor  $Q$  de la ecuación 21.9 debe tener en cuenta tanto el aumento de energía interna como la transferencia de energía fuera del sistema mediante trabajo. Por esta razón,  $Q$  es mayor en la Ecuación 21.9 que en la Ecuación 21.8 para valores dados de  $n$  y  $T$ . Por lo tanto,  $CP$  es mayor que  $CV$ .

En la sección anterior, encontramos que la temperatura de un gas es una medida de la energía cinética de traslación promedio de las moléculas del gas. Esta energía cinética está asociada con el movimiento del centro de masa de cada molécula. No incluye la energía asociada con el movimiento interno de la molécula, es decir,

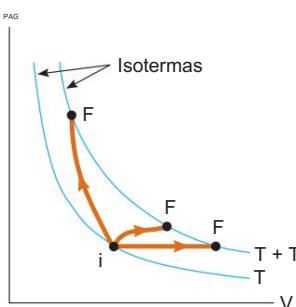


Figura 21.3 Un gas ideal se lleva de una isotermia a temperatura  $T$  a otra a temperatura  $T'$  a lo largo de tres caminos diferentes.

vibraciones y rotaciones alrededor del centro de masa. Eso no debería sorprender porque el modelo de teoría cinética simple asume una molécula sin estructura.

Entonces, primero consideremos el caso más simple de un gas monoatómico ideal, es decir, un gas que contiene un átomo por molécula, como el helio, el neón o el argón. Cuando se agrega energía a un gas monoatómico en un recipiente de volumen fijo, toda la energía añadida se destina a aumentar la energía cinética de traslación de los átomos. No hay otra forma de almacenar la energía en un gas monoatómico. Por lo tanto, de la Ecuación 21.6, vemos que la energía interna  $E_{int}$  de  $N$  moléculas ( $n$  mol) de un gas monoatómico ideal es

$$E_{int} = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} n R T \quad (21.10)$$

Energía interna de un gas monoatómico ideal

Para un gas ideal monoatómico,  $E_{int}$  es una función de  $T$  solamente y la relación funcional está dada por la Ecuación 21.10. En general, la energía interna de cualquier gas ideal es función únicamente de  $T$  y la relación exacta depende del tipo de gas.

Si la energía se transfiere mediante calor a un sistema a volumen constante, no se realiza trabajo sobre el sistema. Es decir,  $W = 0$  para un proceso a volumen constante. Por lo tanto, de la primera ley de la termodinámica,

$$Q = \Delta E_{int} \quad (21.11)$$

En otras palabras, toda la energía transferida por el calor se destina a aumentar la energía interna del sistema. En la figura activa 21.4 se describe un proceso a volumen constante de  $i$  a  $f$  para un gas ideal, donde  $T$  es la diferencia de temperatura entre las dos isotermas. Sustituyendo la expresión de  $Q$  dada por la Ecuación 21.8 en la Ecuación 21.11, obtenemos

$$\Delta E_{int} = n C_V \Delta T \quad (21.12)$$

Si el calor específico molar es constante, podemos expresar la energía interna de un gas como

$$E_{int} = n C_V T$$

Esta ecuación se aplica a todos los gases ideales, los gases que tienen más de un átomo por molécula, así como los gases ideales monoatómicos. En el límite de cambios infinitesimales, podemos usar la ecuación 21.12 para expresar el calor específico molar a volumen constante como

$$C_V = \frac{1}{n} \left( \frac{dE_{int}}{dT} \right) \quad (21.13)$$

Aplicaremos ahora los resultados de esta discusión a un gas monoatómico. Sustituyendo la energía interna de la Ecuación 21.10 a la Ecuación 21.13 da

$$C_V = \frac{3}{2} R \quad (21.14)$$

Esta expresión predice un valor de  $C_V$  para todos los gases monoatómicos. Esta predicción está en excelente acuerdo con los valores medidos de calores específicos molares para gases como helio, neón, argón y xenón en un amplio rango de temperaturas (Tabla 21.2, página 594). Las pequeñas variaciones en la tabla 21.2 de los valores pronosticados se deben a que los gases reales no son gases ideales. En los gases reales, ocurren interacciones intermoleculares débiles, que no se abordan en nuestro modelo de gas ideal.

Ahora suponga que el gas se lleva a lo largo de la trayectoria de presión constante  $i$  a  $f$  que se muestra en la figura activa 21.4. A lo largo de este camino, la temperatura vuelve a aumentar en  $T$ . La energía que debe transferirse por calor al gas en este proceso es  $Q = n C_P \Delta T$ .

Debido a que el volumen cambia en este proceso, el trabajo realizado sobre el gas es  $W = P \Delta V$ , donde  $P$  es la presión constante a la que se produce el proceso. Aplicando la primera ley de la termodinámica a este proceso, tenemos

$$\Delta E_{int} = Q - W = n C_P \Delta T - P \Delta V \quad (21.15)$$

En este caso, la energía añadida al gas por el calor se canaliza de la siguiente manera. Parte sale del sistema por trabajo (es decir, el gas mueve un pistón a través de un desplazamiento), y el resto aparece como un aumento en la energía interna del gas. El

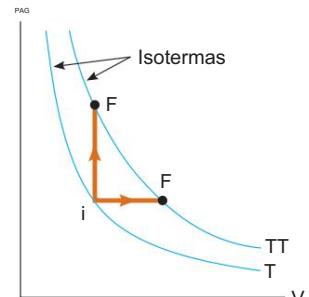


FIGURA ACTIVA 21.4

La energía se transfiere por calor a un gas ideal de dos maneras. Para la trayectoria de volumen constante  $i$  a  $f$ , toda la energía se destina a aumentar la energía interna del gas porque no se realiza trabajo. A lo largo de la trayectoria de presión constante  $i$  a  $f$ , parte de la energía transferida por calor se transfiere por trabajo.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para elegir las temperaturas inicial y final para un mol de un gas ideal sometido a procesos de volumen constante y presión constante y mida  $Q$ ,  $W$ ,  $E_{int}$ ,  $C_V$  y  $C_P$ .

TABLA 21.2

## Calores específicos molares de varios gases

Gas	Calor específico molar (J/mol K)a			
	PC	CV	curriculum vitae	g PC/CV
gases monoatómicos				
Él	20.8	12.5	8.33	1.67
Arkansas	20.8	12.5	8.33	1.67
Nordoste	20.8	12.7	8.12	1.64
kr	20.8	12.3	8.49	1.69
gases diatómicos				
H <sub>2</sub>	28.8	20.4	8.33	1.41
N <sub>2</sub>	29.1	20.8	8.33	1.40
O <sub>2</sub>	29.4	21.1	8.33	1.40
CO	29.3	21.0	8.33	1.40
Cl <sub>2</sub>	34.7	25.7	8.96	1.35
gases poliatómicos				
CO <sub>2</sub>	37.0	28.5	8.50	1.30
SO <sub>2</sub>	40.4	31.4	9.00	1.29
H <sub>2</sub> O	35.4	27.0	8.37	1.30
CH <sub>4</sub>	35.5	27.1	8.41	1.31

a Todos los valores excepto el del agua se obtuvieron a 300 K.

Sin embargo, el cambio en la energía interna para el proceso  $i \rightarrow f$ , es igual al del proceso  $S \rightarrow f$  porque  $E_{int}$  depende solo de la temperatura para un gas ideal y  $T$  es la misma para ambos procesos. Además, debido a que  $PV = nRT$ , tenga en cuenta que para un proceso de presión constante,  $PV = nR T$ . Sustituyendo este valor por  $PV$  en la ecuación 21.15 con  $E_{int} = nCV T$  (ecuación 21.12) da

$$\frac{nCV}{PC} \frac{\cancel{fT}}{CV} \frac{nCP}{\cancel{fT}} \frac{\cancel{nR}}{\cancel{fT}} \frac{\cancel{\cancel{fT}}}{R} \quad (21.16)$$

Esta expresión se aplica a cualquier gas ideal. Predice que el calor específico molar de un gas ideal a presión constante es mayor que el calor específico molar a volumen constante en una cantidad  $R$ , la constante universal de los gases (que tiene el valor de 8,31 J/mol K). Esta expresión es aplicable a gases reales como muestran los datos de la tabla 21.2.

Porque  $\frac{CV}{PC} = \frac{5}{2}$  para un gas ideal monoatómico, la ecuación 21.16 predice un valor  $2R$  para el calor específico molar de un gas monoatómico a presión constante. La relación de estos calores específicos molares es una cantidad adimensional  $g$  (letra griega gamma):

Relación de calores específicos molares para un gas ideal

monoatómico

$$g = \frac{PC}{CV} = \frac{\frac{5}{2}R}{\frac{3}{2}R} = \frac{5}{3} = 1.67 \quad (21.17)$$

Los valores teóricos de  $CV$ ,  $CP$  y  $g$  concuerdan excelentemente con los valores experimentales obtenidos para gases monoatómicos, pero están en serio desacuerdo con los valores de los gases más complejos (ver Tabla 21.2). Eso no es sorprendente; el valor  $CV = 2R$  se obtuvo para un gas ideal monoatómico, y esperamos alguna contribución adicional al calor específico molar de la estructura interna de las moléculas más complejas. En la sección 21.4 describimos el efecto de la estructura molecular sobre el calor específico molar de un gas. La energía interna —y, por tanto, el calor específico molar— de un gas complejo debe incluir las contribuciones de los movimientos de rotación y vibración de la molécula.

En el caso de sólidos y líquidos calentados a presión constante, se realiza muy poco trabajo porque la expansión térmica es pequeña. En consecuencia,  $C_P$  y  $C_V$  son aproximadamente iguales para sólidos y líquidos.

**Pregunta rápida 21.2** (i) ¿Cómo cambia la energía interna de un gas ideal cuando sigue la trayectoria  $S \rightarrow f$  en la figura activa 21.4? (a)  $E$  aumenta. (b)  $E$  permanece igual. (d) No  $E_{int}$  disminuye (c)  $M_i E_{int}$  hay suficiente información para determinar cómo cambia  $E_{int}$ . (ii) A partir de las mismas opciones, ¿cómo cambia la energía interna de un gas ideal cuando sigue la trayectoria  $f \rightarrow S$  a lo largo de la isotérmica etiquetada como  $T$  en la figura activa 21.4?

**EJEMPLO 21.2**

## Calentar un cilindro de helio

Un cilindro contiene 3.00 mol de gas helio a una temperatura de 300 K.

(A) Si el gas se calienta a volumen constante, ¿cuánta energía debe transferirse por calor al gas para que su temperatura aumente a 500 K?

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar Ejecute el proceso en su mente con la ayuda de la disposición pistón-cilindro de la figura 19.12.

Categorizar Debido a que el gas mantiene un volumen constante, el pistón de la figura 19.12 está bloqueado en su lugar. Evaluamos parámetros con ecuaciones desarrolladas en la discusión anterior, por lo que este ejemplo es un problema de sustitución.

Use la ecuación 21.8 para encontrar la transferencia de energía:

$$Q = nC_V \Delta T$$

Sustituye los valores dados:

$$P_1 = 13,00 \text{ mol} \cdot 2 \cdot 112,5 \text{ J/mol} \cdot \# K_2 = 1500 \text{ K} \quad K_1 = 300 \text{ K}$$

$$7.50 \text{ kJ}$$

(B) ¿ Cuánta energía debe transferirse por calor al gas a presión constante para elevar la temperatura a 500 K?

**SOLUCIÓN**

Categorizar Debido a que el gas mantiene una presión constante, el pistón de la figura 19.12 puede moverse libremente, por lo que el pistón se modela como una partícula en equilibrio.

Use la Ecuación 21.9 para encontrar la transferencia de energía:

$$Q = nC_P \Delta T$$

Sustituye los valores dados:

$$P_1 = 13,00 \text{ mol} \cdot 2 \cdot 120,8 \text{ J/mol} \cdot \# K_2 = 1500 \text{ K} \quad K_1 = 300 \text{ K}$$

$$12.5 \text{ kJ}$$

Este valor es mayor que  $Q_1$  debido a la transferencia de energía fuera del gas por trabajo en el proceso de presión constante.

## 21.3 Procesos adiabáticos para un gas ideal

Como se señaló en la sección 20.6, un proceso adiabático es aquel en el que no se transfiere energía por calor entre un sistema y su entorno. Por ejemplo, si un gas se comprime (o expande) rápidamente, se transfiere muy poca energía fuera (o dentro) del sistema por calor, por lo que el proceso es casi adiabático. Tales procesos ocurren en el ciclo de un motor de gasolina, que se analiza en detalle en el Capítulo 22. Otro ejemplo de un proceso adiabático es la expansión lenta de un gas que está térmicamente aislado de su entorno. Las tres variables de la ley de los gases ideales ( $P$ ,  $V$  y  $T$ ) cambian durante un proceso adiabático.

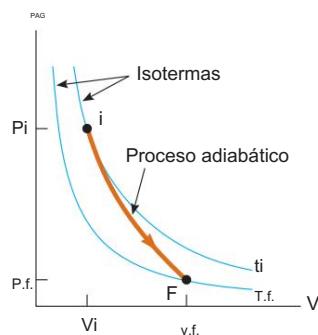


Figura 21.5 El diagrama PV para una expansión adiabática de un gas ideal. Observe que  $T_f < T_i$  en este proceso, por lo que la temperatura del gas disminuye.

Relación entre P y V para un proceso adiabático que involucra un gas ideal

Relación entre T y V para un proceso adiabático que involucra un gas ideal

### EJEMPLO 21.3

Un cilindro de motor diesel

Se comprime aire a  $20.0^\circ\text{C}$  en el cilindro de un motor diesel desde una presión inicial de 1.00 atm y un volumen de 800.0 cm<sup>3</sup> hasta un volumen de 60.0 cm<sup>3</sup>. Suponga que el aire se comporta como un gas ideal con  $\gamma = 1.40$  y la compresión es adiabática. Encuentre la presión y la temperatura finales del aire.

### SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine lo que sucede si un gas se comprime en un volumen más pequeño. Nuestra discusión anterior y la figura 21.5 nos dicen que la presión y la temperatura aumentan.

Categorizar Clasificamos este ejemplo como un problema que involucra un proceso adiabático.

2 En la expansión libre adiabática analizada en la Sección 20.6, la temperatura permanece constante. En este proceso único, no se realiza trabajo porque el gas se expande en el vacío. En general, la temperatura disminuye en una expansión adiabática en la que se realiza trabajo.

Imaginemos un proceso de gas adiabático que involucra un cambio infinitesimal en el volumen  $dV$  y un cambio infinitesimal en la temperatura  $dT$ . El trabajo realizado sobre el gas es  $P dV$ . Debido a que la energía interna de un gas ideal depende solo de la temperatura, el cambio en la energía interna en un proceso adiabático es el mismo que para un proceso isovolumétrico entre las mismas temperaturas,

$\Delta E_{\text{adiab}} = \int nCV dT$  (ecuación 21.12). Por lo tanto, la primera ley de la termodinámica,  $E = \int Q - W$ , con  $Q = 0$  se convierte en

$$dE = \int nCV dT = P dV$$

Tomando el diferencial total de la ecuación de estado de un gas ideal,  $PV = nRT$ , da

$$P dV = V dP = nR dT$$

Eliminando  $dT$  de estas dos ecuaciones, encontramos que

$$\frac{P dV}{V} = \frac{nR}{CV} dT = \frac{P dV}{V}$$

Sustituyendo  $R = CP - CV$  y dividiendo por  $PV$  da

$$\frac{dV}{V} = \frac{dP}{P} = \frac{1}{CP - CV} = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{V} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{V} \right)^{\frac{1}{1.40 - 1}} = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{V} \right)^{\frac{1}{0.40}}$$

Integrando esta expresión, tenemos

$$\ln P = \ln V + \text{constante}$$

que es equivalente a

$$PV^{\gamma} = \text{constante} \quad (21.18)$$

El diagrama PV para una expansión adiabática se muestra en la Figura 21.5. Debido a que  $\gamma > 1$ , la curva PV es más inclinada de lo que sería para una expansión isotérmica. Por la definición de un proceso adiabático, no se transfiere energía por calor hacia adentro o hacia afuera del sistema. Por lo tanto, a partir de la primera ley, vemos que  $E$  es negativa (el gas realiza trabajo, por lo que su energía interna disminuye) y, por lo tanto,  $T$  también es negativa. Por lo tanto, la temperatura del gas disminuye ( $T_f < T_i$ ) durante una expansión adiabática.<sup>2</sup> Por el contrario, la temperatura aumenta si el gas se comprime adiabáticamente. Aplicando la Ecuación 21.18 a los estados inicial y final, vemos que  $P_f V_f^{\gamma} = P_i V_i^{\gamma}$

$$\frac{P_f}{P_i} = \left( \frac{V_i}{V_f} \right)^{\gamma} \quad (21.19)$$

Usando la ley de los gases ideales, podemos expresar la Ecuación 21.19 como

$$\frac{T_f}{T_i} = \left( \frac{V_i}{V_f} \right)^{\gamma-1} \quad (21.20)$$

Analizar Use la Ecuación 21.19 para encontrar la presión final:

$$\frac{P_f V_i}{V_f} = \frac{P_i}{V_i} b g \quad 11,00 \text{ atm}^2 \text{ a } 800,0 \text{ cm}^3 \text{ b } 1,40$$

37,6 atm

Use la ley de los gases ideales para encontrar la temperatura final:

$$\frac{P_f V_f}{T_f} = \frac{P_i V_i}{T_i}$$

$$\frac{137,6 \text{ atm}^2 160,0 \text{ cm}^3}{11,00 \text{ atm}^2 1800,0 \text{ cm}^3} = \frac{293 \text{ K}}{2}$$

826 K 553°C

Finalizar La temperatura del gas aumenta por un factor de 826 K/293 K = 2.82. La alta compresión en un motor diesel eleva la temperatura del combustible lo suficiente como para provocar su combustión sin el uso de bujías.

## 21.4 La equipartición de la energía

Las predicciones basadas en nuestro modelo para el calor específico molar concuerdan bastante bien con el comportamiento de los gases monoatómicos, pero no con el comportamiento de los gases complejos (ver Tabla 21.2). El valor predicho por el modelo para la cantidad  $C_P - C_V = R$ , sin embargo, es el mismo para todos los gases. Esta similitud no sorprende porque esta diferencia es el resultado del trabajo realizado sobre el gas, que es independiente de su estructura molecular.

Para aclarar las variaciones en  $C_V$  y  $C_P$  en gases más complejos que los gases monoatómicos, exploremos más a fondo el origen del calor específico molar. Hasta ahora, hemos supuesto que la única contribución a la energía interna de un gas es la energía cinética de traslación de las moléculas. La energía interna de un gas, sin embargo, incluye contribuciones del movimiento de traslación, vibración y rotación de las moléculas. Los movimientos de rotación y vibración de las moléculas pueden ser activados por colisiones y, por lo tanto, están "acoplados" al movimiento de traslación de las moléculas. La rama de la física conocida como mecánica estadística ha demostrado que, para un gran número de partículas que obedecen las leyes de la mecánica newtoniana, la energía disponible es, en promedio, compartida equitativamente por cada grado de libertad independiente.

Recuerde de la Sección 21.1 que el teorema de equipartición establece que, en el equilibrio, cada grado de libertad aporta  $2k_B T$  de energía por molécula.<sup>1</sup>

Consideremos un gas diatómico cuyas moléculas tienen la forma de una pesa (Fig. 21.6). En este modelo, el centro de masa de la molécula puede trasladarse en las direcciones x, y y z (figura 21.6a). Además, la molécula puede girar alrededor de tres ejes perpendiculares entre sí (figura 21.6b). La rotación alrededor del eje y puede despreciarse porque el momento de inercia de la molécula  $I_y$  y su energía de rotación  $2I_y v^2$  alrededor de este eje son despreciables en comparación con los asociados con los ejes x y z. (Si los dos átomos se modelan como partículas, entonces  $I_y$  es idénticamente cero). Por lo tanto, hay cinco grados de libertad para la traslación y la rotación: tres asociados con el movimiento de traslación y dos asociados con el movimiento de rotación.

Debido a que cada grado de libertad aporta, en promedio,  $2k_B T$  de energía por molécula, la energía interna para un sistema de N moléculas, ignorando la vibración por ahora, es

$$\text{Evento } 3N \left( \frac{1}{2}k_B T_2 \right) 2N \left( \frac{1}{2}k_B T_2 \right) \frac{5}{2}Nk_B T \quad \frac{5}{2}nRT$$

Podemos usar este resultado y la Ecuación 21.13 para encontrar el calor específico molar a volumen constante:

$$c_v = \frac{1}{molar} \frac{d}{dT} \quad \frac{1}{molar} \frac{d}{dT} \frac{5}{2}nRT_2 \quad \frac{5}{2}R \quad (21.21)$$

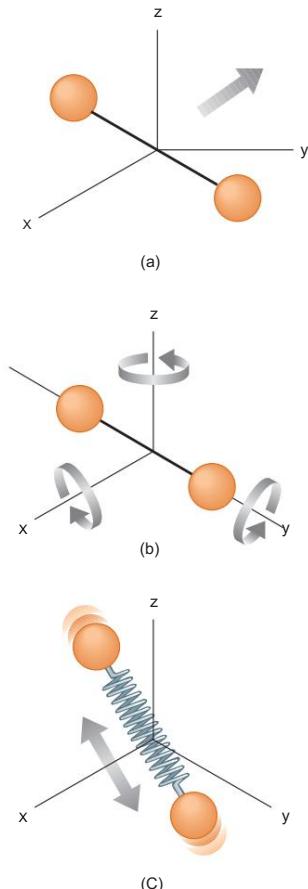


Figura 21.6 Posibles movimientos de una molécula diatómica: (a) movimiento de traslación del centro de masa, (b) movimiento de rotación alrededor de varios ejes y (c) movimiento de vibración a lo largo del eje molecular.

De las ecuaciones 21.16 y 21.17, encontramos que

$$\frac{PC}{CV} = \frac{\frac{7}{2R}}{\frac{5}{2R}} = \frac{7}{5} = 1.40$$

Estos resultados concuerdan bastante bien con la mayoría de los datos para moléculas diatómicas que se dan en la tabla 21.2. Eso es bastante sorprendente porque aún no hemos tenido en cuenta las posibles vibraciones de la molécula.

En el modelo de vibración, los dos átomos están unidos por un resorte imaginario (ver Fig. 21.6c). El movimiento vibracional agrega dos grados de libertad más, que corresponden a la energía cinética y la energía potencial asociada con las vibraciones a lo largo de la molécula. Por lo tanto, un modelo que incluye los tres tipos de movimiento predice una energía interna total de

$$\text{Entrada } 3N \frac{1}{2}kBT_2 2N 1 \quad \frac{1}{2}kBT_2 2N 1 \quad \frac{1}{2}kBT_2 \quad \frac{7}{2}NkBT \quad \frac{7}{2}nRT$$

y un calor específico molar a volumen constante de

$$CV = \frac{1}{n} \frac{d\text{ent}}{dT} = \frac{1}{n} \frac{d}{dT} \left( \frac{7}{2}NkBT \right) = \frac{7}{2}R \quad (21.22)$$

Este valor es inconsistente con los datos experimentales para moléculas como H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> (vea la Tabla 21.2) y sugiere un desglose de nuestro modelo basado en la física clásica.

Podría parecer que nuestro modelo es un fracaso para predecir calores específicos molares para gases diatómicos. Sin embargo, podemos afirmar que nuestro modelo tiene cierto éxito si las mediciones del calor específico molar se realizan en un amplio rango de temperatura en lugar de en la temperatura única que nos da los valores de la tabla 21.2. La figura 21.7 muestra el calor específico molar del hidrógeno en función de la temperatura. La característica notable de las tres mesetas en la curva del gráfico es que están en los valores del calor específico molar predicho por las Ecuaciones 21.14, 21.21 y 21.22. A bajas temperaturas, el gas de hidrógeno diatómico se comporta como un gas monoatómico. A medida que la temperatura aumenta a temperatura ambiente, su calor específico molar aumenta a un valor para un gas diatómico, consistente con la inclusión de rotación pero no de vibración. Para altas temperaturas, el calor específico molar es consistente con un modelo que incluye todos los tipos de movimiento.

Antes de abordar la razón de este misterioso comportamiento, hagamos unos breves comentarios sobre los gases poliatómicos. Para moléculas con más de dos átomos, las vibraciones son más complejas que para moléculas diatómicas y el número de grados de libertad es aún mayor. El resultado es un calor específico molar predicho aún más alto, que está de acuerdo cualitativamente con el experimento. Los calores específicos molares de los gases poliatómicos de la tabla 21.2 son más altos que los de

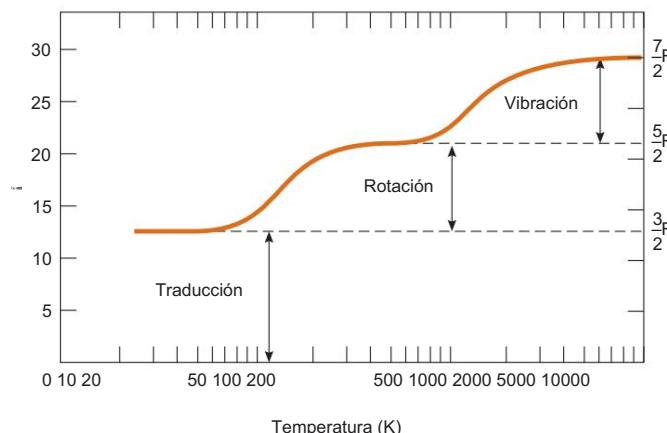


Figura 21.7 El calor específico molar del hidrógeno en función de la temperatura. La escala horizontal es logarítmica. Observe que el hidrógeno se licua a 20 K.

gases diatómicos. Cuantos más grados de libertad disponibles para una molécula, más "formas" hay para almacenar energía, lo que resulta en un calor específico molar más alto.

#### Un indicio de cuantización de energía

Nuestro modelo de calores específicos molares se ha basado hasta ahora en nociones puramente clásicas. Predice un valor de calor específico para un gas diatómico que, según la figura 21.7, solo concuerda con mediciones experimentales realizadas a altas temperaturas. Para explicar por qué este valor solo es cierto a altas temperaturas y por qué existen las mesetas en la figura 21.7, debemos ir más allá de la física clásica e introducir algo de física cuántica en el modelo. En el Capítulo 18, discutimos la cuantización de la frecuencia para cuerdas vibrantes y columnas de aire; solo pueden existir ciertas frecuencias de ondas estacionarias. Ese es un resultado natural siempre que las ondas estén sujetas a condiciones de contorno.

La física cuántica (capítulos 40 a 43) muestra que los átomos y las moléculas pueden describirse mediante la física de ondas en condiciones de contorno. En consecuencia, estas ondas tienen frecuencias cuantizadas. Además, en física cuántica, la energía de un sistema es proporcional a la frecuencia de la onda que representa el sistema. Por lo tanto, las energías de los átomos y las moléculas están cuantizadas.

Para una molécula, la física cuántica nos dice que las energías de rotación y vibración están cuantizadas. La figura 21.8 muestra un diagrama de niveles de energía para los estados cuánticos de rotación y vibración de una molécula diatómica. El estado más bajo permitido se llama estado fundamental. Observe que los estados vibracionales están separados por brechas de energía más grandes que los estados rotacionales.

A bajas temperaturas, la energía que gana una molécula en colisiones con sus vecinas generalmente no es lo suficientemente grande como para elevarla al primer estado excitado de rotación o vibración. Por lo tanto, aunque la rotación y la vibración están permitidas según la física clásica, en realidad no ocurren a bajas temperaturas. Todas las moléculas están en el estado fundamental para la rotación y la vibración. La única contribución a la energía promedio de las moléculas proviene de la translación y el calor específico es el predicho por la ecuación 21.14.

A medida que aumenta la temperatura, aumenta la energía promedio de las moléculas. En algunas colisiones, una molécula puede tener suficiente energía transferida desde otra molécula para excitar el primer estado de rotación. A medida que la temperatura aumenta aún más, más moléculas pueden ser excitadas a este estado. El resultado es que la rotación comienza a contribuir a la energía interna y aumenta el calor específico molar. Aproximadamente a temperatura ambiente en la figura 21.7, se ha alcanzado la segunda meseta y la rotación contribuye completamente al calor específico molar. El calor específico molar ahora es igual al valor predicho por la Ecuación 21.21.

No hay contribución a temperatura ambiente de la vibración porque las moléculas todavía están en el estado de vibración fundamental. La temperatura debe elevarse aún más para excitar el primer estado vibratorio, que ocurre en la Figura 21.7 entre 1 000 K y 10 000 K. A 10 000 K en el lado derecho de la figura, la vibración contribuye completamente a la energía interna y el calor específico molar tiene el valor predicho por la Ecuación 21.22.

Las predicciones de este modelo apoyan el teorema de equipartición de energía. Además, la inclusión en el modelo de cuantización de energía de la física cuántica permite una comprensión completa de la Figura 21.7.

**Pregunta rápida 21.3** El calor específico molar de un gas diatómico se mide a volumen constante y se encuentra que es 29.1 J/mol K. ¿Cuáles son los tipos de energía que contribuyen al calor específico molar? (a) solo translación (b) solo translación y rotación (c) solo translación y vibración (d) translación, rotación y vibración

**Pregunta rápida 21.4** El calor específico molar de un gas se mide a volumen constante y se encuentra que es  $11R/2$ . ¿Es más probable que el gas sea (a) monoatómico, (b) diatómico o (c) poliatómico?

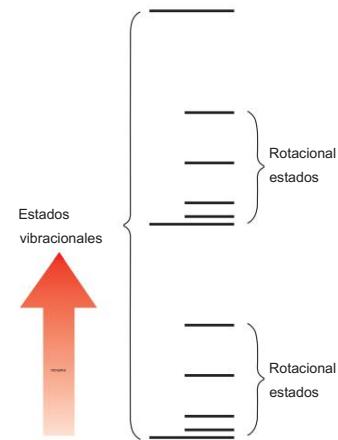


Figura 21.8 Diagrama de niveles de energía para los estados de vibración y rotación de una molécula diatómica. Observe que los estados de rotación se encuentran más juntos en energía que los estados de vibración.

**PREVENCIÓN DE ERRORES 21.2**

## La función de distribución

La función de distribución  $nV(E)$  se define en términos del número de moléculas con energía en el rango  $E$  a  $E + dE$  en lugar de en términos del número de moléculas con energía  $E$ . Debido a que el número de moléculas es finito y el número de posibles valores de la energía es infinito, el número de moléculas con una energía exacta  $E$  puede ser cero.

## 21.5 Distribución de velocidades moleculares

Hasta ahora, hemos considerado solo valores promedio de las energías de las moléculas en un gas y no hemos abordado la distribución de energías entre las moléculas. En realidad, el movimiento de las moléculas es extremadamente caótico. Cualquier molécula individual choca con otras a una velocidad enorme, típicamente mil millones de veces por segundo. Cada colisión da como resultado un cambio en la velocidad y dirección del movimiento de cada una de las moléculas participantes. La ecuación 21.7 muestra que las velocidades moleculares rms aumentan al aumentar la temperatura. ¿Cuál es el número relativo de moléculas que poseen alguna característica como la energía dentro de un cierto rango?

Abordaremos esta cuestión considerando la densidad numérica  $nV(E)$ . Esta cantidad, llamada función de distribución, se define de modo que  $nV(E) dE$  es el número de moléculas por unidad de volumen con energía entre  $E$  y  $E + dE$ . (La relación entre el número de moléculas que tienen la característica deseada y el número total de moléculas es la probabilidad de que una molécula en particular tenga esa característica).

En general, la mecánica estadística determina que la densidad numérica es

## Ley de distribución de Boltzmann

$$nV(E) = n_0 e^{-E/kT} \quad (21.23)$$

donde  $n_0$  se define de tal manera que  $n_0 dE$  es el número de moléculas por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$ . Esta ecuación, conocida como ley de distribución de Boltzmann, es importante para describir la mecánica estadística de un gran número de moléculas. Establece que la probabilidad de encontrar las moléculas en un estado de energía particular varía exponencialmente como el negativo de la energía dividido por  $kT$ . Todas las moléculas caerían en el nivel de energía más bajo si la agitación térmica a una temperatura  $T$  no excitara las moléculas a niveles de energía más altos.

**EJEMPLO 21.4**

## Excitación Térmica de Niveles de Energía Atómica

Como se discutió en la Sección 21.4, los átomos pueden ocupar solo ciertos niveles de energía discretos. Considere un gas a una temperatura de 2 500 K cuyos átomos pueden ocupar solo dos niveles de energía separados por 1,50 eV, donde 1 eV (electronvolt) es una unidad de energía igual a 1,60 1019 J (figura 21.9). Determine la relación entre el número de átomos en el nivel de energía más alto y el número en el nivel de energía más bajo.

**SOLUCIÓN**

**Conceptualizar** En su representación mental de este ejemplo, recuerde que solo se permiten dos estados posibles para el sistema del átomo. La figura 21.9 le ayuda a visualizar los dos estados en un diagrama de niveles de energía. En este caso, el átomo tiene dos energías posibles,  $E_1$  y  $E_2$ , donde  $E_1 < E_2$ .

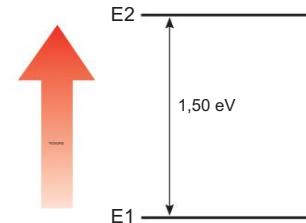


Figura 21.9 (Ejemplo 21.4) Diagrama de niveles de energía para un gas cuyos átomos pueden ocupar dos estados de energía.

**Categorizar** Clasificamos este ejemplo como uno en el que aplicamos la ley de distribución de Boltzmann a un sistema cuantificado.

**Analiza** Establece la relación entre el número de átomos en el nivel de energía más alto y el número en el nivel de energía más bajo y usa la Ecuación 21.23 para expresar cada número:

$$(1) \frac{nV(E_2)}{nV(E_1)} = \frac{n_0 e^{-E_2/kT}}{n_0 e^{-E_1/kT}} = \frac{e^{E_1/kT}}{e^{E_2/kT}} = e^{E_1 - E_2/kT}$$

Evalúa  $kT$  en el exponente:

$$kT = 11,38 \times 10^2 \text{ J} = 12,500 \text{ K}$$

$$\frac{1 \text{ eV}}{1,60 \times 10^19 \text{ J}} = 6,25 \times 10^{-21} \text{ eV}^{-1}$$

Sustituya este valor en la Ecuación (1):

$$\frac{nV(E_2)}{nV(E_1)} = \frac{e^{E_1 - E_2/kT}}{e^{E_1 - E_2/kT}} = \frac{e^{1,50 \text{ eV}/(6,25 \times 10^{-21} \text{ eV}^{-1})}}{e^{1,50 \text{ eV}/(6,25 \times 10^{-21} \text{ eV}^{-1})}} = 9,52 \times 10^4$$

Finalizar Este resultado indica que a T 2 500 K, solo una pequeña fracción de los átomos se encuentran en el nivel de energía más alto.

De hecho, por cada átomo en el nivel de energía superior, hay alrededor de 1 000 átomos en el nivel inferior. El número de átomos en el nivel superior aumenta a temperaturas aún más altas, pero la ley de distribución específica que en el equilibrio siempre hay más átomos en el nivel inferior que en el superior.

**¿Y si?** ¿Qué pasaría si los niveles de energía de la Figura 21.9 estuvieran más cerca unos de otros en energía? ¿Eso aumentaría o disminuiría la fracción de átomos en el nivel de energía superior?

**Respuesta** Si el nivel excitado tiene una energía más baja que la de la figura 21.9, sería más fácil que la agitación térmica excitara los átomos a este nivel y la fracción de átomos en este nivel de energía sería mayor. Veamos esto matemáticamente expresando la Ecuación (1) como

$$r^2 = \frac{1}{2} \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}}$$

donde  $r^2$  es la relación entre los átomos que tienen energía  $E_2$  y los que tienen energía  $E_1$ . Diferenciando con respecto a  $E_2$ , encontramos

$$\frac{dr^2}{dE_2} = \frac{d}{dE_2} \left( \frac{1}{2} \frac{e^{-E_2/kT}}{e^{-E_1/kT}} \right) = \frac{1}{2} \frac{-kT e^{-E_2/kT}}{(kT)^2} = \frac{-kT}{2(kT)^2} e^{-E_2/kT}$$

Debido a que la derivada tiene un valor negativo, a medida que  $E_2$  disminuye,  $r^2$  aumenta.

Ahora que hemos discutido la distribución de energías, pensemos en la distribución de velocidades moleculares. En 1860, James Clerk Maxwell (1831–1879) derivó una expresión que describe la distribución de velocidades moleculares de una manera muy definida. Su trabajo y los desarrollos posteriores de otros científicos fueron muy controvertidos porque la detección directa de moléculas no se podía lograr experimentalmente en ese momento. Sin embargo, unos 60 años después, se idearon experimentos que confirmaron las predicciones de Maxwell.

Consideremos un contenedor de gas cuyas moléculas tienen alguna distribución de velocidades. Supongamos que queremos determinar cuántas moléculas de gas tienen una velocidad en el rango de, por ejemplo, 400 a 401 m/s. Intuitivamente, esperamos que la distribución de velocidades dependa de la temperatura. Además, esperamos que la distribución alcance su punto máximo en las cercanías de  $v_{rms}$ . Es decir, se espera que pocas moléculas tengan velocidades mucho menores o mucho mayores que  $v_{rms}$  porque estas velocidades extremas resultan solo de una cadena improbable de colisiones.

La distribución de velocidad observada de las moléculas de gas en equilibrio térmico se muestra en la figura activa 21.10 (página 602). La cantidad  $Nv$ , llamada función de distribución de velocidad de Maxwell-Boltzmann, se define de la siguiente manera. Si  $N$  es el número total de moléculas, el número de moléculas con velocidades entre  $v$  y  $v + dv$  es  $dN/Nv dv$ . Este número también es igual al área del rectángulo sombreado en la figura activa 21.10. Además, la fracción de moléculas con velocidades entre  $v$  y  $v + dv$  es  $(Nv dv)/N$ . Esta fracción también es igual a la probabilidad de que una molécula tenga una velocidad en el rango de  $v$  a  $v + dv$ .



LUDWIG BOLTZMANN físico

austriaco (1844-1906)

Boltzmann hizo muchas contribuciones importantes al desarrollo de la teoría cinética de los gases, el electromagnetismo y la termodinámica. Su trabajo pionero en el campo de la teoría cinética condujo a la rama de la física conocida como mecánica estadística.

La expresión fundamental que describe la distribución de velocidades de  $N$  moléculas de gas es

$$Nv = \frac{4\pi N}{2mkT} v^2 e^{-mv^2/(2kT)} \quad (21.24)$$

donde  $m$  es la masa de una molécula de gas,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  es la temperatura absoluta  $E/kT$ .<sup>3</sup>

Observe la aparición del factor de Boltzmann con  $E$

$$\frac{1}{2} \frac{m}{2\pi kT} v^2$$

<sup>3</sup> Para la derivación de esta expresión, consulte un libro de texto avanzado sobre termodinámica.

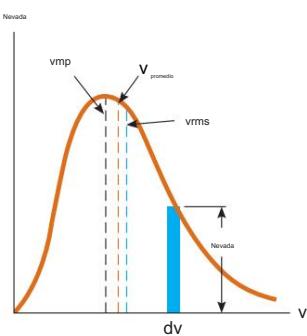


FIGURA ACTIVA 21.10

La velocidad de distribución de las moléculas de gas a alguna temperatura. El número de moléculas que tienen velocidades en el rango de  $v$  a  $v + dv$  es igual al área del rectángulo sombreado,  $N(v)dv$ . La función  $N(v)$  tiende a cero cuando  $v$  tiende a infinito.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para mover el rectángulo azul y medir el número de moléculas con velocidades dentro de un rango pequeño.

Como se indica en la figura activa 21.10, la velocidad promedio es algo más baja que la velocidad rms. La velocidad más probable  $v_{\text{mp}}$  es la velocidad a la que la curva de distribución alcanza un pico. Usando la ecuación 21.24, encontramos que

$$\frac{v_{\text{rms}}}{\sqrt{\frac{2kT}{m}}} = \sqrt{\frac{3}{\pi}} = 1.73 \text{ mil millones de m/s} \quad (21.25)$$

$$\frac{v_{\text{avg}}}{\sqrt{\frac{8kT}{m}}} = \sqrt{\frac{5}{3}} = 1.60 \text{ mil millones de m/s} \quad (21.26)$$

$$\frac{v_{\text{mp}}}{\sqrt{\frac{2kT}{m}}} = \sqrt{\frac{4}{3}} = 1.41 \text{ mil millones de m/s} \quad (21.27)$$

La Ecuación 21.25 apareció anteriormente como Ecuación 21.7. Los detalles de las derivaciones de estas ecuaciones a partir de la ecuación 21.24 se dejan para el estudiante (véanse los problemas 33 y 57). De estas ecuaciones, vemos que

$$v_{\text{rms}} > v_{\text{avg}} > v_{\text{mp}}$$

La figura activa 21.11 representa las curvas de distribución de velocidad para el nitrógeno, N<sub>2</sub>. Las curvas se obtuvieron usando la Ecuación 21.24 para evaluar la función de distribución a varias velocidades y a dos temperaturas. Observe que el pico de cada curva se desplaza hacia la derecha a medida que aumenta T, lo que indica que la velocidad promedio aumenta con el aumento de la temperatura, como se esperaba. Debido a que la velocidad más baja posible es cero y el límite clásico superior de la velocidad es infinito, las curvas son asimétricas. (En el Capítulo 39, mostramos que el límite superior real es la velocidad de la luz).

La ecuación 21.24 muestra que la distribución de velocidades moleculares en un gas depende tanto de la masa como de la temperatura. A una temperatura dada, la fracción de moléculas con velocidades superiores a un valor fijo aumenta a medida que disminuye la masa. Por lo tanto, las moléculas más ligeras como el H<sub>2</sub> y el He escapan más fácilmente de la atmósfera terrestre que las moléculas más pesadas como el N<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>. (Consulte la discusión sobre la velocidad de escape en el Capítulo 13. Las moléculas de gas escapan aún más fácilmente de la superficie de la Luna que de la Tierra porque la velocidad de escape en la Luna es menor que la de la Tierra).

Las curvas de distribución de velocidad de las moléculas en un líquido son similares a las que se muestran en la figura activa 21.11. Podemos entender el fenómeno de la evaporación de un líquido a partir de esta distribución en velocidades, dado que algunas moléculas del líquido son más energéticas que otras. Algunas de las moléculas que se mueven más rápido en el líquido penetran en la superficie e incluso dejan el líquido a temperaturas muy por debajo

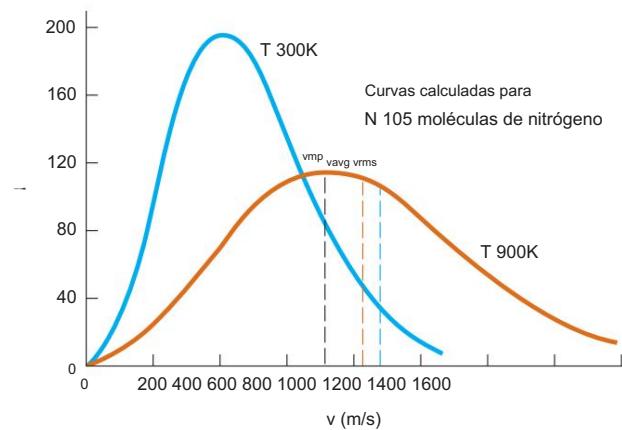


FIGURA ACTIVA 21.11

La función de distribución de velocidad para 105 moléculas de nitrógeno a 300 K y 900 K. El área total bajo cualquiera de las curvas es igual al número total de moléculas, que en este caso es igual a 105. Observe que  $v_{\text{rms}} > v_{\text{avg}} > v_{\text{mp}}$ .

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para configurar la temperatura deseada y ver el efecto en la curva de distribución.

el punto de ebullición. Las moléculas que escapan del líquido por evaporación son aquellas que tienen energía suficiente para vencer las fuerzas de atracción de las moléculas en fase líquida. En consecuencia, las moléculas que quedan en la fase líquida tienen una energía cinética promedio más baja; como resultado, la temperatura del líquido disminuye.

Por lo tanto, la evaporación es un proceso de enfriamiento. Por ejemplo, se puede colocar un paño empapado en alcohol sobre una cabeza febril para refrescar y consolar a un paciente.

### EJEMPLO 21.5

#### Un sistema de nueve partículas

Nueve partículas tienen velocidades de 5,00, 8,00, 12,0, 12,0, 12,0, 14,0, 14,0, 17,0 y 20,0 m/s.

(A) Encuentre la velocidad promedio de las partículas.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine una pequeña cantidad de partículas que se mueven en direcciones aleatorias con las pocas velocidades enumeradas.

Categorizar Debido a que estamos tratando con un pequeño número de partículas, podemos calcular la velocidad promedio directamente.

Analiza Encuentra la velocidad promedio de las partículas dividiendo la suma de las velocidades por el número total de partículas:

$$\bar{v}_{avg} = \frac{15,00 \ 8,00 \ 12,0 \ 12,0 \ 12,0 \ 14,0 \ 14,0 \ 17,0 \ 20,0}{9} \text{ m/s}$$

12,7 m/s

(B) ¿Cuál es la velocidad rms de las partículas?

#### SOLUCIÓN

Encuentre la velocidad promedio al cuadrado de las partículas dividiendo la suma de las velocidades al cuadrado por el número total de partículas:

$$\bar{v^2} = \frac{15.00^2 + 8.00^2 + 12.0^2 + 12.0^2 + 12.0^2 + 14.0^2 + 14.0^2 + 17.0^2 + 20.0^2}{9} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

178 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>

Encuentre la velocidad rms de las partículas sacando la raíz cuadrada:

$$v_{rms} = \sqrt{\bar{v^2}} = \sqrt{178} \text{ m/s}$$

13,3 m/s

(C) ¿Cuál es la velocidad más probable de las partículas?

#### SOLUCIÓN

Tres de las partículas tienen una velocidad de 12,0 m/s, dos tienen una velocidad de 14,0 m/s y las cuatro restantes tienen diferentes velocidades. Por tanto, la velocidad más probable vmp es 12,0 m/s.

Finalizar Compare este ejemplo, en el que el número de partículas es pequeño y conocemos las velocidades de las partículas individuales, con el siguiente ejemplo.

### EJEMPLO 21.6

#### Velocidades moleculares en un gas de hidrógeno

Una muestra de hidrógeno gaseoso de 0.500 mol está a 300 K.

(A) Encuentre la velocidad promedio, la velocidad rms y la velocidad más probable de las moléculas de hidrógeno.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine una gran cantidad de partículas en un gas real, todas moviéndose en direcciones aleatorias con diferentes velocidades.

Categorizar No podemos calcular los promedios como se hizo en el ejemplo 21.5 porque no se conocen las velocidades individuales de las partículas. Sin embargo, estamos tratando con una gran cantidad de partículas, por lo que podemos usar la función de distribución de velocidad de Maxwell Boltzmann.

Analizar Use la Ecuación 21.26 para encontrar la velocidad promedio:

$$\text{valor medio } \overline{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(200 \text{ K})}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 1.78 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Use la ecuación 21.25 para encontrar la velocidad rms:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(200 \text{ K})}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 1.93 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Use la Ecuación 21.27 para encontrar la velocidad más probable:

$$v_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(200 \text{ K})}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 1.57 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(B) Encuentra el número de moléculas con velocidades entre 400 m/s y 401 m/s.

#### SOLUCIÓN

Use la ecuación 21.24 para evaluar el número de moléculas en un rango estrecho de velocidades entre  $v$  y  $v + dv$ :

Evalúa la constante frente a  $v^2$ :

$$(1) Nv dv = \frac{4pN}{2pkT} \cdot \frac{v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}}}{b} dv$$

$$4pN = \frac{4pnNA}{2pkT} b$$

$$4p = \frac{4p n_A}{2p k T} \cdot \frac{10.500 \text{ mol}^2}{16.02 \text{ g/mol}} \cdot \frac{2 \times 1023 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}}{2 \times 11.38 \text{ J/K}} \cdot \frac{1023 \text{ K}^{-1}}{1300 \text{ K}^{-1}}$$

$$= 1.74 \times 10^{14} \text{ s}^{-3} \text{ m}^{-3}$$

Evalúa el exponente de  $e$ :

$$\frac{mv^2}{2kT} = \frac{2 \times 11.67 \times 10^2 \text{ kg} \cdot 1400 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}}{2 \times 11.38 \times 10^2 \text{ J/K} \cdot 1300 \text{ K}^2} = 0.0645$$

Evalué  $Nv dv$  usando la Ecuación (1):

$$Nv dv = 1.74 \times 10^{14} \text{ s}^{-3} \text{ m}^{-3} \cdot 0.0645 \text{ m}^2 \text{s}^{-2} = 2.61 \times 10^{19} \text{ moléculas}$$

Finalizar En esta evaluación, podríamos calcular el resultado sin integración porque  $dv$  1 m/s es mucho menor que  $v$  400 m/s. Si hubiéramos buscado el número de partículas entre, digamos, 400 m/s y 500 m/s, necesitaríamos integrar la Ecuación (1) entre estos límites de velocidad.

## Resumen

ThomsonNOW® Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para realizar un examen de práctica para este capítulo.

### CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

La presión de N moléculas de un gas ideal contenidas en un volumen V es

$$\text{P}_{\text{AG}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot b \cdot \frac{m_0 v^2}{2} \quad (21.2)$$

La energía cinética de traslación promedio por molécula en un gas,  $\frac{1}{2} m_0 v^2$ , está relacionada con la temperatura T del gas través de la expresión

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad (21.4)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann. Cada grado de libertad de traslación (x, y o z) tiene  $k_B T$  de energía asociada.

El calor específico molar de un gas monoatómico ideal a volumen constante es  $C_p = \frac{5}{2} R$ ; el calor específico molar en presión constante  $C_V$  es  $C_V = \frac{5}{2} R$ . La relación de calores  $C_P > C_V$  viene dada por los específicos g

La energía interna de N moléculas (o n mol) de un gas monoatómico ideal es

$$\text{E}_\text{int} = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} n R T \quad (21.10)$$

El cambio de energía interna para n mol de cualquier gas ideal que sufre un cambio de temperatura T es

$$\delta E_\text{int} = n C_V \delta T \quad (21.12)$$

donde  $C_V$  es el calor específico molar a volumen constante.

La ley de distribución de Boltzmann describe la distribución de partículas entre los estados de energía disponibles. El número relativo de partículas que tienen energía entre E y E+dE es  $nV(E)dE$ , donde

$$nV \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad (21.23)$$

La función de distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann describe la distribución de velocidades de las moléculas en un gas:

$$n_{\text{rel}} v = 4 \pi N \frac{m_0}{2 \pi k_B T}^{3/2} b^{2v} e^{-\frac{m_0 v^2}{2 k_B T}} \quad (21.24)$$

Si un gas ideal sufre una expansión o compresión adiabática, la primera ley de la termodinámica, junto con la ecuación de estado, muestra que

$$\frac{\text{temporaria}}{\text{final}} = \text{constante} \quad (21.18)$$

La ecuación 21.24 nos permite calcular la velocidad cuadrática media, la velocidad promedio y la velocidad más probable de las moléculas en un gas:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{2}{2} \cdot \frac{B}{3 k_B T} \cdot \frac{v_{\text{avg}}}{m_0}} = \sqrt{\frac{1.73 \text{ mil millones de BT}}{m_0}} \quad (21.25)$$

$$v_{\text{pm}} = \sqrt{\frac{B}{2 k_B T}} = \sqrt{\frac{1.60 \text{ mil millones de BT}}{m_0}} \quad (21.26)$$

$$v_{\text{mp}} = \sqrt{\frac{B}{2 k_B T}} = \sqrt{\frac{1.41 \text{ mil millones de BT}}{m_0}} \quad (21.27)$$

## Preguntas

denota respuesta disponible en Student Solutions Manual/Study Guide; O denota pregunta objetiva

- La ley de presiones parciales de Dalton establece que la presión total de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones que ejercería cada gas de la mezcla si estuviera solo en el recipiente. Dé un argumento convincente para esta ley basado en la teoría cinética de los gases.
- Un recipiente se llena con gas helio y otro con gas argón. Ambos recipientes están a la misma temperatura. ¿Qué moléculas tienen la velocidad rms más alta? Explicar.
- Cuando se frota el alcohol en el cuerpo, se baja la piel temperatura. Explique este efecto.
- Se le pide a un estudiante que explique paso a paso qué hace que aumente la temperatura de una muestra de gas. Su

respuesta: Cuando una muestra de un gas se coloca sobre una placa caliente, (a) las moléculas se aceleran. (b) Entonces las moléculas chocan entre sí más a menudo. (c) La fricción interna hace que las colisiones sean inelásticas. (d) Se produce calor en las colisiones. (e) Tan pronto como ponemos un termómetro, vemos que la temperatura ha subido. (f) El mismo proceso puede tener lugar sin el uso de una placa calefactora si empuja rápidamente el pistón en un cilindro aislado que contiene el gas. (i) ¿Cuáles de las partes (a) a (f) de este relato son afirmaciones correctas necesarias para una explicación clara y completa? (ii) ¿Cuáles son afirmaciones correctas que no son necesarias para explicar la lectura más alta del termómetro? (iii) ¿Cuáles son afirmaciones incorrectas?

- 5.** O Un globo lleno de helio inicialmente a temperatura ambiente se coloca en un congelador. El caucho permanece flexible. (i) ¿Su volumen (a) aumenta, (b) disminuye o (c) permanece igual? (ii) ¿Su presión (a) aumenta, (b) disminuye o (c) permanece igual?
6. O Un gas está a 200 K. Si deseamos duplicar la velocidad rms de las moléculas del gas, ¿a qué debemos elevar su temperatura? (a) 283 K (b) 400 K (c) 566 K (d) 800 K (e) 1 130 K 7. O Clasifique lo siguiente de mayor a menor, observando cualquier caso de igualdad. (a) La velocidad promedio de las moléculas en una muestra particular de gas ideal. (b) La velocidad más probable. (c) La raíz cuadrada media de la velocidad. (d) La velocidad vectorial promedio de las moléculas. (e) La velocidad del sonido en el gas.
8. O Dos muestras del mismo gas ideal tienen la misma presión y densidad. La muestra B tiene el doble del volumen de la muestra A. ¿Cuál es la velocidad rms de las moléculas en la muestra B? (a) el doble de la muestra A (b) igual a la de la muestra A (c) la mitad de la muestra A (d) imposible de determinar 9. ¿Cuál es más denso, el aire seco o el aire saturado con vapor de agua?  
Explicar.
- 10.** ¿Qué le sucede a un globo lleno de helio que se lanza al aire? ¿Se expande o se contrae? ¿Deja de subir a alguna altura?
11. ¿Por qué un gas diatómico tiene un mayor contenido de energía por mol que un gas monoatómico a la misma temperatura?
12. O Un gas ideal está contenido en un recipiente a 300 K. Si la temperatura aumenta a 900 K, ¿cuál es el factor de cambio en (i) la energía cinética promedio de las moléculas? 13 (a) 9 (b) 3 (c) (d) 1 (ii) ¿Cuál es el factor de cambio en la velocidad molecular rms? Elije entre las mismas posibilidades. (iii) ¿Cuál es el factor de cambio en el cambio de cantidad de movimiento promedio que experimenta una molécula en una colisión con una pared en particular? (iv) ¿Cuál es el factor de cambio en la velocidad de colisión de las moléculas con las paredes? (v) ¿Cuál es el factor de cambio en la presión del gas? Elija entre las mismas posibilidades (a) a (e).
13. El aire caliente sube, entonces, ¿por qué generalmente se enfriá cuando escalas una montaña? Nota: El aire tiene una conductividad térmica baja.
14. O La curva marrón de la figura activa 21.11 muestra la distribución de velocidades para 100 000 moléculas de nitrógeno a 900 K. El criptón tiene casi tres veces la masa molecular del nitrógeno. La curva azul, sin tener en cuenta su etiqueta, muestra la distribución de velocidad para cuál de los siguientes? (a) 100 000 moléculas de criptón a 900 K (b) 100 000 moléculas de criptón a 520 K (c) 100 000 moléculas de criptón a 300 K (d) 100 000 moléculas de criptón a 100 K (e) 33 000 moléculas de criptón a 900 K (f) 33 000 moléculas de criptón a 300 K (g) Esta distribución no puede atribuirse a ninguna muestra de criptón, que no existe en la Tierra.

## Problemas

**WebAssign** Los problemas de este capítulo se pueden asignar en línea en WebAssign.

**ThomsonNOW®** Regístrese en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para evaluar su comprensión de los temas de este capítulo con cuestionarios adicionales y preguntas conceptuales.

1, 2, 3 denota sencillo, intermedio, desafiante; indica la solución completa disponible en el Manual de soluciones para estudiantes/Guía de estudio; indica una solución guiada con sugerencias disponibles en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com); denota desarrollo de razonamiento simbólico; denota pedir un razonamiento cualitativo; indica que la computadora es útil para resolver problemas

### Sección 21.1 Modelo molecular de un gas ideal

Nota: el problema 25 del capítulo 19 se puede asignar a esta sección.

- 1.** Calcula la masa de un átomo de (a) helio, (b) hierro y (c) plomo. Dé sus respuestas en gramos. Las masas atómicas de estos átomos son 4,00 u, 55,9 u y 207 u, respectivamente.
2. Usamos  $m$  para representar la masa de una muestra,  $m_0$  para representar la masa de una molécula,  $M$  para la masa molar,  $n$  para el número de moles en una muestra,  $N$  para el número de moléculas y  $N_A$  para representar el de Avogadro. número. Explique por qué cada una de las siguientes ecuaciones es verdadera:

$$N = n N_A \quad m = n M \quad m_0 = M/n \quad M = m/n \quad N = N_A n$$

¿Las ecuaciones son verdaderas solo para gases ideales? Solo para gases? Solo para elementos químicos puros? Solo para compuestos químicos puros? Para mezclas?

3. En un intervalo de 30,0 s, 500 granizos golpean una ventana de vidrio de 0,600 m<sup>2</sup> de área en un ángulo de 45,0° con respecto a la superficie de la ventana. Cada piedra de granizo tiene una masa de 5,00 g y una velocidad de 8,00 m/s. Suponiendo que las colisiones son elásticas, encuentre la fuerza y la presión promedio sobre la ventana. 1023
- un período de 1.00 s, 5.00 golpean moléculas de nitrógeno 4. En una pared con un área de 8.00 cm<sup>2</sup>. Suponga que las moléculas se mueven con una rapidez de 300 m/s y golpean la pared de frente en colisiones elásticas. ¿Cuál es la presión ejercida sobre la pared? (La masa de una molécula de N<sub>2</sub> es 4,68 X 10<sup>-26</sup> kg.)

5. En un sistema de ultra alto vacío, la presión se mide en 1,00 10<sup>10</sup> torr (donde 1 torr = 133 Pa). Asumir

Si la temperatura es de 300 K, encuentre el número de moléculas en un volumen de 1,00 m<sup>3</sup>.

6. Una muestra de oxígeno gaseoso de 2,00 mol está confinada en un recipiente de 5,00 L a una presión de 8,00 atm. Encuentre la energía cinética de traslación promedio de una molécula de oxígeno en estas condiciones.

7. Un globo esférico de 4 000 cm<sup>3</sup> de volumen contiene helio a una presión (interior) de 1,20 105 Pa. ¿Cuántos moles de helio hay en el globo si la energía cinética promedio de cada átomo de helio es 3,60 1022 J?
8. Un recipiente de 5,00 L contiene gas nitrógeno a 27,0 °C y 3,00 atm. (a) Encuentre la energía cinética de traslación total de las moléculas de gas y (b) la energía cinética promedio por molécula.

9. (a) ¿Cuántos átomos de gas helio llenan un globo de 30,0 cm de diámetro a 20,0 °C y 1,00 atm? (b) ¿Cuál es la energía cinética promedio de los átomos de helio? (c) ¿Cuál es la velocidad cuadrática media de los átomos de helio? 10. (a) Demuestre que 1 Pa = 1 J/m<sup>3</sup>. (b) Demuestre que la densidad en el espacio de la energía cinética de traslación de un gas ideal (la energía por volumen) es  $3P/V$ .
11. Un cilindro contiene una mezcla de gas helio y argón en equilibrio a 150 °C. (a) ¿Cuál es la energía cinética promedio para cada tipo de molécula de gas? (b) ¿Cuál es la velocidad cuadrática media de cada tipo de molécula?

#### Sección 21.2 Calor específico molar de un gas ideal

Nota: puede usar los datos de la tabla 21.2 sobre gases particulares. Aquí definimos un "gas ideal monoatómico" que tiene calores específicos molares CV = 3R/2 y CP = 5R/2, y un "gas ideal diatómico" que tiene CV = 5R/2 y CP = 7R/2.

12. En un proceso a volumen constante, 209 J de energía se transfieren por calor a 1,00 mol de un gas monoatómico ideal inicialmente a 300 K. Encuentre (a) el aumento de energía interna del gas, (b) el trabajo hecho en él, y (c) su temperatura final.

13. Una muestra de 1,00 mol de hidrógeno gaseoso se calienta a presión constante de 300 K a 420 K. Calcule (a) la energía transferida al gas por calor, (b) el aumento de su energía interna y (c) el trabajo realizado sobre el gas.

14. Una casa tiene paredes bien aisladas. Contiene un volumen de 100 m<sup>3</sup> de aire a 300 K. (a) Calcule la energía necesaria para aumentar la temperatura de este gas ideal diatómico en 1,00 °C. (b) ¿Qué pasa si? Si esta energía pudiera usarse para levantar un objeto de masa m a través de una altura de 2,00 m, ¿cuál es el valor de m?

15. Una botella térmica de 1 L está llena de té a 90 °C. Sirve una taza e inmediatamente vuelve a enroscar el tapón en la botella. Haga una estimación del orden de magnitud del cambio de temperatura del té que queda en la botella que resulta de la admisión de aire a temperatura ambiente. Indique las cantidades que toma como datos y los valores que mide o estima para ellas.

16. Un cilindro vertical con un pistón pesado contiene aire a 300 K. La presión inicial es de 200 kPa y el volumen inicial es

0,350 m<sup>3</sup>. Tome la masa molar del aire como 28,9 g/mol y asuma CV = 5R/2. (a) Encuentre el calor específico del aire a volumen constante en unidades de J/kg °C. (b) Calcule la masa del aire en el cilindro. (c) Suponga que el pistón se mantiene fijo. Encuentre la entrada de energía requerida para elevar la temperatura del aire a 700 K. (d) ¿Qué pasaría si? Suponga nuevamente las condiciones del estado inicial y suponga que el pistón pesado puede moverse libremente. Encuentre la entrada de energía requerida para elevar la temperatura a 700 K.

17. Una muestra de 1,00 mol de un gas ideal diatómico tiene presión P y volumen V. Cuando el gas se calienta, su presión se triplica y su volumen se duplica. Este proceso de calentamiento incluye dos pasos, el primero a presión constante y el segundo a volumen constante. Determine la cantidad de energía transferida al gas por calor.

#### Sección 21.3 Procesos adiabáticos para un gas ideal

18. Durante la carrera de compresión de cierto motor de gasolina, la presión aumenta de 1,00 atm a 20,0 atm. Si el proceso es adiabático y la mezcla aire-combustible se comporta como un gas ideal diatómico, (a) ¿en qué factor cambia el volumen y (b) en qué factor cambia la temperatura? (c) Suponiendo que la compresión comienza con 0,016 0 mol de gas a 27,0 °C, encuentre los valores de Q, W y E que caracterizan el proceso.

19. Una muestra de 2,00 mol de un gas ideal diatómico se expande lenta y adiabáticamente desde una presión de 5,00 atm y un volumen de 12,0 L hasta un volumen final de 30,0 L. a) ¿Cuál es la presión final del gas? (b) ¿Cuáles son las temperaturas inicial y final? (c) Halle Q, W y E. Se introduce aire (un gas ideal diatómico) a 27,0 °C y presión atmosférica en una bomba de bicicleta que tiene un cilindro con un diámetro interior de 2,50 cm y una longitud de 50,0 cm. La carrera descendente comprime adiabáticamente el aire, que alcanza una presión manométrica de 800 kPa antes de entrar en el neumático (figura P21.20). Determine (a) el volumen del aire comprimido y (b) la temperatura del aire comprimido. (c) ¿Qué pasa si? La bomba está hecha de acero y tiene una pared interior de 2,00 mm de espesor. Suponga 4,00 cm de la



Figura P21.20

se permite que la longitud del cilindro alcance el equilibrio térmico con el aire. ¿Cuál será el aumento en la temperatura de la pared?

- 21.** El aire en una nube de tormenta se expande a medida que asciende. Si su temperatura inicial es de 300 K y no se pierde energía por conducción térmica en la expansión, ¿cuál es su temperatura cuando el volumen inicial se ha duplicado?
- 22.** Durante la carrera de potencia en un motor de automóvil de cuatro tiempos, el pistón es forzado hacia abajo a medida que la mezcla de productos de combustión y aire experimenta una expansión adiabática. Suponga que (1) el motor está funcionando a 2 500 ciclos/min; (2) la presión manométrica justo antes de la expansión es de 20,0 atm; (3) los volúmenes de la mezcla justo antes y después de la expansión son 50,0 y 400 cm<sup>3</sup>, respectivamente (figura P21.22); (4) el intervalo de tiempo para la expansión es un cuarto del ciclo total; y (5) la mezcla se comporta como un gas ideal con una relación de calor específico de 1,40. Encuentre la potencia promedio generada durante la carrera de expansión.

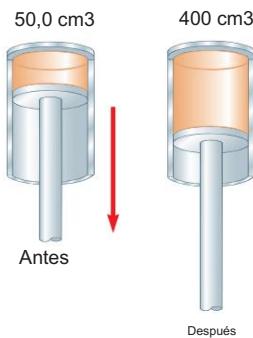


Figura P21.22

- 23.** Una muestra de 4,00 L de un gas ideal diatómico con una relación de calor específico de 1,40, confinada a un cilindro, se lleva a través de un ciclo cerrado. El gas está inicialmente a 1.00 atm y a 300 K. Primero, su presión se triplica a volumen constante. Luego, se expande adiabáticamente a su presión original. Finalmente, el gas se comprime isobáricamente a su volumen original. (a) Dibuje un diagrama PV de este ciclo. (b) Determine el volumen del gas al final de la expansión adiabática. (c) Encuentre la temperatura del gas al comienzo de la expansión adiabática. (d) Encuentre la temperatura al final del ciclo. (e) ¿Cuál fue el trabajo neto realizado sobre el gas para este ciclo?
- 24.** Un gas ideal diatómico ( $\gamma = 1.40$ ) confinado a un cilindro se somete a un ciclo cerrado. Inicialmente, el gas está en  $P_i$ ,  $V_i$  y  $T_i$ . Primero, su presión se triplica a volumen constante. Luego se expande adiabáticamente a su presión original y finalmente se comprime isobáricamente a su volumen original. (a) Dibuje un diagrama PV de este ciclo. (b) Determine el volumen al final de la expansión adiabática. Encuentre (c) la temperatura del gas al comienzo de la expansión adiabática y (d) la temperatura al final del ciclo. (e) ¿Cuál fue el trabajo neto realizado sobre el gas para este ciclo?
- 25.** ¿Cuánto trabajo se requiere para comprimir 5,00 mol de aire a 20,0 °C y 1,00 atm a una décima parte del volumen original (a) mediante un proceso isotérmico? (b) ¿Qué pasa si? ¿Cuánto trabajo se requiere para producir la misma compresión en un proceso adiabático? (c) ¿Cuál es la presión final en cada uno de estos dos casos?

#### Sección 21.4 Equipartición de la energía 26. Cierta

molécula tiene  $f$  grados de libertad. Demuestre que un gas ideal formado por tales moléculas tiene las siguientes propiedades: (1) su energía interna total es  $fNR/2$ , (2) su calor específico molar a volumen constante es  $fR/2$ , (3) su calor específico molar a volumen constante la presión es  $(f/2)R/2$ , y (4) su relación de calor específico es  $\gamma = CP/CV = (f/2)/f$ .

- 27.** Considere 2,00 mol de un gas diatómico ideal. (a) Encuentre la capacidad calorífica total definida por la ecuación 20.2 a volumen constante y la capacidad calorífica total a presión constante, suponiendo que las moléculas giran pero no vibran. (b) ¿Qué pasa si? Repita la parte (a), suponiendo que las moléculas giran y vibran.
- 28.** En un modelo rudimentario (figura P21.28) de una molécula diatómica de cloro (Cl<sub>2</sub>) que gira, los dos átomos de Cl están separados por 2,00 10<sup>-10</sup> m y giran alrededor de su centro de masa con velocidad angular  $v = 2,00 \times 10^{12}$  rad/s. ¿Cuál es la energía cinética de rotación de una molécula de Cl<sub>2</sub>, que tiene una masa molar de 70,0 g/mol?

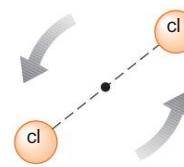


Figura P21.28

- 29.** Examine los datos de los gases poliatómicos en la tabla 21.2 y dé una razón por la cual el dióxido de azufre tiene un calor específico más alto a volumen constante que los otros gases poliatómicos a 300 K.
- 30.** Una molécula triatómica puede tener los tres átomos alineados, como el CO<sub>2</sub>, o puede ser no lineal, como el H<sub>2</sub>O. Suponga que la temperatura de un gas de moléculas triatómicas es lo suficientemente baja como para que el movimiento vibratorio sea despreciable. ¿Cuál es la capacidad calorífica molar a volumen constante, expresada como un múltiplo de la constante universal de los gases, (a) si las moléculas son lineales y (b) si las moléculas no son lineales? A altas temperaturas, una molécula triatómica tiene dos modos de vibración, y cada uno contribuye con  $2R$  al  $\frac{1}{2}$  capacidad calorífica molar por su energía cinética y otra  $2R$  por su energía potencial. Identifique la capacidad calorífica molar a alta temperatura a volumen constante para un gas ideal triatómico de (c) moléculas lineales y de (d) moléculas no lineales. (e) Explique cómo se pueden usar los datos de calor específico para determinar si una molécula triatómica es lineal o no lineal. ¿Son suficientes los datos de la tabla 21.2 para hacer esta determinación?

#### Sección 21.5 Distribución de velocidades moleculares 31.

**Quince** partículas idénticas tienen varias velocidades: una tiene una velocidad de 2,00 m/s, dos tienen velocidades de 3,00 m/s, tres tienen velocidades de 5,00 m/s, cuatro tienen velocidades de 7,00 m/s, tres tienen velocidades de 9,00 m/s y dos tienen velocidades de 12,0 m/s. Encuentre (a) la velocidad promedio, (b) la velocidad rms y (c) la velocidad más probable de estas partículas.

- 32.** Un metro cúbico de hidrógeno atómico a 0°C a presión atmosférica contiene aproximadamente  $2,70 \times 10^{25}$  átomos. El primer estado excitado del átomo de hidrógeno tiene una energía de 10,2 eV por encima del nivel de energía más bajo, llamado suelo.

- estado. Use el factor de Boltzmann para encontrar el número de átomos en el primer estado excitado a 0 °C y a 10 000 °C.
- 33.** A partir de la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann, demuestre que la velocidad más probable de una molécula de gas viene dada por la ecuación 21.27. Observe que la velocidad más probable corresponde al punto en el que la pendiente de la curva de distribución de velocidad  $dN/dv$  es cero.
34. Dos gases en una mezcla se difunden a través de un filtro a tasas proporcionales a las velocidades rms de los gases. (a) Encuentre la relación de velocidades para los dos isótopos de cloro,  $^{35}\text{Cl}$  y  $^{37}\text{Cl}$ , a medida que se difunden por el aire. (b) ¿Qué isótopo se mueve más rápido?
35. Problema de repaso. ¿A qué temperatura la velocidad promedio de los átomos de helio sería igual a (a) la velocidad de escape de la Tierra, 1.12 104 m/s y (b) la velocidad de escape de la Luna, 2.37 103 m/s? (Vea el Capítulo 13 para una discusión de la velocidad de escape.) Nota: La masa de un átomo de helio es 6.64 1027 kg.
36. Calcule (a) la velocidad más probable, (b) la velocidad promedio y (c) la velocidad rms para moléculas de gas nitrógeno a 900 K. (d) Indique cómo se comparan sus resultados con los valores que se muestran en la figura activa 21.11.
37. Suponga que la atmósfera de la Tierra tiene una temperatura uniforme de 20 °C y una composición uniforme, con una masa molar efectiva de 28,9 g/mol. (a) Demuestre que la densidad numérica de las moléculas depende de la altura y sobre el nivel del mar de acuerdo con
- $$nV \propto e^{-m_0 g y / kT}$$
- donde  $n_0$  es la densidad numérica al nivel del mar (donde  $y = 0$ ). Este resultado se llama la ley de las atmósferas. (b) Los aviones comerciales normalmente vuelan a una altitud de 11,0 km. Encuentre la relación entre la densidad atmosférica allí y la densidad al nivel del mar.
38. Si no puedes caminar al espacio exterior, ¿puedes al menos caminar hasta la mitad? Usa la ley de las atmósferas del Problema 37. La altura promedio de una molécula en la atmósfera de la Tierra está dada por
- $$\bar{y} = \frac{\ln V}{\ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)} = \frac{\ln \left( \frac{P_f}{P_i} \right)}{\ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right)}$$
- (a) Demuestre que esta altura promedio es igual a  $kBT/m_0g$ . (b) Evalúe la altura promedio, suponiendo que la temperatura es de 10 °C y la masa molecular es de 28,9 u, ambas uniformes en toda la atmósfera.
- Problemas adicionales**
39. La función  $Eint = 3.50nRT$  describe la energía interna de cierto gas ideal. Una muestra de 2.00 mol del gas siempre comienza a una presión de 100 kPa y una temperatura de 300 K. Para cada uno de los siguientes procesos, determine la presión, el volumen y la temperatura finales; el cambio en la energía interna del gas; la energía añadida al gas por calor; y el trabajo realizado sobre el gas. (a) El gas se calienta a presión constante a 400 K. (b) El gas se calienta a volumen constante a 400 K. (c) El gas se comprime a temperatura constante a 120 kPa. (d) El gas se comprime adiabáticamente a 120 kPa.
40. Las dimensiones de un salón de clases son 4.20 m x 3.00 m x 2.50 m. (a) Halle el número de moléculas de aire que contiene a presión atmosférica y 20,0 °C. (b) Encuentre la masa de
- este aire, suponiendo que el aire consiste en moléculas diatómicas con una masa molar de 28,9 g/mol. (c) Encuentre la energía cinética promedio de una molécula. (d) Encuentre la velocidad molecular de la raíz cuadrada media. (e) Suponiendo que el calor específico molar es una constante independiente de la temperatura,  $5nRT/2$ . Encuentre la energía interna en el aire.  
**E int**
- (f) ¿Y si? Encuentre la energía interna del aire en la habitación a 25,0 °C. Explique cómo se compara con el resultado a 20,0 °C y cómo sucede de esa manera.
41. En una muestra de un metal sólido, cada átomo es libre de vibrar alrededor de alguna posición de equilibrio. La energía del átomo consiste en la energía cinética para el movimiento en las direcciones x, y y z más la energía potencial elástica asociada con las fuerzas de la ley de Hooke ejercidas por los átomos vecinos en las direcciones x, y y z. De acuerdo con el teorema de equipartición de energía, suponga que la energía promedio de cada átomo es para cada grado de libertad. (a) Demuestre  $2kT$  que el calor específico molar del sólido es 3R. La ley de Dulong-Petit establece que este resultado generalmente describe sólidos puros a temperaturas suficientemente altas. (Puede ignorar la diferencia entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante.) (b) Evalúe el calor específico  $c$  del hierro. Explique cómo se compara con el valor que figura en la tabla 20.1. (c) Repita la evaluación y comparación para el oro.
42. Veinte partículas, cada una de masa  $m_0$  y confinada a un volumen  $V$ , tienen varias velocidades: dos tienen velocidad  $v$ , tres tienen velocidad  $2v$ , cinco tienen velocidad  $3v$ , cuatro tienen velocidad  $4v$ , tres tienen velocidad  $5v$ , dos tienen velocidad  $6v$ , y uno tiene velocidad  $7v$ . Encuentre (a) la velocidad promedio, (b) la velocidad rms, (c) la velocidad más probable, (d) la presión que ejercen sobre las paredes del recipiente y (e) la energía cinética promedio por partícula.
43. Un cilindro que contiene  $n$  mol de un gas ideal sufre un proceso adiabático. (a) Comenzando con la expresión  $W = P(V_f - V_i)$  y usando la condición  $PV = g$  constante, demuestre que el trabajo realizado sobre el gas es
- $$W = nRT_i \left( \frac{1}{P_f} - \frac{1}{P_i} \right)$$
- (b) Comenzando con la primera ley de la termodinámica en forma diferencial, demuestre que el trabajo realizado sobre el gas es igual a  $nC_V(T_f - T_i)$ . Explique si estos dos resultados son consistentes entre sí.
44. Cuando una muestra de 1,00 mol de un gas ideal monoatómico se expande adiabáticamente, el trabajo realizado sobre ella es  $-2500 \text{ J}$ . La temperatura y la presión iniciales del gas son 500 K y 3,60 atm. Calcule (a) la temperatura final y (b) la presión final. Puede usar el resultado del Problema 43.
45. Un cilindro está cerrado por ambos extremos y tiene paredes aislantes. Está dividido en dos compartimentos por una partición adiabática que es perpendicular al eje del cilindro. Cada compartimiento contiene 1.00 mol de oxígeno que se comporta como un gas ideal con Inicialmente, los dos compartimentos tienen volúmenes iguales y sus temperaturas son 550 K y 250 K. Luego se permite que la partición se mueva lentamente hasta que las presiones en sus dos lados sean iguales. Encuentre las temperaturas finales en los dos compartimentos. Puede usar el resultado del Problema 43.
46. Un rifle de aire dispara un perdigón de plomo al permitir que el aire a alta presión se expanda, impulsando el perdigón por el cañón del rifle. Debido a que este proceso ocurre muy rápidamente, no se aprecia

se produce conducción térmica y la expansión es esencialmente adiabática. Suponga que el rifle comienza con 12,0 cm<sup>3</sup> de aire comprimido, que se comporta como un gas ideal con g 1,40. El aire en expansión empuja un perdigón de 1,10 g como un pistón con un área de sección transversal de 0,030 0 cm<sup>2</sup> a lo largo del cañón del arma, de 50,0 cm de largo. El perdigón emerge con una velocidad inicial de 120 m/s. Use el resultado del Problema 43 para encontrar la presión inicial requerida.

- 47.** Problema de repaso. El oxígeno a presiones mucho mayores que 1 atm es tóxico para las células pulmonares. Suponga que un buceador de aguas profundas respira una mezcla de oxígeno (O<sub>2</sub>) y helio (He). Por peso, ¿qué proporción de helio a oxígeno se debe usar si el buzo está a una profundidad del océano de 50,0 m? 104 moléculas de oxígeno a
- 48.** Un recipiente contiene 1.00 500 K. (a) Haga una gráfica precisa de la función de distribución de velocidad de Maxwell frente a la velocidad con puntos en intervalos de velocidad de 100 m/s. (b) Determine la velocidad más probable a partir de este gráfico. (c) Calcule las velocidades promedio y rms de las moléculas y marque estos puntos en su gráfico. (d) A partir del gráfico, estime la fracción de moléculas con velocidades en el rango de 300 m/s a 600 m/s.

- 49.** La compresibilidad k de una sustancia se define como el cambio fraccionario de volumen de esa sustancia para un cambio de presión dado:

$$k = \frac{1}{V} \frac{dV}{dP}$$

(a) Explique por qué el signo negativo en esta expresión asegura que k sea siempre positivo. (b) Demuestre que si un gas ideal se comprime isotérmicamente, su compresibilidad viene dada por  $k_1 = 1/P$ . (c) ¿Qué pasa si? Demuestre que si un gas ideal se comprime adiabáticamente, su compresibilidad está dada por  $k_2 = 1/gP$ . (d) Determine los valores de  $k_1$  y  $k_2$  para un gas ideal monoatómico a una presión de 2,00 atm.

- 50.** Problema de repaso. (a) Demuestre que la velocidad del sonido en un gas ideal es

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

donde M es la masa molar. Use la expresión general para la velocidad del sonido en un fluido de la Sección 17.1; la definición del módulo volumétrico de la Sección 12.4; y el resultado del problema 49 anterior. Cuando una onda de sonido pasa a través de un gas, las compresiones son tan rápidas o tan separadas que la conducción térmica se evita por un intervalo de tiempo insignificante o por el espesor efectivo del aislamiento. Las compresiones y rarefacciones son adiabáticas. (b) Calcule la velocidad teórica del sonido en el aire a 20 °C y establezca cómo se compara con el valor de la tabla 17.1. Tome M 28,9 g/mol. (c) Demuestre que la velocidad del sonido en un gas ideal es

$$v = \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

donde m es la masa de una molécula. Indique cómo se compara con las velocidades moleculares más probable, promedio y rms.

- 51.** El calor latente de vaporización del agua a temperatura ambiente es de 2 430 J/g. Considere una molécula particular en la superficie de un vaso de agua líquida, moviéndose hacia arriba con una velocidad lo suficientemente alta como para que sea la próxima molécula en unirse al vapor. (a) Encuentre su energía cinética de traslación.

(b) Encuentre su velocidad. (c) Ahora considere un gas delgado hecho solo de moléculas como esa. ¿Cuál es su temperatura? ¿Por qué no te quemas al evaporar el agua?

- 52.** Movimiento browniano. El movimiento molecular es invisible en sí mismo.

Cuando una partícula pequeña está suspendida en un fluido, el bombardeo de moléculas hace que la partícula se mueva al azar. Robert Brown descubrió este movimiento en 1827 mientras estudiaba la fertilización de las plantas. Albert Einstein lo analizó en 1905 y Jean Perrin lo utilizó para una de las primeras mediciones del número de Avogadro. La energía cinética promedio de la partícula visible puede tomarse como la misma que la de un mol 2kBT cule en un gas ideal. Considera una partícula esférica densidad 1 000 kg/m<sup>3</sup> en agua a 20 °C. (a) Para una partícula de diámetro d, evalúe la velocidad rms. (b) El movimiento real de la partícula es un paseo aleatorio, pero imagine que se mueve con una velocidad constante igual en magnitud a su velocidad rms.

¿En qué intervalo de tiempo se movería una distancia igual a su propio diámetro? (c) Evalúe la velocidad rms y el intervalo de tiempo para una partícula de 3,00 mm de diámetro. (d) Evalúe la velocidad rms y el intervalo de tiempo para una esfera de 70.0 kg de masa, modelando su propio cuerpo. (e) Encuentre el diámetro de una partícula cuya velocidad rms es igual a su propio diámetro dividido por 1 s. (f) Explique si sus resultados sugieren que existe un tamaño de partícula óptimo para la observación del movimiento browniano.

- 53.** Modelé el aire como un gas ideal diatómico con M 28,9 g/mol. Un cilindro con un pistón contiene 1,20 kg de aire a 25,0 °C y 200 kPa. La energía se transfiere por calor al sistema a medida que se le permite expandirse, con la presión aumentando a 400 kPa. A lo largo de la expansión, la relación entre presión y volumen viene dada por

$$PCV = 1 > 2$$

donde C es una constante. (a) Encuentre el volumen inicial. (b) Encuentre el volumen final. (c) Encuentre la temperatura final. (d) Encuentre el trabajo realizado en el aire. (e) Encuentre la energía transferida por el calor.

- 54.** ¡Fumando! Un lanzador lanza una pelota de béisbol de 0,142 kg a 47,2 m/s. A medida que viaja 19,4 m hasta el plato, la pelota se desacelera a 42,5 m/s debido a la resistencia del aire. Encuentre el cambio de temperatura del aire a través del cual pasa. Para encontrar el mayor cambio de temperatura posible, puede hacer las siguientes suposiciones. El aire tiene un calor específico molar de CP 7R/2 y una masa molar equivalente de 28,9 g/mol.

El proceso es tan rápido que la cubierta de la pelota de béisbol actúa como aislante térmico y la temperatura de la pelota en sí no cambia. Inicialmente ocurre un cambio de temperatura solo para el aire en un cilindro de 19,4 m de longitud y 3,70 cm de radio. Este aire está inicialmente a 20.0 °C.

- 55.** Para un gas maxwelliano, use una computadora o una calculadora programable para encontrar el valor numérico de la relación

$Nv(v)/Nv(v_{mp})$  para los siguientes valores de v: v (v<sub>mp</sub>/50), (v<sub>mp</sub>/10), (v<sub>mp</sub>/2), v<sub>mp</sub>, 2v<sub>mp</sub>, 10v<sub>mp</sub>, 50v<sub>mp</sub>. Da tus resultados con tres cifras significativas.

- 56.** Considere las partículas en una centrífuga de gas, un dispositivo que se usa para separar partículas de diferente masa haciéndolas girar en una trayectoria circular de radio r a velocidad angular v. La fuerza centrípeta que actúa sobre una partícula es  $m_0 v^2 r$ . (a) Discuta cómo se puede usar una centrífuga de gas para separar partículas de diferente masa. (b) Demuestre que la densidad de las partículas en función de r es

$$n = \frac{1}{r^2} \frac{1}{m_0} \frac{v^2}{2k_B T}$$

57. Verifique las Ecuaciones 21.25 y 21.26 para el rms y la velocidad promedio de las moléculas de un gas a una temperatura T. El valor promedio de  $v_n$  es

$$\frac{1}{v_n} \int_0^{\infty} v n v^n dv$$

Use la tabla de integrales B.6 en el Apéndice B.

58. En el diagrama PV de un gas ideal, una curva isotérmica y una curva adiabática pasan por cada punto. Demuestre que la pendiente de la curva adiabática es más pronunciada que la pendiente de la isoterma por el factor  $\gamma$ .
59. Una muestra de gas ideal monoatómico ocupa 5.00 L a presión atmosférica y 300 K (punto A en la figura P21.59). Se calienta a volumen constante hasta 3.00 atm (punto B).

Luego se le permite expandirse isotérmicamente a 1.00 atm (punto C) y finalmente se comprime isobáricamente a su estado original. (a) Encuentre el número de moles en la muestra. (b) Encuentre la temperatura en los puntos B y C y el volumen en el punto C. (c) Suponga que el calor específico molar no depende de la temperatura, de modo que  $E = 3nRT/2$ . Encuentre la energía interna en los puntos A, B y C. (d) Tabular P, V, T y E en los estados en los puntos A, B y C. (e) Ahora considere los procesos A S B, B S C, y CSA .

Describe cómo llevar a cabo cada proceso experimentalmente. (f) Encuentre Q, W y E el  $\Delta_{\text{int}}$  para cada uno de los procesos. (g) para ciclo completo A S B S C S A, encuentre Q, W y E

$\Delta_{\text{int}}$

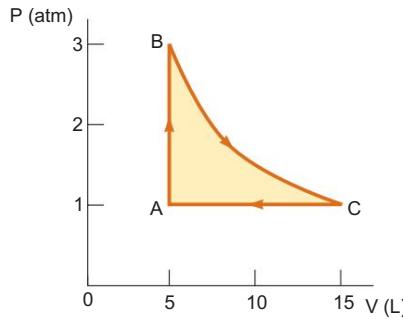


Figura P21.59

## Respuestas a cuestionarios rápidos

- 21.1 (i), (b). La energía cinética de traslación promedio por molécula es función únicamente de la temperatura. (ii), (a).

Como hay el doble de moléculas y la temperatura de ambos recipientes es la misma, la energía total en B es el doble que en A.

- 21.2 (i), (a). De acuerdo con la Ecuación 21.10,  $E_{\text{int}}$  es una función de temperatura solamente. Debido a que la temperatura aumenta, la energía interna aumenta. (ii), (c). A lo largo de una iso-

60. Este problema puede ayudarte a pensar en el tamaño de las moléculas. En Beijing, un restaurante mantiene una olla de caldo de pollo hirviendo continuamente. Cada mañana se rellena para contener 10,0 L de agua, junto con un pollo fresco, verduras y especias. La sopa se revuelve bien.

La masa molar del agua es 18,0 g/mol. (a) Encuentre el número de moléculas de agua en la olla. (b) Durante cierto mes, el 90.0% del caldo se sirvió cada día a personas que luego emigraron inmediatamente. De las moléculas de agua en la olla el primer día del mes, ¿cuándo fue probable que se haya sacado la última de la olla? (c) El caldo ha estado hirviendo a fuego lento durante siglos, a través de guerras, terremotos y reparaciones de estufas. Suponga que el agua que estaba en la olla hace mucho tiempo se ha mezclado completamente con la hidrosfera de la Tierra, de masa 1.32 1021 kg. ¿Cuántas de las moléculas de agua que originalmente estaban en la olla probablemente vuelvan a estar presentes hoy?

61. Problema de repaso. (a) Si tiene suficiente energía cinética, una molécula en la superficie de la Tierra puede "escapar de la gravitación de la Tierra" en el sentido de que puede continuar alejándose de la Tierra para siempre, como se explicó en la Sección 13.6. Utilizando el principio de conservación de la energía, demuestre que la energía cinética mínima necesaria para el "escape" es donde  $m_0$  es la masa caída de la molécula,  $g$  es el  $m_0 g R_E$  libre , la aceleración de en la superficie y  $R_E$  es el radio de la Tierra. (b) Calcule la temperatura para la cual la energía cinética de escape mínima es diez veces la energía cinética promedio de una molécula de oxígeno.

62. Usando múltiples rayos láser, los físicos han podido enfriar y atrapar átomos de sodio en una pequeña región. En un experimento, la temperatura de los átomos se redujo a 0,240 mK. (a) Determine la velocidad rms de los átomos de sodio a esta temperatura. Los átomos pueden quedar atrapados durante aproximadamente 1,00 s. La trampa tiene una dimensión lineal de aproximadamente 1,00 cm. (b) ¿Durante qué intervalo de tiempo aproximado un átomo saldría de la región de la trampa si no hubiera acción de atrapamiento?

termia,  $T$  es constante por definición. Por lo tanto, la energía interna del gas no cambia. 21.3 (d). El valor

- de 29,1 J/mol K es  $7R/2$ . Según la figura 21.7, este resultado sugiere que se están produciendo los tres tipos de movimiento. 21.4 (c). El valor más alto posible de  $CV$

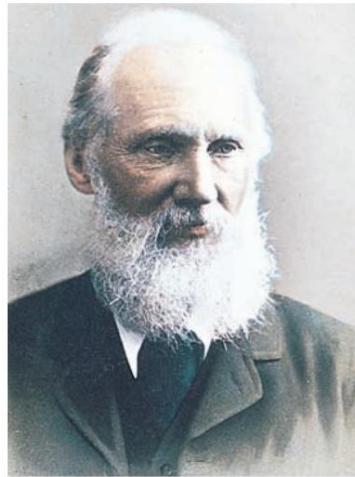
para un gas diatómico es  $7R/2$ , por lo que el gas debe ser poliatómico.



Esta obra de arte por computadora muestra el interior del cilindro del motor de un automóvil en el momento en que la bujía (arriba a la izquierda) se dispara y enciende la mezcla de aire y combustible. Los gases en expansión empujan hacia abajo el pistón (abajo a la derecha), lo que finalmente genera energía para las ruedas motrices del automóvil. Un motor de automóvil es un ejemplo de un motor térmico, que estudiamos en este capítulo. (Roger Harris/Biblioteca de fotografías científicas)

- |  |   |
|--|---|
| 22.1 Motores térmicos y la segunda ley de la termodinámica 22.2<br>Bombas de calor y refrigeradores<br>22.3 Reversible y Procesos irreversibles<br>22.4 La máquina de Carnot | 22.5 Motores de gasolina y diesel<br>22.6 Entropía<br>22.7 Cambios de entropía en procesos irreversibles<br>22.8 Entropía a escala microscópica |
|--|---|

## 22 Los motores térmicos, la entropía y la Segunda Ley de la Termodinámica



LORD KELVIN

Físico y matemático británico (1824–1907)

Nacido como William Thomson en Belfast, Kelvin fue el primero en proponer el uso de una escala absoluta de temperatura. La escala de temperatura Kelvin lleva su nombre en su honor. El trabajo de Kelvin en termodinámica condujo a la idea de que la energía no puede pasar espontáneamente de un objeto más frío a un objeto más caliente.

La primera ley de la termodinámica, que estudiamos en el capítulo 20, es un enunciado de la conservación de la energía. Esta ley establece que un cambio en la energía interna de un sistema puede ocurrir como resultado de la transferencia de energía por calor, por trabajo o por ambos. Aunque la primera ley de la termodinámica es muy importante, no hace distinción entre los procesos que ocurren espontáneamente y los que no. Sin embargo, sólo ciertos tipos de procesos de conversión y transferencia de energía tienen lugar realmente en la naturaleza. La segunda ley de la termodinámica, el tema principal de este capítulo, establece qué procesos ocurren y cuáles no. Los siguientes son ejemplos de procesos que no violan la primera ley de la termodinámica si proceden en cualquier dirección, pero en realidad se observa que proceden en una sola dirección:

- Cuando dos objetos a diferentes temperaturas se ponen en contacto térmico entre sí, la transferencia neta de energía por calor siempre es del objeto más caliente al objeto más frío, nunca del más frío al más caliente.
- Una pelota de goma que se deja caer al suelo rebota varias veces y finalmente se detiene, pero una pelota que está en el suelo nunca acumula energía interna del suelo y comienza a rebotar por sí sola. ■ Un péndulo que oscila finalmente se detiene debido a las colisiones con las moléculas de aire y la fricción en el punto de suspensión. La energía mecánica del sistema se convierte en energía interna en el aire, el péndulo y la suspensión; la conversión inversa de energía nunca ocurre.

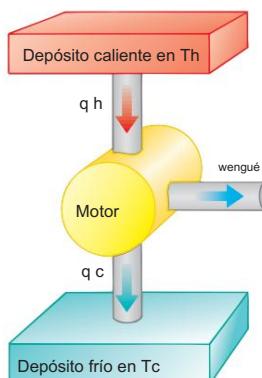
Todos estos procesos son irreversibles; es decir, son procesos que ocurren naturalmente en una sola dirección. Nunca se ha observado que un proceso irreversible retroceda. Si lo hiciera, violaría la segunda ley de la termodinámica.<sup>1</sup>

## 22.1 Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

Una máquina térmica es un dispositivo que toma energía por calor<sup>2</sup> y, operando en un proceso cíclico, expulsa una fracción de esa energía por medio de trabajo. Por ejemplo, en un proceso típico mediante el cual una central eléctrica produce electricidad, se quema un combustible como el carbón y los gases producidos a alta temperatura se utilizan para convertir agua líquida en vapor. Este vapor se dirige a las palas de una turbina, poniéndola en rotación. La energía mecánica asociada con esta rotación se utiliza para impulsar un generador eléctrico. Otro dispositivo que se puede modelar como un motor térmico es el motor de combustión interna de un automóvil. Este dispositivo utiliza la energía de un combustible en llamas para realizar un trabajo en los pistones que da como resultado el movimiento del automóvil.

Una máquina térmica transporta alguna sustancia de trabajo a través de un proceso cíclico durante el cual (1) la sustancia de trabajo absorbe energía por calor de un depósito de energía a alta temperatura, (2) la máquina realiza trabajo y (3) la energía es expulsada por calor a un depósito de menor temperatura. Como ejemplo, considere el funcionamiento de una máquina de vapor (Fig. 22.1), que utiliza agua como sustancia de trabajo. El agua en una caldera absorbe energía del combustible quemado y se evapora en vapor, que luego realiza trabajo al expandirse contra un pistón. Después de que el vapor se enfriá y se condensa, el agua líquida producida regresa a la caldera y el ciclo se repite.

Es útil representar un motor térmico esquemáticamente como en la figura activa 22.2. El motor absorbe una cantidad de energía  $Q_h$  del depósito caliente. Para la discusión matemática de los motores térmicos, usamos valores absolutos para hacer que todas las transferencias de energía sean positivas y la dirección de la transferencia se indica con un signo positivo o negativo explícito. El motor realiza un trabajo  $W_{eng}$  (de modo que se realiza un trabajo negativo  $-W_{eng}$  sobre el motor) y luego cede una cantidad  $-Q_c$  al depósito frío de energía. Debido a que la sustancia de trabajo pasa por un ciclo, sus energías internas inicial y final son iguales:  $E_{int} = 0$ . Por lo tanto, a partir de la primera ley de la termodinámica,  $E_{int} = Q_h - W_{eng} - Q_c = 0$ , y el trabajo neto  $W_{eng}$  realizado por una máquina térmica es



**FIGURA ACTIVA 22.2**

Representación esquemática de una máquina térmica. El motor funciona  $W_{eng}$ . La flecha en la parte superior representa la energía  $Q_h$  que ingresa al motor. En la parte inferior,  $Q_c$  es la energía que sale del motor.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para seleccionar la eficiencia del motor y observar la transferencia de energía.

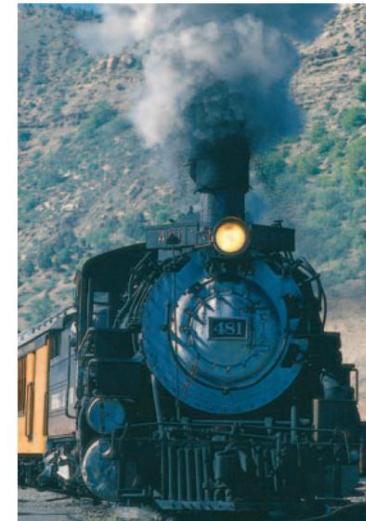


Figura 22.1 Esta locomotora a vapor va desde Durango hasta Silverton, Colorado. Obtiene su energía quemando madera o carbón. La energía generada vaporiza el agua en vapor, que impulsa la locomotora. (Esta locomotora debe tomar agua de tanques ubicados a lo largo de la ruta para reemplazar el vapor perdido por el embudo). Las locomotoras modernas usan combustible diesel en lugar de madera o carbón. Ya sean antiguas o modernas, estas locomotoras pueden modelarse como motores térmicos, que extraen energía de un combustible en llamas y convierten una fracción de ella en energía mecánica.

### PREVENCIÓN DE ERRORES 22.1 La Primera y la Segunda Ley

Observe la distinción entre la primera y la segunda ley de la termodinámica. Si un gas sufre un proceso isotérmico de una sola vez, entonces  $E_{int} = Q$  y  $W = 0$ . Por lo tanto, la primera ley permite que toda la entrada de energía por calor sea expulsada por trabajo. Sin embargo, en una máquina térmica en la que una sustancia experimenta un proceso cíclico, sólo una parte de la energía aportada por el calor puede ser expulsada mediante trabajo de acuerdo con la segunda ley.

<sup>1</sup> Aunque nunca se ha observado un proceso que ocurra en el sentido inverso al tiempo, es posible que ocurra. Sin embargo, como veremos más adelante en este capítulo, la probabilidad de que tal proceso ocurra es infinitesimalmente pequeña. Desde este punto de vista, los procesos ocurren con una probabilidad mucho mayor en una dirección que en la dirección opuesta.

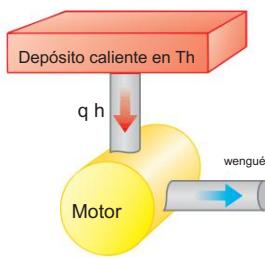
<sup>2</sup> Usamos el calor como nuestro modelo para la transferencia de energía a una máquina térmica. Sin embargo, son posibles otros métodos de transferencia de energía en el modelo de una máquina térmica. Por ejemplo, la atmósfera de la Tierra puede modelarse como un motor térmico en el que la transferencia de energía de entrada se realiza por medio de la radiación electromagnética del Sol. La salida del motor térmico atmosférico provoca la estructura del viento en la atmósfera.

igual a la energía neta  $Q_{net}$  que se le transfirió. Como puede ver en la figura activa 22.2,  $Q_{net} = Q_h - Q_c$ ; por lo tanto,

$$W_{eng} = Q_h - Q_c \quad (22.1)$$

La eficiencia térmica  $\epsilon$  de una máquina térmica se define como la relación entre el trabajo neto realizado por la máquina durante un ciclo y la entrada de energía a la temperatura más alta durante el ciclo:

Eficiencia térmica de un motor térmico



El motor imposible

Figura 22.3 Diagrama esquemático de una máquina térmica que toma energía de un depósito caliente y realiza una cantidad equivalente de trabajo. Es imposible construir un motor tan perfecto.

mi	wengué	$\frac{0Q_h - 0Q_c}{0Q_h}$	1	$\frac{0Q_c}{0Q_h}$
		0		

(22.2)

$0Q_h - 0Q_c$  Puede pensar en la eficiencia como la relación entre lo que gana (trabajo) y lo que da (transferencia de energía a la temperatura más alta). En la práctica, todas las máquinas térmicas expulsan solo una fracción de la energía de entrada  $Q_h$  mediante trabajo mecánico; en consecuencia, su eficiencia es siempre inferior al 100%. Por ejemplo, un buen motor de automóvil tiene una eficiencia de alrededor del 20 % y los motores diesel tienen eficiencias que van del 35 % al 40 %.

La ecuación 22.2 muestra que una máquina térmica tiene una eficiencia del 100% (e 1) solo si  $Q_c = 0$ , es decir, si no se expulsa energía al depósito frío. En otras palabras, una máquina térmica con eficiencia perfecta tendría que expulsar toda la energía de entrada mediante trabajo.

Debido a que las eficiencias de los motores reales están muy por debajo del 100 %, la forma de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica establece lo siguiente:

Es imposible construir una máquina térmica que, operando en un ciclo, no produzca otro efecto que la entrada de energía por el calor de un depósito y la realización de una cantidad igual de trabajo.

Este enunciado de la segunda ley significa que durante el funcionamiento de una máquina térmica,  $W_{eng}$  nunca puede ser igual a  $Q_h - Q_c$ , alternativamente, que alguna energía  $Q_c$  debe ser rechazada hacia el medio ambiente. La figura 22.3 es un diagrama esquemático de la imposible máquina térmica "perfecta".

**Pregunta rápida 22.1** La entrada de energía a un motor es 3,00 veces mayor que el trabajo que realiza. (i) ¿Cuál es su eficiencia térmica? (a) 3,00 (b) 1,00 (c) 0,333 (d) imposible de determinar (ii) ¿Qué fracción de la entrada de energía se expulsa al depósito frío? (a) 0,333 (b) 0,667 (c) 1,00 (d) imposible de determinar

### EJEMPLO 22.1

### La eficiencia de un motor

Un motor transfiere 2,00 103 J de energía de un depósito caliente durante un ciclo y transfiere 1,50 103 J como escape a un depósito frío.

(A) Encuentre la eficiencia del motor.

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar Revisar Figura activa 22.2; Piense en la energía que ingresa al motor desde el depósito caliente y se divide, con una parte saliendo por trabajo y otra por calor hacia el depósito frío.

Categorizar Este ejemplo implica la evaluación de cantidades a partir de las ecuaciones presentadas en esta sección, por lo que lo categorizamos como un problema de sustitución.

Encuentre la eficiencia del motor a partir de la Ecuación 22.2:

mi	$\frac{0Q_c}{0Q_h}$	1	$\frac{1,50 \cdot 10^3 \text{ J}}{2,00 \cdot 10^3 \text{ J}}$	0.250, o 25.0%
----	---------------------	---	---	----------------

(B) ¿Cuánto trabajo hace este motor en un ciclo?

**SOLUCIÓN**

Encuentre el trabajo realizado por el motor tomando la diferencia entre las energías de entrada y salida:

$$W_{eng} = Q_h - Q_c = 2,00 \cdot 10^3 \text{ J} - 1,50 \cdot 10^3 \text{ J}$$

5.0 102J
----------

**¿Y si?** Suponga que le preguntan por la potencia de salida de este motor. ¿Tiene suficiente información para responder a esta pregunta?

Respuesta No, no tiene suficiente información. La potencia de un motor es la velocidad a la que el motor realiza el trabajo. Sabe cuánto trabajo se realiza por ciclo, pero no tiene información sobre el intervalo de tiempo asociado con un ciclo. Sin embargo, si le dijieran que el motor funciona a 2 000 rpm (revoluciones por minuto), podría relacionar esta tasa con el período de rotación T del mecanismo del motor. Suponiendo que hay un ciclo termodinámico por revolución, la potencia es

$$\frac{\text{wengue}}{T} = \frac{5.0 \text{ 102J}}{1 \text{ 2'000 min}^2} \text{ a } 1.7 \text{ 104 W}$$

## 22.2 Bombas de calor y refrigeradores

En una máquina térmica, la dirección de la transferencia de energía es del depósito caliente al depósito frío, que es la dirección natural. El papel de la máquina térmica es procesar la energía del depósito caliente para realizar un trabajo útil. ¿Qué pasaría si quisieramos transferir energía del depósito frío al depósito caliente? Debido a que esa no es la dirección natural de la transferencia de energía, debemos poner algo de energía en un dispositivo para que tenga éxito. Los dispositivos que realizan esta tarea se denominan bombas de calor y refrigeradores. Por ejemplo, las casas en verano se enfrian usando bombas de calor llamadas acondicionadores de aire. El acondicionador de aire transfiere energía de la habitación fría de la casa al aire caliente del exterior.

En un refrigerador o una bomba de calor, el motor toma energía  $Q_c$  de un depósito frío y expulsa energía  $Q_h$  a un depósito caliente (figura activa 22.4), lo que se puede lograr solo si se realiza trabajo en el motor. De la primera ley sabemos que la energía cedida al depósito caliente debe ser igual a la suma del trabajo realizado y la energía absorbida del depósito frío. Por lo tanto, el refrigerador o bomba de calor transfiere energía de un cuerpo más frío (por ejemplo, el contenido de un refrigerador de cocina o el aire de invierno fuera de un edificio) a un cuerpo más caliente (el aire de la cocina o una habitación del edificio). En la práctica, es deseable llevar a cabo este proceso con un mínimo de trabajo. Si el proceso pudiera llevarse a cabo sin hacer ningún trabajo, el refrigerador o la bomba de calor serían "perfectos" (Fig. 22.5).

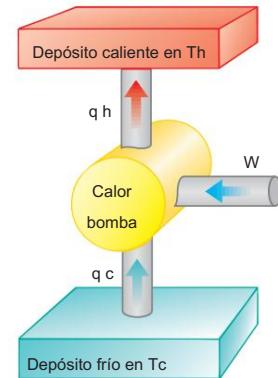
Una vez más, la existencia de tal dispositivo sería una violación de la segunda ley de la termodinámica, que en la forma del enunciado de Clausius<sup>3</sup> establece:

Es imposible construir una máquina cíclica cuyo único efecto sea transferir energía de forma continua mediante calor de un objeto a otro objeto a una temperatura más alta sin el aporte de energía mediante trabajo.

En términos más simples, la energía no se transfiere espontáneamente por calor de un objeto frío a un objeto caliente.

Los enunciados de Clausius y Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica parecen a primera vista no estar relacionados, pero de hecho son equivalentes en todos los aspectos. Aunque no lo demostramos aquí, si cualquiera de las afirmaciones es falsa, también lo es la otra.<sup>4</sup>

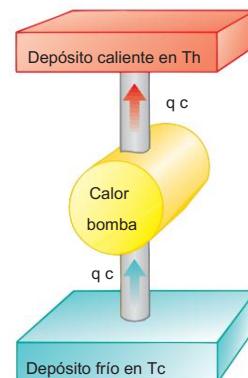
En la práctica, una bomba de calor incluye un fluido circulante que pasa a través de dos juegos de bobinas de metal que pueden intercambiar energía con el entorno. El fluido está frío ya baja presión cuando se encuentra en los serpentines ubicados en un ambiente fresco, donde absorbe energía por calor. El fluido tibio resultante se comprime y entra a las otras bobinas como un fluido caliente a alta presión. Allí libera su energía almacenada al cálido entorno. En un acondicionador de aire, la energía se absorbe en el fluido en bobinas ubicadas en el interior de un edificio; después de que se comprime el fluido, la energía sale del fluido a través de bobinas ubicadas al aire libre. En un refrigerador, las bobinas externas están detrás o



**FIGURA ACTIVA 22.4**

Diagrama esquemático de una bomba de calor, que toma energía  $Q_c$  de un depósito frío y expulsa energía  $Q_h$  a un depósito caliente. El trabajo  $W$  se realiza en la bomba de calor. Un refrigerador funciona de la misma manera.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para seleccionar el COP de la bomba de calor y observar la transferencia de energía.



bomba de calor imposible

Figura 22.5 Diagrama esquemático de una bomba de calor o refrigerador imposible, es decir, uno que toma energía de un reservorio frío y expulsa una cantidad equivalente de energía a un reservorio caliente sin la entrada de energía por trabajo.

<sup>3</sup> Expresado por primera vez por Rudolf Clausius (1822–1888).

<sup>4</sup> Ver un libro de texto avanzado sobre termodinámica para esta prueba.



Figura 22.6 Las bobinas en la parte posterior de un refrigerador transfieren energía al aire mediante calor. Debido a la entrada de energía por trabajo, esta cantidad de energía debe ser mayor que la cantidad de energía extraída del contenido del refrigerador.

debajo de la unidad (Fig. 22.6). Los serpentines internos están en las paredes del refrigerador y absorben la energía de los alimentos.

La eficacia de una bomba de calor se describe en términos de un número denominado coeficiente de rendimiento (COP). El COP es similar a la eficiencia térmica de un motor térmico en el sentido de que es una relación entre lo que gana (energía transferida hacia o desde un depósito) y lo que da (trabajo de entrada). Para una bomba de calor que funciona en el modo de refrigeración, "lo que se gana" es energía extraída del depósito frío. El refrigerador o acondicionador de aire más eficaz es el que extrae la mayor cantidad de energía del depósito frío a cambio de la menor cantidad de trabajo. Por lo tanto, para estos dispositivos que funcionan en el modo de enfriamiento, definimos el COP en términos de Q c:

$$\text{COP 1 modo de refrigeración} = \frac{Q_c}{W} \quad (22.3)$$

Un buen refrigerador debe tener un COP alto, típicamente 5 o 6.

Además de las aplicaciones de refrigeración, las bombas de calor son cada vez más populares para fines de calefacción. Los serpentines de absorción de energía de una bomba de calor se encuentran en el exterior de un edificio, en contacto con el aire o enterrados en el suelo. El otro juego de bobinas está en el interior del edificio. El fluido circulante que fluye a través de los serpentines absorbe energía del exterior y la libera al interior del edificio desde los serpentines interiores.

En el modo de calefacción, el COP de una bomba de calor se define como la relación entre la energía transferida al depósito caliente y el trabajo requerido para transferir esa energía:

$$\text{COP 1 modo calefacción} = \frac{\text{energía transferida a alta temperatura}}{\frac{Q_h}{W}} \quad (22.4)$$

Si la temperatura exterior es de 25 °F (4 °C) o más, un valor típico del COP para una bomba de calor es de aproximadamente 4. Es decir, la cantidad de energía transferida al edificio es aproximadamente cuatro veces mayor que el trabajo realizado por el motor en la bomba de calor. Sin embargo, a medida que la temperatura exterior disminuye, se vuelve más difícil para la bomba de calor extraer suficiente energía del aire y, por lo tanto, el COP disminuye. Por tanto, el uso de bombas de calor que extraen energía del aire, aunque satisfactorio en climas moderados, no es apropiado en zonas donde las temperaturas invernales son muy bajas. Es posible utilizar bombas de calor en áreas más frías enterrando los serpentines externos profundamente en el suelo. En ese caso, la energía se extrae del suelo, que tiende a ser más cálido que el aire en invierno.

---

**Pregunta rápida 22.2** La energía que ingresa a un calentador eléctrico por transmisión eléctrica se puede convertir en energía interna con una eficiencia del 100%. ¿En qué factor cambia el costo de calentar su casa cuando reemplaza su sistema de calefacción eléctrica con una bomba de calor eléctrica que tiene un COP de 4.00? Suponga que el motor que hace funcionar la bomba de calor es 100% eficiente. (a) 4.00 (b) 2.00 (c) 0.500 (d) 0.250

---

### EJEMPLO 22.2

#### Agua helada

Cierta heladera tiene un COP de 5.00. Cuando el refrigerador está funcionando, su entrada de energía es de 500 W. Una muestra de agua de 500 g de masa y temperatura de 20.0 °C se coloca en el compartimiento del congelador. ¿Cuánto tiempo se tarda en congelar el agua en hielo a 0°C? Suponga que todas las demás partes del refrigerador permanecen a la misma temperatura y que no hay fugas de energía desde el exterior, por lo que la operación del refrigerador solo resulta en la extracción de energía del agua.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar La energía sale del agua, reduce su temperatura y luego la congela en hielo. El intervalo de tiempo requerido para todo este proceso está relacionado con la velocidad a la que se extrae energía del agua, que, a su vez, está relacionada con la entrada de energía del refrigerador.

Categorizar Clasificamos este ejemplo como uno que combina nuestra comprensión de los cambios de temperatura y los cambios de fase del Capítulo 20 y nuestra comprensión de las bombas de calor de este capítulo.

Analizar Utilizando las Ecuaciones 20.4 y 20.7, encuentre la cantidad de energía que se debe extraer de 500 g de agua a 20 °C para convertirla en hielo a 0 °C:

$$\begin{array}{l} \text{0Q c 0} \\ \text{0mc } \cancel{\text{cT mLf}} \text{ 0 m 0c } \cancel{\text{cT Lf}} \text{ 0 0 10.500} \\ \text{kg2314 186 J>kg } \# ^\circ \text{C2 120.0°C23.33 105 J>kg4 0 2.08 105 J} \end{array}$$

Use la Ecuación 22.3 para encontrar cuánta energía debe suministrarse al refrigerador para extraer esta cantidad de energía del agua:

$$\begin{array}{rcl} \text{POLICIA} & \xrightarrow{\text{0Q c 0}} & \text{SO } - \\ \text{W} & & \text{POLICIA} \\ \hline & & \text{2.08 105J} \\ & & 5.00 \end{array}$$

Use la potencia nominal del refrigerador para encontrar el intervalo de tiempo requerido para que ocurra el proceso de congelación:

$$\begin{array}{rcl} \text{W} & & \text{W 4.17 104 J} \\ \cancel{\text{ct}} & & \hline 500\text{W} \\ & & 83.3 \text{ s} \end{array}$$

Finalizar En realidad, el intervalo de tiempo para que el agua se congele en un refrigerador es mucho más largo que 83.3 s, lo que sugiere que las suposiciones de nuestro modelo no son válidas. Sólo una pequeña parte de la energía extraída del interior del frigorífico en un intervalo de tiempo determinado procede del agua. También se debe extraer energía del recipiente en el que se coloca el agua, y se debe extraer energía que se filtra continuamente al interior desde el exterior.

## 22.3 Procesos reversibles e irreversibles

En la siguiente sección, analizaremos una máquina térmica teórica que es lo más eficiente posible.

Para comprender su naturaleza, primero debemos examinar el significado de los procesos reversibles e irreversibles. En un proceso reversible, el sistema que experimenta el proceso puede regresar a sus condiciones iniciales a lo largo del mismo camino en un diagrama PV, y cada punto a lo largo de este camino es un estado de equilibrio. Un proceso que no satisface estos requisitos es irreversible.

Se sabe que todos los procesos naturales son irreversibles. Examinemos la expansión libre adiabática de un gas, que ya se discutió en la Sección 20.6, y demostremos que no puede ser reversible. Considere un gas en un recipiente aislado térmicamente como se muestra en la figura 22.7. Una membrana separa el gas del vacío. Cuando se perfora la membrana, el gas se expande libremente en el vacío. A raíz del pinchazo, el sistema ha cambiado porque ocupa un mayor volumen tras la ampliación.

Debido a que el gas no ejerce una fuerza a través de un desplazamiento, no realiza trabajo sobre los alrededores a medida que se expande. Además, no se transfiere energía hacia o desde el gas por calor porque el recipiente está aislado de su entorno. Por tanto, en este proceso adiabático, el sistema ha cambiado pero el entorno no.

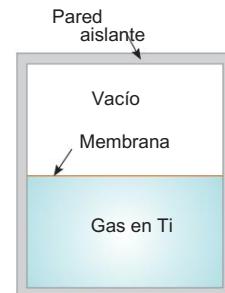
Para que este proceso sea reversible, debemos devolver el gas a su volumen y temperatura originales sin cambiar el entorno. Imagine tratar de revertir el proceso comprimiendo el gas a su volumen original. Para hacerlo, colocamos un pistón en el contenedor y usamos un motor para forzar el pistón hacia adentro. Durante este proceso, el entorno cambia porque un agente externo está realizando trabajo en el sistema.

Además, el sistema cambia porque la compresión aumenta la temperatura del gas. La temperatura del gas se puede reducir al permitir que entre en contacto con un depósito de energía externo. Aunque este paso devuelve el gas a sus condiciones originales, los alrededores se ven afectados nuevamente porque se agrega energía a los alrededores desde el gas. Si esta energía pudiera usarse para impulsar el motor que comprimió el gas, la transferencia neta de energía al entorno sería cero. De esta forma, el sistema y su entorno podrían volver a sus condiciones iniciales y podríamos identificar el proceso como reversible. Sin embargo, el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley especifica que la energía extraída del gas para devolver la temperatura a su valor original no puede convertirse completamente en energía mecánica en forma de trabajo realizado por el motor al comprimir el gas. Por lo tanto, debemos concluir que el proceso es irreversible.

### PREVENCIÓN DE ERRORES 22.2

Todos los procesos reales son irreversibles

El proceso reversible es una idealización; todos los procesos reales en la Tierra son irreversibles.



También podríamos argumentar que la expansión libre adiabática es irreversible al confiar en la parte de la definición de un proceso reversible que se refiere al equilibrio

Figura 22.7 Expansión libre adiabática de un gas.

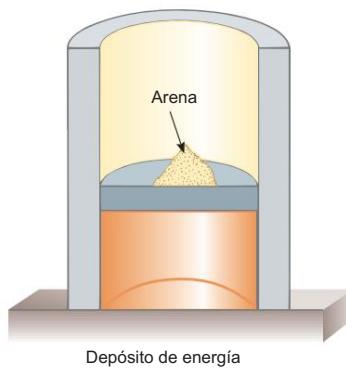


Figura 22.8 Un gas en contacto térmico con un depósito de energía se comprime lentamente a medida que los granos individuales de arena caen sobre el pistón. La compresión es isotérmica y reversible.

estados. Por ejemplo, durante la expansión repentina, se producen variaciones significativas de presión en todo el gas. Por lo tanto, no existe un valor bien definido de la presión para todo el sistema en ningún momento entre los estados inicial y final. De hecho, el proceso ni siquiera puede representarse como un camino en un diagrama PV. El diagrama PV para una expansión libre adiabática mostraría las condiciones inicial y final como puntos, pero estos puntos no estarían conectados por un camino. Por lo tanto, debido a que las condiciones intermedias entre los estados inicial y final no son estados de equilibrio, el proceso es irreversible.

Aunque todos los procesos reales son irreversibles, algunos son casi reversibles. Si un proceso real ocurre muy lentamente, de modo que el sistema siempre está casi en un estado de equilibrio, el proceso puede aproximarse como reversible. Supongamos que un gas se comprime isotérmicamente en una disposición de pistón-cilindro en la que el gas está en contacto térmico con un depósito de energía y transferimos continuamente la energía suficiente del gas al depósito para mantener la temperatura constante. Por ejemplo, imagine que el gas se comprime muy lentamente al dejar caer granos de arena sobre un pistón sin fricción, como se muestra en la figura 22.8. A medida que cada grano cae sobre el pistón y comprime una pequeña cantidad de gas, el sistema se desvía de un estado de equilibrio, pero está tan cerca de uno que alcanza un nuevo estado de equilibrio en un intervalo de tiempo relativamente corto. Cada grano agregado representa un cambio a un nuevo estado de equilibrio, pero las diferencias entre estados son tan pequeñas que el proceso completo puede aproximarse como si ocurriera a través de estados de equilibrio continuos.

El proceso se puede revertir quitando lentamente los granos del pistón.

Una característica general de un proceso reversible es que no puede haber efectos disipativos (como turbulencia o fricción) que conviertan la energía mecánica en energía interna. Dichos efectos pueden ser imposibles de eliminar por completo. Por lo tanto, no sorprende que los procesos reales en la naturaleza sean irreversibles.

## 22.4 La máquina de Carnot

En 1824, un ingeniero francés llamado Sadi Carnot describió un motor teórico, ahora llamado motor de Carnot, que es de gran importancia tanto desde el punto de vista práctico como teórico. Demostró que una máquina térmica que opera en un ciclo reversible ideal, llamado ciclo de Carnot, entre dos depósitos de energía es la máquina más eficiente posible. Tal motor ideal establece un límite superior en las eficiencias de todos los demás motores. Es decir, el trabajo neto realizado por una sustancia en funcionamiento durante el ciclo de Carnot es la mayor cantidad de trabajo posible para una cantidad dada de energía suministrada a la sustancia a la temperatura más alta. El teorema de Carnot se puede expresar de la siguiente manera:



SADI CARNOT

ingeniero francés (1796–1832)

Carnot fue el primero en mostrar la relación cuantitativa entre trabajo y calor. En 1824, publicó su único trabajo, *Reflexiones sobre la fuerza motriz del calor*, en el que reseñaba la importancia industrial, política y económica de la máquina de vapor. En él, definió el trabajo como "peso levantado a través de una altura".

Ninguna máquina térmica real que funcione entre dos depósitos de energía puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que funcione entre los mismos dos depósitos.

Para probar la validez de este teorema, imagine dos máquinas térmicas operando entre los mismos depósitos de energía. Uno es un motor de Carnot con eficiencia  $e_C$ , y el otro es un motor con eficiencia  $e$ , donde asumimos  $e < e_C$ . Como el ciclo de la máquina de Carnot es reversible, la máquina puede operar en reversa como un refrigerador. El motor más eficiente se usa para impulsar el motor de Carnot como un refrigerador de Carnot. La salida por trabajo del motor más eficiente se iguala a la entrada por trabajo del refrigerador de Carnot. Para la combinación de motor y frigorífico no se produce intercambio por trabajo con el entorno. Como hemos supuesto que el motor es más eficiente que el refrigerador, el resultado neto de la combinación es una transferencia de energía del depósito frío al caliente sin que se realice trabajo sobre la combinación. Según el enunciado de Clausius de la segunda ley, este proceso es imposible. Por lo tanto, la suposición de que  $e < e_C$  debe ser falsa. Todos los motores reales son menos eficientes que el motor de Carnot porque no funcionan a través de un ciclo reversible. La eficiencia de un motor real se reduce aún más por dificultades prácticas como la fricción y las pérdidas de energía por conducción.

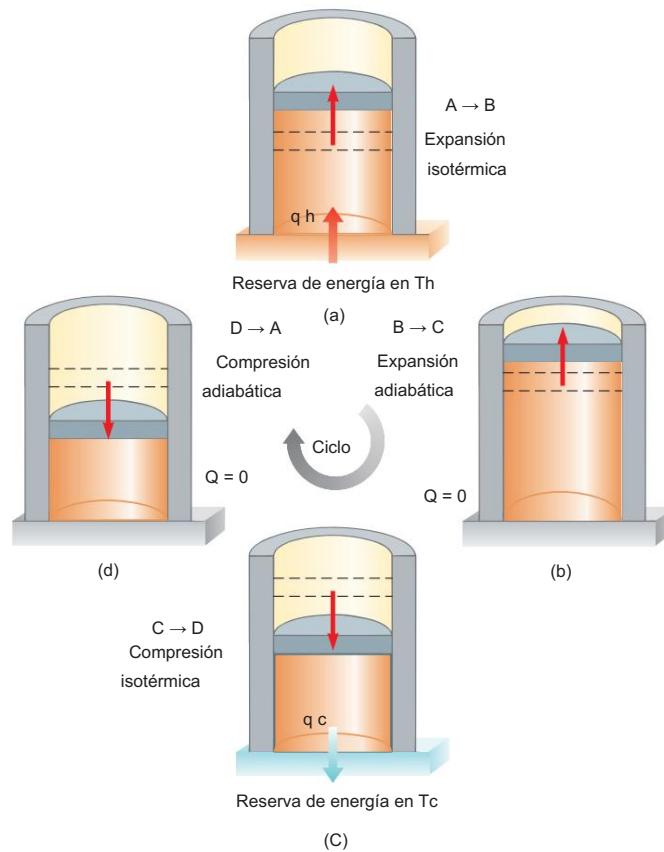


FIGURA ACTIVA 22.9

El ciclo de Carnot. (a) En el proceso A S B, el gas se expande isotérmicamente mientras está en contacto con un depósito en  $T_h$ . (b) En el proceso B S C, el gas se expande adiabáticamente ( $Q = 0$ ). (c) En el proceso C S D, el gas se comprime isotérmicamente mientras está en contacto con un depósito a  $T_c$ . (d) En el proceso D S A, el gas se comprime adiabáticamente. Las flechas en el pistón indican la dirección de su movimiento durante cada proceso.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para observar el movimiento del pistón en el ciclo de Carnot mientras también observa el ciclo en el diagrama PV de la figura activa 22.10.

#### PREVENCIÓN DE ERRORES 22.3

No comre una máquina de Carnot

La máquina de Carnot es una idealización; no espere que se desarrolle un motor de Carnot para uso comercial. Exploramos el motor de Carnot solo por consideraciones teóricas.

Para describir el ciclo de Carnot que tiene lugar entre las temperaturas  $T_c$  y  $T_h$ , supongamos que la sustancia de trabajo es un gas ideal contenido en un cilindro equipado con un pistón móvil en un extremo. Las paredes del cilindro y el pistón son térmicamente no conductoras. En la figura activa 22.9 se muestran cuatro etapas del ciclo de Carnot y en la figura activa 22.10 se muestra el diagrama PV del ciclo. El ciclo de Carnot consta de dos procesos adiabáticos y dos procesos isotérmicos, todos reversibles:

1. El proceso A S B (figura activa 22.9a) es una expansión isotérmica a la temperatura  $T_h$ . El gas se pone en contacto térmico con un depósito de energía a temperatura  $T_h$ . Durante la expansión, el gas absorbe energía  $Q_h$  del depósito a través de la base del cilindro y realiza trabajo  $W_{AB}$  al elevar el pistón.
2. En el proceso B S C (figura activa 22.9b), la base del cilindro se reemplaza por una pared térmicamente no conductora y el gas se expande adiabáticamente; es decir, no entra ni sale energía del sistema por calor. Durante la expansión, la temperatura del gas disminuye de  $T_h$  a  $T_c$  y el gas realiza trabajo  $W_{BC}$  al elevar el pistón.
3. En el proceso C S D (figura activa 22.9c), el gas se pone en contacto térmico con un depósito de energía a la temperatura  $T_c$  y se comprime isotérmicamente a la temperatura  $T_c$ . Durante este tiempo, el gas expulsa energía  $Q_c$  al depósito y el trabajo realizado por el pistón sobre el gas es  $W_{CD}$ .
4. En el proceso final D S A (figura activa 22.9d), la base del cilindro se reemplaza por una pared no conductora y el gas se comprime adiabáticamente. La temperatura del gas aumenta a  $T_h$ , y el trabajo realizado por el pistón sobre el gas es  $W_{DA}$ .

La eficiencia térmica del motor viene dada por la Ecuación 22.2:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_h} = \frac{W_{AB} + W_{CD}}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

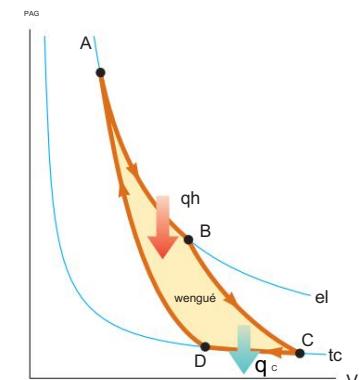


FIGURA ACTIVA 22.10

Diagrama PV del ciclo de Carnot. El trabajo neto realizado por Wengue es igual a la energía neta transferida a la máquina de Carnot en un ciclo,  $Q_h - Q_c$ .

Como con cualquier ciclo, el trabajo realizado durante el ciclo es el área encerrada por la trayectoria en el diagrama PV. Observe que  $Eint = 0$  para el ciclo.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para observar el ciclo de Carnot en el diagrama PV mientras también observa el movimiento del pistón en la Figura activa 22.9.

En el ejemplo 22.3 mostramos que para un ciclo de Carnot,

$$\frac{Q_{h0}}{Q_{c0}} = \frac{t_c}{t_h} \quad (22.5)$$

Eficiencia de un motor de Carnot

$$\text{CE 1} = \frac{t_c}{t_h} \quad (22.6)$$

Este resultado indica que todas las máquinas de Carnot que funcionan entre las mismas dos temperaturas tienen la misma eficiencia.<sup>5</sup>

La ecuación 22.6 se puede aplicar a cualquier sustancia de trabajo que opere en un ciclo de Carnot entre dos depósitos de energía. De acuerdo con esta ecuación, la eficiencia es cero si  $T_c = T_h$ , como cabría esperar. La eficiencia aumenta a medida que disminuye  $T_c$  y aumenta  $T_h$ . La eficiencia puede ser la unidad (100%), sin embargo, solo si  $T_c = 0\text{ K}$ . Dichos depósitos no están disponibles; por lo tanto, la eficiencia máxima siempre es inferior al 100%. En la mayoría de los casos prácticos,  $T_c$  está cerca de la temperatura ambiente, que es de unos 300 K.

Por lo tanto, uno generalmente se esfuerza por aumentar la eficiencia elevando  $T_h$ . Teóricamente, una máquina térmica de ciclo de Carnot que funciona a la inversa constituye la bomba de calor más eficaz posible y determina el COP máximo para una combinación determinada de temperaturas de depósito calientes y frías. Usando las Ecuaciones 22.1 y 22.4, vemos que el COP máximo para una bomba de calor en su modo de calefacción es

$$\text{COPC 1modo calefacción} = \frac{Q_{h0}}{W} = \frac{1}{\frac{Q_{h0}}{Q_{c0}}} = \frac{1}{\frac{Q_{h0}}{Q_{h0} - Q_{c0}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{Q_{h0} - Q_{c0}}{Q_{h0}}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{t_c}{t_h}}} = \frac{t_h}{t_c} = \frac{el}{tc}$$

El COP de Carnot para una bomba de calor en el modo de refrigeración es

$$\text{COPC 1modo de refrigeración} = \frac{Q_{c0}}{W} = \frac{1}{\frac{Q_{c0}}{Q_{h0}}} = \frac{1}{\frac{Q_{c0}}{Q_{h0} - Q_{c0}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{Q_{h0} - Q_{c0}}{Q_{h0}}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{t_h}{t_c}}} = \frac{tc}{el}$$

A medida que la diferencia entre las temperaturas de los dos depósitos se acerca a cero en esta expresión, el COP teórico se acerca al infinito. En la práctica, la baja temperatura de los serpentines de refrigeración y la alta temperatura del compresor limitan el COP a valores inferiores a 10.

**Pregunta rápida 22.3** Tres motores operan entre depósitos separados en temperatura por 300 K. Las temperaturas del depósito son las siguientes: Motor A:  $T_h = 1000\text{ K}$ ,  $T_c = 700\text{ K}$ ; Motor B:  $T_h = 800\text{ K}$ ,  $T_c = 500\text{ K}$ ; Motor C:  $T_h = 600\text{ K}$ ,  $T_c = 300\text{ K}$ . Clasifique los motores en orden de eficiencia teóricamente posible de mayor a menor.

5 Para que los procesos del ciclo de Carnot sean reversibles, deben llevarse a cabo con una lentitud infinitesimal. Por lo tanto, aunque el motor de Carnot es el motor más eficiente posible, tiene una potencia de salida cero porque se necesita un intervalo de tiempo infinito para completar un ciclo. Para un motor real, el corto intervalo de tiempo para cada ciclo da como resultado que la sustancia de trabajo alcance una temperatura más baja que la del depósito caliente y una temperatura más baja que la del depósito frío. FL Curzon y B. Ahlborn (Am. J.

física 43(1), 22, 1975), quienes encontraron que la eficiencia a la máxima potencia de salida depende únicamente de la eficiencia de Curzon-Ahlborn  $t_c$  y  $t_h$  y están dadas por  $\text{eC-A} = 1 - \frac{1}{(t_c/t_h)^{1/2}}$ . Las temperaturas del depósito de eC-A proporciona una aproximación más cercana a las eficiencias de los motores reales que la eficiencia de Carnot.

**EJEMPLO 22.3**

Eficiencia del motor de Carnot

Demuestre que la relación de las transferencias de energía por calor en una máquina de Carnot es igual a la relación de las temperaturas del depósito, como se indica en la ecuación 22.5.

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar Utilice las figuras activas 22.9 y 22.10 para visualizar los procesos del ciclo de Carnot.

Categorizar Debido a nuestra comprensión del ciclo de Carnot, podemos categorizar los procesos en el ciclo como isotérmicos y adiabáticos.

Analizar Para la expansión isotérmica (proceso A S B en la figura activa 22.9), encuentre la transferencia de energía por calor desde el depósito caliente utilizando la ecuación 20.14 y la primera ley de la termodinámica:

$$\frac{\partial Q_{h0}}{\partial E_{int,WAB,0}} = \frac{\partial W_{AB,nRth,ln}}{\partial T_{h0}}$$

VB  
—  
Virginia

De manera similar, encuentre la transferencia de energía al depósito frío durante la compresión isotérmica C S D:

$$\frac{\partial Q_{c0}}{\partial E_{int,WCD,0}} = \frac{\partial W_{CD,nRTc,ln}}{\partial T_{c0}}$$

CV  
—  
—

Divida la segunda expresión por la primera:

$$(1) \quad \frac{\frac{\partial Q_{c0}}{\partial Q_{h0}}}{\frac{\partial E_{int,WCD,0}}{\partial E_{int,WAB,0}}} = \frac{\frac{t_c}{t_h} \ln \frac{V_C}{V_B}}{\frac{t_h}{t_c} \ln \frac{V_B}{V_D}}$$

Aplique la ecuación 21.20 a los procesos adiabáticos B S C y D S A:

$$\begin{aligned} & \frac{V_B}{T_h} \frac{V_C^{g1}}{T_c V_C^{g1}} \\ & \frac{T_h V_A^{g1}}{V_A} \frac{T_c V_D^{g1}}{T_c V_D^{g1}} \end{aligned}$$

Divida la primera ecuación por la segunda:

$$\frac{a}{a} \frac{V_B}{V_B} \frac{g1}{g1} \frac{a}{a} \frac{V_C}{V_C} \frac{b}{b} \frac{g1}{g1} \frac{a}{a}$$

$$(2) \quad \frac{V_B}{V_h} \frac{V_C}{V_c}$$

Sustituya la Ecuación (2) en la Ecuación (1):

$$\frac{\frac{\partial Q_{c0}}{\partial Q_{h0}}}{\frac{\partial E_{int,WCD,0}}{\partial E_{int,WAB,0}}} = \frac{\frac{t_c}{t_h} \ln \frac{V_C}{V_B}}{\frac{t_h}{t_c} \ln \frac{V_C}{V_D}}$$

el

Finalizar Esta última ecuación es la Ecuación 22.5, la que nos propusimos demostrar.

**EJEMPLO 22.4**

El motor de vapor

Una máquina de vapor tiene una caldera que funciona a 500 K. La energía del combustible que se quema convierte el agua en vapor, y este vapor mueve un pistón. La temperatura del depósito frío es la del aire exterior, aproximadamente 300 K. ¿Cuál es la eficiencia térmica máxima de esta máquina de vapor?

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar En una máquina de vapor, el gas que empuja el pistón en la figura activa 22.9 es vapor. Una máquina de vapor real no funciona en un ciclo de Carnot, pero, para encontrar la máxima eficiencia posible, imagine una máquina de vapor de Carnot.

Categorizar Calculamos una eficiencia utilizando la Ecuación 22.6, por lo que clasificamos este ejemplo como un problema de sustitución.

Sustituya las temperaturas del yacimiento en la Ecuación 22.6:

$$\text{CE 1} = \frac{t_c}{t_h} = \frac{300K}{500K} = 0.400 \text{ o } 40.0\%$$

Este resultado es la mayor eficiencia teórica del motor. En la práctica, la eficiencia es considerablemente menor.

**¿Y si?** Supongamos que deseamos aumentar la eficiencia teórica de este motor. Este aumento se puede lograr elevando Th en T o disminuyendo Tc en la misma T. ¿Cuál sería más efectivo?

Respuesta Una T dada tendría un efecto fraccionario mayor en una temperatura más pequeña, por lo que esperaría un cambio mayor en la eficiencia si modifica T<sub>c</sub> por T. Probemos eso numéricamente. Elevar T<sub>h</sub> en 50 K, correspondiente a T<sub>h</sub> 550 K, daría una eficiencia máxima de

$$\text{CE} \quad 1 \quad \frac{t_c}{\text{el}} \quad 1 \quad \frac{300K}{550K} \quad 0.455$$

Disminuyendo T<sub>c</sub> en 50 K, correspondiente a T<sub>c</sub> 250 K, daría una eficiencia máxima de

$$\text{CE} \quad 1 \quad \frac{t_c}{\text{el}} \quad 1 \quad \frac{250K}{500K} \quad 0.500$$

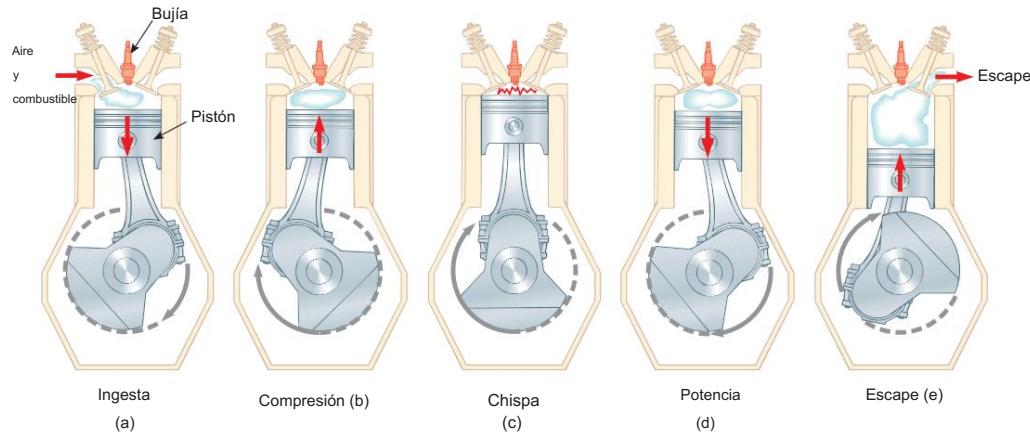
Aunque cambiar T<sub>c</sub> es matemáticamente más efectivo, a menudo cambiar T<sub>h</sub> es prácticamente más factible.

## 22.5 Motores de gasolina y diesel

En un motor de gasolina ocurren seis procesos en cada ciclo; cinco de ellos se ilustran en la figura activa 22.11. En esta discusión, consideraremos que el interior del cilindro sobre el pistón es el sistema que pasa por ciclos repetidos en la operación del motor. Para un ciclo dado, el pistón se mueve hacia arriba y hacia abajo dos veces, lo que representa un ciclo de cuatro tiempos que consta de dos carreras ascendentes y dos descendentes.

Los procesos en el ciclo se pueden aproximar mediante el ciclo de Otto que se muestra en el diagrama PV de la figura activa 22.12. En la siguiente discusión, consulte la Figura activa 22.11 para la representación pictórica de los trazos y la Figura activa 22.12 para el significado en el diagrama PV de las designaciones de letras a continuación:

1. Durante la carrera de admisión O S A (Fig. 22.11a activa), el pistón se mueve hacia abajo y una mezcla gaseosa de aire y combustible ingresa al cilindro a presión atmosférica. En este proceso, el volumen aumenta de V<sub>2</sub> a V<sub>1</sub>. Esa es la parte de entrada de energía del ciclo: la energía entra al sistema (el interior del cilindro) por transferencia de materia como energía potencial almacenada en el combustible.
2. Durante la carrera de compresión A S B (figura activa 22.11b), el pistón se mueve hacia arriba, la mezcla de aire y combustible se comprime adiabáticamente del volumen V<sub>1</sub> al volumen V<sub>2</sub> y la temperatura aumenta de T<sub>A</sub> a T<sub>B</sub>. El trabajo realizado sobre el gas es positivo y su valor es igual al negativo del área bajo la curva AB en la figura activa 22.12.



**FIGURA ACTIVA 22.11**

El ciclo de cuatro tiempos de un motor de gasolina convencional. Las flechas en el pistón indican la dirección de su movimiento durante cada proceso. (a) En la carrera de admisión, el aire y el combustible entran al cilindro. (b) Luego se cierra la válvula de admisión y el pistón comprime la mezcla de aire y combustible. (c) La mezcla es encendida por la bujía, con el resultado de que la temperatura de la mezcla aumenta a un volumen esencialmente constante. (d) En la carrera de potencia, el gas se expande contra el pistón. (e) Finalmente, se expulsan los gases residuales y se repite el ciclo.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para observar el movimiento del pistón y el cigüeñal mientras también observa el ciclo en el diagrama PV de la Figura activa 22.12.

3. En el proceso B S C, la combustión se produce cuando se dispara la bujía (figura activa 22.11c). Esa no es una de las carreras del ciclo porque ocurre en un intervalo de tiempo muy corto mientras el pistón está en su posición más alta. La combustión representa una rápida transformación de energía potencial almacenada en enlaces químicos en el combustible a energía interna asociada con el movimiento molecular, que está relacionado con la temperatura. Durante este intervalo de tiempo, la presión y la temperatura de la mezcla aumentan rápidamente, aumentando la temperatura de TB a TC.

Sin embargo, el volumen permanece aproximadamente constante debido al breve intervalo de tiempo. Como resultado, aproximadamente no se realiza trabajo sobre o por el gas. Podemos modelar este proceso en el diagrama PV (figura activa 22.12) como aquel proceso en el que la energía Q h ingresa al sistema. (En realidad, sin embargo, este proceso es una conversión de energía que ya está en el cilindro del proceso O S A).

4. En la carrera de potencia C S D (figura activa 22.11d), el gas se expande adiabáticamente de V2 a V1. Esta expansión hace que la temperatura baje de TC a TD. El gas realiza trabajo al empujar el pistón hacia abajo, y el valor de este trabajo es igual al área bajo la curva CD.
5. En el proceso DSA (que no se muestra en la figura activa 22.11), se abre una válvula de escape cuando el pistón llega al final de su carrera y la presión cae repentinamente durante un breve intervalo de tiempo. Durante este intervalo de tiempo, el pistón está casi estacionario y el volumen es aproximadamente constante. La energía es expulsada del interior del cilindro y continúa siendo expulsada durante el siguiente proceso.

6. En el proceso final, la carrera de escape A S O (Fig. 22.11e activa), el pistón se mueve hacia arriba mientras la válvula de escape permanece abierta. Los gases residuales se expulsan a presión atmosférica y el volumen disminuye de V1 a V2.

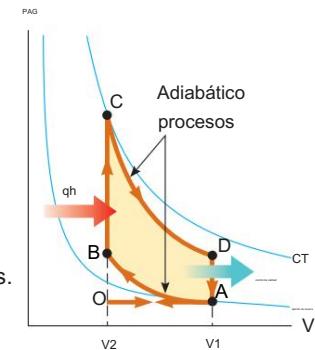
El ciclo luego se repite.

Si se supone que la mezcla aire-combustible es un gas ideal, la eficiencia del ciclo Otto es

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{g_1}{V_1/V_2 - 1}} \quad \text{Ciclo de Otto} \quad (22.7)$$

donde  $V_1/V_2$  es la relación de compresión y  $g$  es la relación de calores específicos molares  $CP/CP$  para la mezcla aire-combustible. La ecuación 22.7, que se deriva del ejemplo 22.5, muestra que la eficiencia aumenta a medida que aumenta la relación de compresión. Para una relación de compresión típica de 8 y con  $g = 1.4$ , la Ecuación 22.7 predice una eficiencia teórica del 56% para un motor que opera en el ciclo Otto idealizado. Este valor es mucho mayor que el alcanzado en los motores reales (15% a 20%) debido a efectos tales como la fricción, la transferencia de energía por conducción a través de las paredes del cilindro y la combustión incompleta de la mezcla aire-combustible.

Los motores diesel funcionan en un ciclo similar al ciclo Otto, pero no emplean una bujía. La relación de compresión de un motor diesel es mucho mayor que la de un motor de gasolina. El aire del cilindro se comprime en un volumen muy pequeño y, como consecuencia, la temperatura del cilindro al final de la carrera de compresión es muy alta. En este punto, se inyecta combustible en el cilindro. La temperatura es lo suficientemente alta para que la mezcla de combustible y aire se encienda sin la ayuda de una bujía. Los motores diésel son más eficientes que los motores de gasolina debido a sus mayores relaciones de compresión y las consiguientes temperaturas de combustión más altas.



**FIGURA ACTIVA 22.12**

Diagrama PV del ciclo Otto, que representa aproximadamente los procesos que ocurren en un motor de combustión interna.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para observar el ciclo Otto en el diagrama PV mientras observa el movimiento del pistón y el cigüeñal en la figura activa 22.11.

### EJEMPLO 22.5

#### Eficiencia del Ciclo Otto

Demuestre que la eficiencia térmica de un motor que opera en un ciclo Otto idealizado (véanse las figuras activas 22.11 y 22.12) viene dada por la ecuación 22.7. Trate la sustancia de trabajo como un gas ideal.

#### SOLUCIÓN

Conceptualizar Estudie las figuras activas 22.11 y 22.12 para asegurarse de que comprende el funcionamiento del ciclo de Otto.

Categorizar Como se ve en la figura activa 22.12, clasificamos los procesos en el ciclo de Otto como isovolumétricos y adiabáticos.

Analice Modele la entrada y salida de energía como ocurre con el calor en los procesos B S C y D S A. (En realidad, la mayor parte de la energía entra y sale por transferencia de materia cuando la mezcla aire-combustible entra y sale del cilindro).

Utilice la ecuación 21.8 para encontrar las transferencias de energía por calor para estos procesos, que tienen lugar a volumen constante:

B S C 0Q h 0 nCV 1TC TB 2

DS A 0Q c 0 nCV 1TD TA2 \_

Sustituya estas expresiones en la Ecuación 22.2:

$$(1) \text{ mi} \quad \frac{\text{wengüe}}{0Q h 0} \quad 1 \quad \frac{0Q c 0}{0Q h 0} \quad 1 \quad \frac{\text{TD TA}}{\text{CT TB}}$$

Aplique la Ecuación 21.20 a los procesos adiabáticos A S B y C S D:

$$\begin{aligned} \text{A S B TAVA} & \quad g1 \quad \text{TBVB}^{g1} \\ \text{C S D TCVC} & \quad g1 \quad \text{TDVD}^{g1} \end{aligned}$$

Resuelva estas ecuaciones para las temperaturas TA y TD, observando que VA VD V1 y VB VC V2:

$$(2) \quad \text{TA TB a VB } \overline{b} \overline{g1} \quad \text{TB a } \overline{V2} b g1$$

$$(3) \text{ TD TC a VC } b \overline{g1} \quad \text{TC un } \overline{V2} b g1$$

Restar la ecuación (2) de la ecuación (3) y reorganizar:

$$(4) \quad \frac{\text{TD TA}}{\text{CT TB}} \quad a \overline{V2} b g1$$

Sustituya la Ecuación (4) en la Ecuación (1):

$$\text{mi} \quad 1 \quad \frac{1}{1V1>V2 2}$$

Finalizar Esta expresión final es la Ecuación 22.7.

#### PREVENCIÓN DE ERRORES 22.4 La entropía es abstracta

La entropía es una de las nociones más abstractas de la física, por lo tanto, siga la discusión en esta sección y las subsiguientes con mucho cuidado. No confundas energía con entropía. Aunque los nombres suenan similares, son conceptos muy diferentes.

## 22.6 Entropía

La ley cero de la termodinámica involucra el concepto de temperatura, y la primera ley involucra el concepto de energía interna. La temperatura y la energía interna son ambas variables de estado; es decir, el valor de cada uno depende únicamente del estado termodinámico de un sistema, no del proceso que lo llevó a ese estado. Otra variable de estado, esta relacionada con la segunda ley de la termodinámica, es la entropía S. En esta sección, definimos la entropía en una escala macroscópica tal como fue expresada por primera vez por Clausius en 1865.

La entropía se formuló originalmente como un concepto útil en termodinámica. Sin embargo, su importancia creció a medida que se desarrollaba el campo de la mecánica estadística porque las técnicas analíticas de la mecánica estadística proporcionan un medio alternativo para interpretar la entropía y un significado más global del concepto. En mecánica estadística, el comportamiento de una sustancia se describe en términos del comportamiento estadístico de sus átomos y moléculas. Un hallazgo importante en estos estudios es que los sistemas aislados tienden al desorden y la entropía es una medida de este desorden.

Por ejemplo, considere las moléculas de un gas en el aire de su habitación. Si la mitad de las moléculas de gas tuvieran vectores de velocidad de igual magnitud dirigidos hacia la izquierda y la otra mitad tuvieran vectores de velocidad de la misma magnitud dirigidos hacia la derecha, la situación sería muy ordenada. Sin embargo, tal situación es extremadamente improbable. Si pudieras ver las moléculas, verías que se mueven al azar en todas las direcciones, chocando entre sí, cambiando de velocidad al chocar, algunas van rápido y otras lentamente. Esta situación es muy desordenada.

La causa de la tendencia de un sistema aislado al desorden se explica fácilmente. Para ello, distinguimos entre microestados y macroestados de un sistema.

Un microestado es una configuración particular de los constituyentes individuales del sistema. Por ejemplo, la descripción de los vectores de velocidad ordenados de las moléculas de aire en su habitación se refiere a un microestado particular, y el movimiento aleatorio más probable es otro microestado, uno que representa el desorden. Un macroestado es una descripción de las condiciones del sistema desde un punto de vista macroscópico y utiliza variables macroscópicas como la presión, la densidad y la temperatura de los gases.

Para cualquier macroestado dado del sistema, son posibles varios microestados.

Por ejemplo, el macroestado de un 4 en un par de dados se puede formar a partir de los posibles microestados 1–3, 2–2 y 3–1. Se supone que todos los microestados son igualmente probables. Sin embargo, cuando se examinan todos los macroestados posibles, se encuentra que los macroestados asociados con el desorden tienen muchos más microestados posibles que los asociados con el orden. Por ejemplo, solo hay un microestado asociado con el macroestado de una escalera real en una mano de póquer de cinco picas, dispuestas en orden del diez al as (figura 22.13a). Esta combinación de cartas es una mano muy ordenada.

Sin embargo, muchos microestados (el conjunto de cinco cartas individuales en una mano de póquer) están asociados con una mano sin valor en el póquer (figura 22.13b).

La probabilidad de que te repartan la escalera real con creces es exactamente la misma que la probabilidad de que te repartan una mano sin valor en particular. Sin embargo, debido a que hay tantas manos sin valor, la probabilidad de un macroestado de una mano sin valor es mucho mayor que la probabilidad de un macroestado de la escalera real en espadas.

**Cuestionario rápido 22.4** (a) Suponga que selecciona cuatro cartas al azar de una baraja estándar de naipes y termina con un macroestado de cuatro doses. ¿Cuántos microestados están asociados con este macroestado? (b) Suponga que toma dos cartas y termina con un macroestado de dos ases. ¿Cuántos microestados están asociados con este macroestado?

También podemos imaginar macroestados ordenados y macroestados desordenados en procesos físicos, no solo en juegos de dados y póquer. La probabilidad de que un sistema pase en el tiempo de un macroestado ordenado a un macroestado desordenado es mucho mayor que la probabilidad de que ocurra lo contrario porque hay más microestados en un macroestado desordenado.

Si consideramos que un sistema y su entorno incluyen todo el Universo, el Universo siempre se está moviendo hacia un macroestado correspondiente a un mayor desorden.

Como la entropía es una medida del desorden, una forma alternativa de enunciar esta ley es que la entropía del Universo aumenta en todos los procesos reales. Esta declaración es otra redacción más de la segunda ley de la termodinámica que se puede demostrar que es equivalente a las declaraciones de Kelvin-Planck y Clausius.

La formulación original de la entropía en termodinámica implica la transferencia de energía por calor durante un proceso reversible. Considere cualquier proceso infinitesimal en el que un sistema cambia de un estado de equilibrio a otro. Si  $dQ_r$  es la cantidad de energía transferida por calor cuando el sistema sigue un camino reversible entre los estados, el cambio de entropía  $dS$  es igual a esta cantidad de energía para el proceso reversible dividida por la temperatura absoluta del sistema:

$$dS = \frac{dQ_r}{T} \quad (22.8)$$

Hemos supuesto que la temperatura es constante porque el proceso es infinitesimal.

Debido a que la entropía es una variable de estado, el cambio de entropía durante un proceso depende solo de los puntos finales y, por lo tanto, es independiente de la ruta real seguida. En consecuencia, el cambio de entropía de un proceso irreversible se puede determinar calculando el cambio de entropía de un proceso reversible que conecta los mismos estados inicial y final.

El subíndice  $r$  en la cantidad  $dQ_r$  es un recordatorio de que la energía transferida debe medirse a lo largo de un camino reversible aunque el sistema en realidad tenga



(a)



(b)

Figura 22.13 (a) Una escalera real es una mano de póquer muy ordenada con baja probabilidad de que ocurra. (b) Una mano de póquer desordenada y sin valor. La probabilidad de que ocurra esta mano en particular es la misma que la de la escalera real en espadas. Hay tantas manos sin valor, sin embargo, que la probabilidad de que te repartan una mano de menos valor es mucho mayor que la de que te repartan una escalera real de picas.

Declaración de entropía de la segunda ley de la termodinámica

siguió un camino irreversible. Cuando la energía es absorbida por el sistema,  $dQ_r$  es positiva y la entropía del sistema aumenta. Cuando la energía es expulsada por el sistema,  $dQ_r$  es negativa y la entropía del sistema disminuye. Observe que Equa system, dQ\_r en la ecuación 22.8 no define la entropía bien, el cambio en la entropía. Por lo tanto, la cantidad significativa al describir un proceso es el cambio de entropía.

Para calcular el cambio de entropía para un proceso finito, primero reconozca que  $T$  es generalmente no es constante. Por lo tanto, debemos integrar la Ecuación 22.8:

### Cambio de entropía para un proceso finito

$$\oint_S \frac{dS}{dQ_r} = \int_i^f \frac{dQ_r}{T} \quad (22.9)$$

Al igual que con un proceso infinitesimal, el cambio en la entropía  $S$  de un sistema que pasa de un estado a otro tiene el mismo valor para todos los caminos que conectan los dos estados. Es decir, el cambio finito en la entropía  $S$  de un sistema depende únicamente de las propiedades de los estados de equilibrio inicial y final. Por lo tanto, somos libres de elegir un camino reversible particular sobre el cual evaluar la entropía en lugar del camino real, siempre que los estados inicial y final sean los mismos para ambos caminos.

Este punto se explora más en la Sección 22.7.

**Pregunta rápida 22.5** Se lleva un gas ideal desde una temperatura inicial  $T_i$  hasta una temperatura final más alta  $T_f$  a lo largo de dos caminos reversibles diferentes. El camino A está a presión constante y el camino B está a volumen constante. ¿Cuál es la relación entre los cambios de entropía del gas para estos caminos? (a) SA > SB (b) SA < SB (c) SA = SB

### EJEMPLO 22.6

### Cambio en la entropía: fusión

Un sólido que tiene un calor latente de fusión  $L_f$  se funde a una temperatura  $T_m$ . Calcular el cambio de entropía de este sistema cuando se funde una masa  $m$  de la sustancia.

### SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagine colocar la sustancia en un ambiente cálido para que la energía ingrese a la sustancia por medio del calor. El proceso se puede revertir colocando la sustancia en un ambiente fresco para que la energía salga de la sustancia por calor.

Categorizar Debido a que la fusión tiene lugar a una temperatura fija, clasificamos el proceso como isotérmico.

Analizar Usar la Ecuación 20.7 en la Ecuación 22.9, observando que la temperatura permanece fija: Finalizar

$$\oint_S \frac{dQ_r}{T} = \frac{1}{T_m} \int_{T_m}^{T_m} dQ_r = \frac{mL_f}{T_m}$$

Observe que  $S$  es positivo, lo que representa que se agrega energía al cubo de hielo.

**¿Y si?** Suponga que no tiene la Ecuación 22.9 disponible para calcular un cambio de entropía. ¿Cómo podría argumentar a partir de la descripción estadística de la entropía que los cambios en la entropía deberían ser positivos?

**Respuesta** Cuando un sólido se derrite, su entropía aumenta porque las moléculas están mucho más desordenadas en estado líquido que en estado sólido. El valor positivo de  $S$  también significa que la sustancia en su estado líquido no transfiere espontáneamente energía de sí misma al entorno cálido y se congela porque hacerlo implicaría un aumento espontáneo de orden y una disminución de entropía.

Consideraremos los cambios de entropía que ocurren en una máquina térmica de Carnot que opera entre las temperaturas  $T_c$  y  $T_h$ . En un ciclo, el motor toma del depósito caliente y expulsa energía  $Q_c$  porciones al depósito frío. energía  $Q_h$  Estas transferencias de energía ocurren sólo durante las isotérmicas del ciclo de Carnot; por lo tanto, la temperatura constante se puede poner frente al signo integral en la Ecuación 22.9. Entonces, la integral simplemente tiene el valor de la cantidad total de energía transferida por el calor. Por lo tanto, el cambio total de entropía para un ciclo es

$$\oint S \frac{dQ_{\text{h0}}}{T} - \frac{dQ_{\text{c0}}}{T}$$

donde el signo menos representa que la energía está saliendo del motor. En el ejemplo 22.3 mostramos que para una máquina de Carnot,

$$\frac{dQ_{\text{c0}}}{dQ_{\text{h0}}} = \frac{T_c}{T_h}$$

Usando este resultado en la expresión anterior para S, encontramos que el cambio total de entropía para una máquina de Carnot operando en un ciclo es cero:

$$\oint S = 0$$

Ahora considere un sistema tomado a través de un ciclo reversible arbitrario (no Carnot). Como la entropía es una variable de estado y, por lo tanto, depende únicamente de las propiedades de un estado de equilibrio dado, concluimos que S = 0 para cualquier ciclo reversible.

En general, podemos escribir esta condición como

$$\oint \frac{dQ_r}{T} = 0 \quad \text{1 ciclo reversible} \quad (22.10)$$

donde el símbolo indica que la integración es sobre un camino cerrado.

## 22.7 Cambios de entropía en procesos irreversibles

Por definición, un cálculo del cambio de entropía de un sistema requiere información sobre un camino reversible que conecte los estados de equilibrio inicial y final. Para calcular cambios en la entropía para procesos reales (irreversibles), recuerde que la entropía (como la energía interna) depende únicamente del estado del sistema. Es decir, la entropía es una variable de estado y el cambio en la entropía depende solo de los estados inicial y final.

Puede calcular el cambio de entropía en algún proceso irreversible entre dos estados de equilibrio ideando un proceso reversible (o una serie de procesos reversibles) entre los mismos dos estados y calculando  $\int dQ_r/T$  para el proceso reversible. En procesos irreversibles, es importante distinguir entre  $Q_r$ , la transferencia de energía real en el proceso, y  $Q_{\text{r}}$ , la energía que habría sido transferida por calor a lo largo de un camino reversible. Solo  $Q_{\text{r}}$  es el valor correcto que se utilizará para calcular el cambio de entropía.

El cambio de entropía para un sistema y su entorno siempre es positivo para un proceso irreversible. En general, la entropía total —y por tanto el desorden— siempre aumenta en un proceso irreversible. Teniendo en cuenta estas consideraciones, podemos enunciar la segunda ley de la termodinámica de la siguiente manera:

La entropía total de un sistema aislado que sufre un cambio no puede disminuir.

Además, si el proceso es irreversible, la entropía total de un sistema aislado siempre aumenta. En un proceso reversible, la entropía total de un sistema aislado permanece constante.

Cuando se trata de un sistema que no está aislado de su entorno, recuerde que el aumento de entropía descrito en la segunda ley es el del sistema y su entorno. Cuando un sistema y su entorno interactúan en un proceso irreversible, el aumento de entropía de uno es mayor que la disminución de entropía del otro. Por lo tanto, el cambio de entropía del Universo debe ser mayor que cero para un proceso irreversible e igual a cero para un proceso reversible. En última instancia, la entropía del Universo debería alcanzar un valor máximo.

A este valor, el Universo estará en un estado de temperatura y densidad uniformes.

Todos los procesos físicos, químicos y biológicos cesarán porque un estado de perfecto

el desorden implica que no hay energía disponible para hacer el trabajo. Este sombrío estado de cosas a veces se conoce como la muerte térmica del Universo.

**Prueba rápida 22.6** Verdadero o falso: el cambio de entropía en un proceso adiabático debe ser cero porque  $Q = 0$ .

#### Cambio de entropía en la conducción térmica Consideremos

ahora un sistema que consta de un reservorio caliente y un reservorio frío que están en contacto térmico entre sí y aislados del resto del Universo. Ocurre un proceso durante el cual la energía  $Q$  se transfiere por calor desde el depósito caliente a la temperatura  $T_h$  al depósito frío a la temperatura  $T_c$ . El proceso descrito es irreversible, por lo que debemos encontrar un proceso reversible equivalente. Debido a que la temperatura de un reservorio no cambia durante el proceso, podemos reemplazar el proceso real para cada reservorio con un proceso isotérmico reversible en el que la misma cantidad de energía se transfiere mediante calor. En consecuencia, para un yacimiento, el cambio de entropía no depende de si el proceso es reversible o irreversible.

Debido a que el depósito frío absorbe energía  $Q$ , su entropía aumenta en  $Q/T_c$ . Al mismo tiempo, el depósito caliente pierde energía  $Q$ , por lo que su cambio de entropía es  $-Q/T_h$ . La entropía  $T_c$ , el aumento de entropía del reservorio frío es mayor que la disminución  $T_h$  de del reservorio caliente. Por lo tanto, el cambio de entropía del sistema (y del Universo) es mayor que cero:

$$\oint dS = \frac{q}{T_c} - \frac{q}{T_h} > 0$$

Suponga que la energía se transfiriera espontáneamente de un objeto frío a un objeto caliente, en violación de la segunda ley. Esta transferencia de energía imposible puede describirse en términos de desorden. Antes de la transferencia, un cierto grado de orden está asociado con las diferentes temperaturas de los objetos. Las moléculas del objeto caliente tienen una energía promedio más alta que las moléculas del objeto frío. Si la energía se transfiere espontáneamente del objeto frío al objeto caliente, el objeto frío se vuelve más frío durante un intervalo de tiempo y el objeto caliente se vuelve más caliente. La diferencia en la energía molecular promedio se vuelve aún mayor, lo que representaría un aumento en el orden del sistema y una violación de la segunda ley.

En comparación, el proceso que ocurre naturalmente es la transferencia de energía del objeto caliente al objeto frío. En este proceso, la diferencia en la energía molecular promedio disminuye, lo que representa una distribución de energía más aleatoria y un aumento del desorden.

#### Cambio de entropía en una expansión libre

Consideremos nuevamente la expansión libre adiabática de un gas que ocupa un volumen inicial  $V_i$  (figura 22.14). En esta situación, se rompe una membrana que separa el gas de una región evacuada y el gas se expande (irreversiblemente) hasta un volumen  $V_f$ . ¿Cuáles son los cambios de entropía del gas y del Universo durante este proceso? El proceso no es ni reversible ni cuasiestático. Como se muestra en la Sección 20.6, las temperaturas inicial y final del gas son las mismas.

Para aplicar la Ecuación 22.9, no podemos tomar  $Q = 0$ , el valor del proceso irreversible, sino que debemos encontrar  $Q_r$ ; es decir, debemos encontrar un camino reversible equivalente que comparta los mismos estados inicial y final. Una opción simple es una expansión reversible isotérmica en la que el gas empuja lentamente contra un pistón mientras la energía ingresa al gas por el calor de un depósito para mantener la temperatura constante. Como  $T$  es constante en este proceso, la ecuación 22.9 da

$$\oint dS = \frac{\int F dQ_r}{T} = \frac{1}{T} \int F dQ_r$$

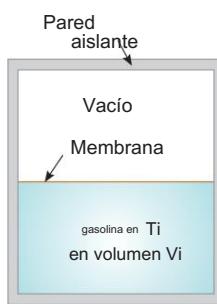


Figura 22.14 Expansión libre adiabática de un gas. Cuando se rompe la membrana que separa el gas de la región evacuada, el gas se expande libre e irreversiblemente. Como resultado, ocupa un mayor volumen final. El contenedor está aislado térmicamente de su entorno; por lo tanto,  $Q = 0$ .

Para un proceso isotérmico, la primera ley de la termodinámica especifica que igual al  $yodQ_r$  es  $\int dQ_r$

que viene dada por la Ecuación 20.14. Usando este resultado, encontramos que el cambio de entropía  $V_f$ , para el gas es

$$\delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (22.11)$$

Como  $V_f > V_i$ , concluimos que  $S$  es positivo. Este resultado positivo indica que tanto la entropía como el desorden del gas aumentan como resultado de la expansión adiabática irreversible.

Es fácil ver que el gas está más desordenado después de la expansión. En lugar de concentrarse en un espacio relativamente pequeño, las moléculas se dispersan en una región más grande.

Debido a que la expansión libre tiene lugar en un recipiente aislado, no se transfiere energía por el calor de los alrededores. (Recuerde que la expansión reversible isotérmica es solo un proceso de reemplazo que se usa para calcular el cambio de entropía del gas; no es el proceso real). Por lo tanto, la expansión libre no tiene efecto en el entorno, y el cambio de entropía del entorno es cero

## 22.8 Entropía a escala microscópica

Como hemos visto, la entropía puede abordarse basándose en conceptos macroscópicos. La entropía también se puede tratar desde un punto de vista microscópico a través del análisis estadístico de los movimientos moleculares. Usemos un modelo microscópico para investigar una vez más la expansión libre de un gas ideal, que se analizó desde un punto de vista macroscópico en la Sección 22.7.

En la teoría cinética de los gases, las moléculas de gas se representan como partículas que se mueven al azar. Suponga que el gas está inicialmente confinado al volumen  $V_i$  que se muestra en la figura 22.14. Cuando se retira la membrana, las moléculas finalmente se distribuyen por el mayor volumen  $V_f$  de todo el recipiente. Para una distribución uniforme dada de gas en el volumen, hay un gran número de microestados equivalentes, y la entropía del gas puede relacionarse con el número de microestados correspondientes a un macroestado dado.

Contemos el número de microestados considerando la variedad de ubicaciones moleculares disponibles para las moléculas. En el instante en que se retira la partición (y antes de que las moléculas hayan tenido la oportunidad de precipitarse hacia la otra mitad del recipiente), todas las moléculas están en el volumen inicial. Supongamos que cada molécula ocupa un volumen microscópico  $V_m$ . El número total de ubicaciones posibles de una sola molécula en un volumen inicial macroscópico  $V_i$  es la relación  $w_i = V_i/V_m$ , que es un número enorme. Usamos  $w_i$  aquí para representar el número de formas en que se puede colocar la molécula en el volumen inicial o el número de microestados, que es equivalente al número de ubicaciones disponibles. Suponemos que las probabilidades de que una molécula ocupe cualquiera de estos lugares son iguales.

A medida que se agregan más moléculas al sistema, se multiplica el número de formas posibles en que las moléculas se pueden colocar en el volumen. Por ejemplo, si considera dos moléculas, para cada ubicación posible de la primera, todas las ubicaciones posibles de la segunda están disponibles. Por lo tanto, hay  $w_i$  formas de ubicar la primera molécula, y para cada forma, hay  $w_i$  formas de ubicar la segunda molécula.

El número total de formas de ubicar las dos moléculas es  $w_i w_i = w_i^2$ .

Despreciando la muy pequeña probabilidad de que dos moléculas ocupen la misma ubicación, cada molécula puede ir a cualquiera de las ubicaciones  $V_i/V_m$ , por lo que el  $1/V_i > V_m^2$  de formas de ubicar  $N$  moléculas en el volumen se convierte en  $W_i^N$  número en  $W_i^N$  ( $W_i$  no debe confundirse con el trabajo). De manera similar, cuando el volumen aumenta a  $V_f$ , el número de formas de ubicar  $N$  moléculas aumenta a  $1/V_f > V_m^N$ . El  $W_f^N$  en relación con el número de formas de ubicar las moléculas en el volumen para el inicial y configuraciones finales es

$$\frac{w_f}{w_i} = \frac{1/V_f > V_m^{N_{\text{final}}}}{1/V_i > V_m^{N_{\text{initial}}}} = \frac{V_i}{V_f} \frac{V_f}{V_i} = \frac{V_i}{V_f}$$

Tomando el logaritmo natural de esta ecuación y multiplicando por la constante de Boltzmann da

$$\frac{w_f}{k_B \ln w_f} b \frac{k_B \ln w_i}{v_i} n N_A k_B \ln \frac{v_f}{v_i} b$$

donde hemos utilizado la igualdad  $N = N_A k_B$ . Sabemos por la Ecuación 19.11 que  $N_A k_B$  es la constante universal de los gases R; por lo tanto, podemos escribir esta ecuación como

$$k_B \ln w_f k_B \ln w_i n R \ln \frac{v_f}{v_i} b \quad (22.12)$$

De la Ecuación 22.11, sabemos que cuando un gas experimenta una expansión libre a partir de  $v_i$  a  $v_f$ , del cambio de entropía de

$$S_f - S_i = n R \ln \frac{v_f}{v_i} b \quad (22.13)$$

Observe que los lados derechos de las Ecuaciones 22.12 y 22.13 son idénticos. Por lo tanto, desde los lados izquierdos, hacemos la siguiente conexión importante entre la entropía y el número de microestados para un macroestado dado:

Entropía (definición  
microscópica)

$$S = k_B \ln W \quad (22.14)$$

Cuantos más microestados haya que correspondan a un macroestado dado, mayor será la entropía de ese macroestado. Como se discutió anteriormente, hay muchos más microestados asociados con macroestados desordenados que con macroestados ordenados.

Por lo tanto, la Ecuación 22.14 indica matemáticamente que la entropía es una medida del desorden. Aunque nuestra discusión utilizó el ejemplo específico de la expansión libre de un gas ideal, un desarrollo más riguroso de la interpretación estadística de la entropía nos llevaría a la misma conclusión.

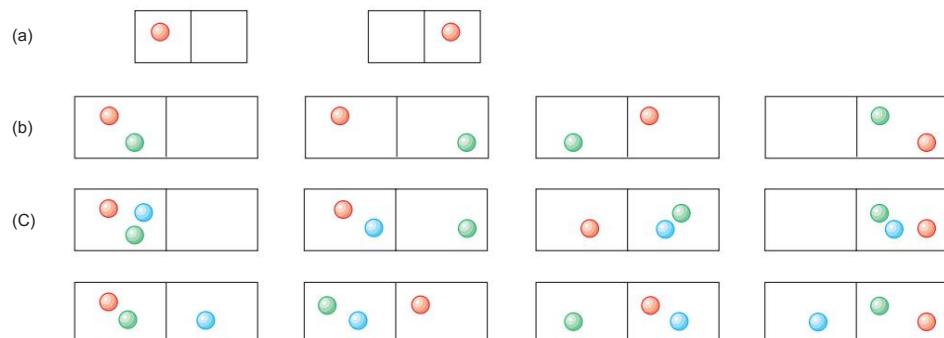
Hemos dicho que los microestados individuales son igualmente probables. Sin embargo, debido a que hay muchos más microestados asociados con un macroestado desordenado que con un macroestado ordenado, un macroestado desordenado es mucho más probable que uno ordenado.

Exploraremos este concepto considerando 100 moléculas en un recipiente. En cualquier momento dado, la probabilidad de que una molécula esté en la parte izquierda del recipiente que se muestra en la figura activa 22.15a como resultado de un movimiento aleatorio. Si hay dos moléculas como se muestra en la Figura activa 22.15b, la probabilidad de que ambas estén en la parte izquierda es de 1 en 4. Si hay tres moléculas (Figura activa 22.15c), la probabilidad de que todas estén en la parte izquierda en el mismo momento es de 1 en 8. Para 100 moléculas que se mueven independientemente, la probabilidad de que las 50 más rápidas se encuentren en la parte izquierda en cualquier momento es de 1 en 10<sup>30</sup>. Del mismo modo, la probabilidad de que las 50 moléculas más lentas restantes se encuentren en la parte correcta en cualquier momento es de 1 en 10<sup>30</sup>. Por lo tanto, la probabilidad de encontrar esta separación rápido-lento como resultado de random es el producto de 10<sup>30</sup> × 10<sup>30</sup> = 10<sup>60</sup>, que corresponde a aproximadamente 1 en 10<sup>1030</sup>. Este cálculo se extiende a 100 moléculas al número en 1 mol de gas (6.02 × 10<sup>23</sup>), se encuentra que el arreglo ordenado es extremadamente improbable.

### FIGURA ACTIVA 22.15

(a) Una molécula en un recipiente tiene una probabilidad de 1 en 2 de estar en el lado izquierdo. (b) Dos moléculas tienen una probabilidad de 1 en 4 de estar en el lado izquierdo al mismo tiempo. (c) Tres moléculas tienen una probabilidad de 1 en 8 de estar en el lado izquierdo al mismo tiempo.

Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para elegir el número de moléculas que colocar en el recipiente y medir la probabilidad de que todas estén en el lado izquierdo.



**EJEMPLO CONCEPTUAL 22.7**

¡Juguemos a las canicas!

Suponga que tiene una bolsa de 100 canicas, de las cuales 50 son rojas y 50 verdes. Se le permite sacar cuatro canicas de la bolsa de acuerdo con las siguientes reglas. Dibuja una canica, anota su color y devuélvela a la bolsa.

Agite la bolsa y luego saque otra canica. Continúe este proceso hasta que haya sacado y devuelto cuatro canicas. ¿Cuáles son los posibles macroestados para este conjunto de eventos? ¿Cuál es el macroestado más probable? ¿Cuál es el macroestado menos probable?

**SOLUCIÓN**

Debido a que cada canica se devuelve a la bolsa antes de sacar la siguiente y luego se agita la bolsa, la probabilidad de sacar una canica roja es siempre la misma que la probabilidad de sacar una verde. Todos los microestados y macroestados posibles se muestran en la tabla 22.1. Como indica esta tabla, solo hay una forma de dibujar un macroestado de cuatro canicas rojas, por lo que solo hay un microestado para ese macroestado. Sin embargo, hay cuatro microestados posibles que corresponden al macroestado de una canica verde y tres canicas rojas, seis microestados que corresponden a dos canicas verdes y dos canicas rojas, cuatro microestados que corresponden a tres canicas verdes y una canica roja, y uno microestado que corresponde a cuatro canicas verdes.

El macroestado más probable y más desordenado (dos canicas rojas y dos canicas verdes) corresponde al mayor número de microestados. Los macroestados menos probables y más ordenados (cuatro canicas rojas o cuatro canicas verdes) corresponden al menor número de microestados.

**TABLA 22.1**

Posibles resultados de sacar cuatro canicas de una bolsa

macroestado	Posibles microestados	Total Número de microestados
Todo R	RRRRR	1
1G, 3R	RRRG, RRGR, RGRR, GRRR	4
2G, 2R	RRGG, RGRG, GRRG, RGGR, GRGR, GGRR	6
3G, 1R	GGGR, GGRG, GRGG, RGGG	4
Todo G	GGGG	1

**EJEMPLO 22.8**

Expansión libre adiabática: una última vez

Verifiquemos que los enfoques macroscópico y microscópico del cálculo de la entropía conducen a la misma conclusión para la expansión libre adiabática de un gas ideal. Suponga que un gas ideal se expande cuatro veces su volumen inicial. Como hemos visto para este proceso, las temperaturas inicial y final son las mismas.

(A) Utilizando un enfoque macroscópico, calcule el cambio de entropía del gas.

**SOLUCIÓN**

Conceptualizar Vuelva a mirar la figura 22.14, que es un diagrama del sistema antes de la expansión libre adiabática. Imagine romper la membrana para que el gas se mueva hacia el área evacuada. La expansión es irreversible.

Categorizar Podemos reemplazar el proceso irreversible con un proceso isotérmico reversible entre los mismos estados inicial y final. Este enfoque es macroscópico, por lo que usamos variables de estado termodinámicas como P, V y T.

Analizar Use la Ecuación 22.11 para evaluar el cambio de entropía:

$$\Delta S = \frac{Nk_B}{V_f} \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right)$$

(B) Usando consideraciones estadísticas, calcule el cambio en la entropía del gas y demuestre que concuerda con la respuesta que obtuvo en la parte (A).

**SOLUCIÓN**

Categorizar Este enfoque es microscópico, por lo que usamos variables relacionadas con las moléculas individuales.

Analizar El número de microestados disponibles para una sola molécula en el volumen inicial  $V_i$  es  $w_i = V_i / V_m$ . Use este número para encontrar el número de microestados disponibles para  $N$  moléculas:

$$w_i^N = \frac{V_i^N}{V_m^N}$$

Encuentre el número de microestados disponibles para  $N$  moléculas en el volumen final  $V_f$ :

$$w_f^N = \frac{V_f^N}{V_m^N}$$

Use la ecuación 22.14 para encontrar el cambio de entropía:

$$\oint S \, dQ = \frac{W_f - W_i}{T_{\text{constant}}}$$

$$\frac{W_f}{V_f} = \frac{W_i}{V_i}$$

$$k_B \ln 14N^2 Nk_B \ln 4 nR \ln 4$$

Finalizar La respuesta es la misma que para la parte (A), que trata de parámetros macroscópicos.

**¿Y si?** En la parte (A), usamos la ecuación 22.11, que se basó en un proceso isotérmico reversible que conecta los estados inicial y final. ¿Llegaría al mismo resultado si eligiera un proceso reversible diferente?

Respuesta Debes llegar al mismo resultado porque la entropía es una variable de estado. Por ejemplo, considere el proceso de dos pasos de la figura 22.16: una expansión adiabática reversible de  $V_i$  a  $4V_i$  ( A S B ) durante la cual la temperatura cae de  $T_1$  a  $T_2$  y un proceso isovolumétrico reversible ( B S C ) que lleva al gas volver a la temperatura inicial  $T_1$ . Durante el proceso adiabático reversible,  $S \rightarrow Q/r$

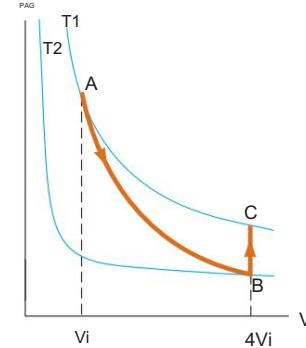


Figura 22.16 (Ejemplo 22.8) Un gas se expande cuatro veces su volumen inicial y vuelve a la temperatura inicial mediante un proceso de dos pasos.

Para el proceso isovolumétrico reversible (B S C), use la Ecuación 22.9:

$$\oint S \, dQ = \int_i^r \frac{dQ}{T} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} nCV \, dT = nCV \ln \frac{T_1}{T_2}$$

Encuentre la relación de temperatura  $T_2$  a  $T_1$  de la Ecuación 21.20 para el proceso adiabático:

$$\frac{T_1}{T_2} = a \frac{V_i}{4V_i} b^{g_1} = 142^{g_1}$$

Sustituye para encontrar S:

$$\oint S \, dQ = nCV \ln 142^{g_1} = CVN \ln 142^{g_1}$$

$$nCV \ln \frac{1}{CV} = 1 b \ln 4 n 1CP CV 2 \ln 4 nR \ln 4$$

y de hecho obtiene exactamente el mismo resultado para el cambio de entropía.

## Resumen

ThomsonNOW® Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para realizar un examen de práctica para este capítulo.

### DEFINICIONES

La eficiencia térmica  $\eta$  de una máquina térmica es

$$\eta = \frac{w_{\text{engrue}}}{Q_{\text{calor}}} = \frac{Q_{\text{calor}} - Q_{\text{pérdida}}}{Q_{\text{calor}}} = 1 - \frac{Q_{\text{pérdida}}}{Q_{\text{calor}}} \quad (22.2)$$

Desde un punto de vista microscópico, la entropía de un macroestado dado se define como

$$S = k_B \ln W \quad (22.14)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann y  $W$  es el número de microestados del sistema correspondientes al macroestado.

En un proceso reversible, el sistema puede regresar a sus condiciones iniciales a lo largo del mismo camino en un diagrama PV, y cada punto a lo largo de este camino es un estado de equilibrio. Un proceso que no satisface estos requisitos es irreversible.

(continuado)

## CONCEPTOS Y PRINCIPIOS

Una máquina térmica es un dispositivo que toma energía por calor y, operando en un proceso cíclico, expulsa una fracción de esa energía por medio de trabajo. El trabajo neto realizado por una máquina térmica al transportar una sustancia de trabajo a través de un proceso cíclico ( $E_{int} = 0$ ) es

$$W_{eng} = Q_h - Q_c \quad (22.1)$$

donde  $Q_h$  es la energía absorbida de un reservorio caliente y  $Q_c$  es la energía expulsada a un reservorio frío.

Las dos formas en que se puede enunciar la segunda ley de la termodinámica son las siguientes:

- Es imposible construir una máquina térmica que, operando en un ciclo, no produzca otro efecto que la entrada de energía por calor de un depósito y la realización de una cantidad igual de trabajo (el enunciado de Kelvin-Planck).
- Es imposible construir una máquina cíclica cuyo único efecto sea la transferencia continua de energía por calor de un objeto a otro objeto a una temperatura más alta sin la entrada de energía por trabajo (el enunciado de Clausius).

El teorema de Carnot establece que ninguna máquina térmica real que funcione (irreversiblemente) entre las temperaturas  $T_c$  y  $T_h$  puede ser más eficiente que una máquina que funcione reversiblemente en un ciclo de Carnot entre las mismas dos temperaturas.

La eficiencia térmica de una máquina térmica que opera en el ciclo de Carnot es

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (22.6)$$

La segunda ley de la termodinámica establece que cuando ocurren procesos reales (irreversibles), aumenta el grado de desorden en el sistema más el entorno. Cuando un proceso ocurre en un sistema aislado, el estado del sistema se vuelve más desordenado. La medida del desorden en un sistema se llama entropía  $S$ . Por lo tanto, otra forma en que se puede enunciar la segunda ley es la siguiente:

- La entropía del Universo aumenta en todos los procesos reales.

El cambio de entropía  $dS$  de un sistema durante un proceso entre dos estados de equilibrio infinitesimalmente separados es

$$dS = \frac{dQ_r}{T} \quad (22.8)$$

donde  $dQ_r$  es la transferencia de energía por calor del sistema para un proceso reversible que conecta los estados inicial y final.

El cambio de entropía de un sistema durante un proceso arbitrario entre un estado inicial y un estado final es

$$\Delta S = \int_i^f \frac{dq_r}{T} \quad (22.9)$$

El valor de  $S$  para el sistema es el mismo para todos los caminos que conectan los estados inicial y final. El cambio de entropía para un sistema que experimenta cualquier proceso cíclico reversible es cero, y cuando ocurre tal proceso, la entropía del Universo permanece constante.

## Preguntas

denota respuesta disponible en Student Solutions Manual/Study Guide; O denota pregunta objetiva

1. ¿Cuáles son algunos factores que afectan la eficiencia de los motores móviles de automóviles?
2. O Considere procesos cíclicos completamente caracterizados por cada una de las siguientes entradas y salidas de energía neta. En cada caso, las transferencias de energía enumeradas son las únicas que ocurren. Clasifique cada proceso como (a) posible, (b) imposible de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, (c) imposible de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica o (d) imposible de acuerdo con la primera y la segunda ley. (i) La entrada es 5 J de trabajo y la salida es 4 J de trabajo. (ii) La entrada es 5 J de trabajo y la salida es 5 J de energía transferida por calor. (iii) La entrada es 5 J de energía transferida por calor

por transmisión eléctrica y la salida es de 6 J de trabajo. (iv) La entrada es 5 J de energía transferida por calor y la salida es 5 J de energía transferida por calor. (v) La entrada es 5 J de energía transferida por calor y la salida es 5 J de trabajo. (vi) La entrada es 5 J de energía transferida por calor y la salida es 3 J de trabajo más 2 J de energía transferida por calor. (vii) La entrada es 5 J de energía transferida por calor y la salida es 3 J de trabajo más 2 J de energía transferida por ondas mecánicas. (viii) La entrada es 5 J de energía transferida por calor y la salida es 3 J de trabajo más 1 J de energía transferida por radiación electromagnética.

3. Una turbina impulsada por vapor es un componente principal de una planta de energía eléctrica. ¿Por qué es ventajoso tener la temperatura del vapor lo más alta posible?
4. ¿La segunda ley de la termodinámica contradice o corrige la primera ley? Argumenta tu respuesta.
5. "La primera ley de la termodinámica dice que realmente no puedes ganar, y la segunda ley dice que ni siquiera puedes alcanzar el punto de equilibrio". Explique cómo se aplica esta declaración a un dispositivo o proceso en particular; alternativamente, argumentar en contra de la afirmación.
6. O La flecha OA en el diagrama PV que se muestra en la figura Q22.6 representa una expansión adiabática reversible de un gas ideal. La misma muestra de gas, partiendo del mismo estado O, experimenta ahora una expansión libre adiabática hasta el mismo volumen final. ¿Qué punto del diagrama podría representar el estado final del gas? (a) el mismo punto A que para la expansión reversible (b) el punto B (c) el punto C (d) cualquiera de estas opciones (e) ninguna de estas opciones

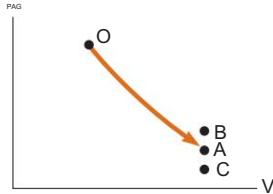


Figura Q22.6

7. Da varios ejemplos de procesos irreversibles que ocurren en la naturaleza. Dé un ejemplo de un proceso en la naturaleza que sea casi reversible.

8. El dispositivo que se muestra en la figura P22.8, llamado convertidor termoeléctrico, utiliza una serie de celdas semiconductoras para transformar la energía interna en energía potencial eléctrica, que estudiaremos en el capítulo 25. En la fotografía de la izquierda, ambas patas de el dispositivo están a la misma temperatura y no se produce energía potencial eléctrica. Sin embargo, cuando una pata está a una temperatura más alta que la otra, como se muestra en la fotografía de la derecha, se produce energía potencial eléctrica a medida que el dispositivo extrae energía del depósito caliente y acciona un pequeño motor eléctrico. (a) ¿Por qué es necesaria la diferencia de temperatura para producir energía potencial eléctrica en esta demostración? (b) ¿En qué sentido este intrigante experimento demuestra la segunda ley de la termodinámica?



Figura Q22.8

9. O Suponga que llega a su hogar en un apartamento pequeño y cálido en un edificio bien aislado en una tarde de verano. La tienda de electrodomésticos acaba de entregar su nuevo acondicionador de aire, pero está demasiado cansado para instalarlo correctamente. Hasta que se ponga el sol, hará más calor afuera que adentro, así que no abras una ventana. (i) Te llevas el aire acondicionado

sáquelo de su caja, colóquelo en la mesa del comedor, enchúfelo y enciéndalo. ¿Qué pasa con la temperatura del apartamento? (a) Aumenta. (b) Disminuye. (c) Permanece constante. (ii) Suponga que, en cambio, toma rápidamente todos los cubitos de hielo y las verduras congeladas del compartimiento de congelación del refrigerador, los coloca en un recipiente sobre la mesa y cierra el refrigerador. ¿Qué pasa ahora con la temperatura del apartamento? Elige entre las mismas posibilidades.

10. O (i) La segunda ley de la termodinámica implica que el coeficiente de rendimiento de un refrigerador debe ser (a) menor que 1, (b) menor o igual a 1, (c) mayor o igual a 1, (d) menor que infinito, o (e) mayor que 0. (ii) ¿Qué implica la segunda ley de la termodinámica que debe ser el coeficiente de rendimiento de una bomba de calor? Elige entre las mismas posibilidades.
11. Discuta tres ejemplos comunes diferentes de procesos naturales que involucran un aumento en la entropía. Asegúrese de tener en cuenta todas las partes de cada sistema bajo consideración.
12. Analice el cambio de entropía de un gas que se expande (a) a temperatura constante y (b) adiabáticamente.
13. O Se produce un proceso termodinámico en el que la entropía de un sistema cambia en 8 J/K. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, ¿qué puedes concluir sobre el cambio de entropía del medio ambiente? (a) Debe ser de 8 J/K o menos. (b) Debe ser igual a 8 J/K. (c) Debe estar entre 8 J/K y 0. (d) Debe estar entre 0 y 8 J/K. (e) Debe estar entre 0 y 8 J/K. (f) Debe ser igual a 8 J/K o más. (g) Necesitaríamos conocer la naturaleza del proceso para llegar a una conclusión. (h) Es imposible que el sistema tenga un cambio de entropía negativo.

14. O Una muestra de un gas ideal monoatómico está contenida en un cilindro con un pistón. Su estado está representado por el punto en el diagrama PV que se muestra en la Figura Q22.14. Las flechas A a H representan procesos isotérmicos, isobáricos, isovolumétricos y adiabáticos que puede sufrir la muestra. En cada compresión y expansión, el volumen cambia por un factor de 2. (a) Clasifique estos procesos de acuerdo con el trabajo  $W = \int P dV$  realizado por el gas desde el valor positivo más grande hasta el valor negativo de mayor magnitud. En su clasificación, muestre cualquier caso de igualdad. (b) Clasifique los mismos procesos de acuerdo con el cambio en la energía interna del gas desde el valor positivo más grande hasta el valor negativo de mayor magnitud. (c) Clasifique los mismos procesos de acuerdo con la energía transferida a la muestra por calor.

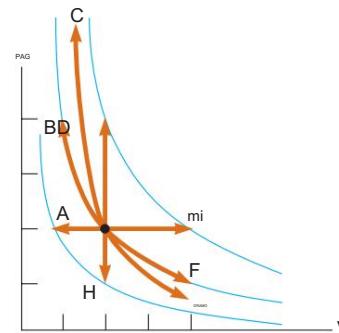


Figura P22.14

15. O Considere los procesos que se muestran en la Figura P22.14 y se describen en la Pregunta 14. Clasifique los procesos A a H de acuerdo con el cambio de entropía de la muestra de gas ideal monoatómico desde el valor positivo más grande hasta el de magnitud más grande. valor negativo.

16. El escape de energía de cierta estación generadora de electricidad alimentada con carbón es transportada por "agua de enfriamiento" al lago Ontario. El agua es cálida desde el punto de vista de los seres vivos en el lago. Algunos de ellos se congregan alrededor del puerto de salida y pueden impedir el flujo de agua. (a) Utilice la teoría de los motores térmicos para explicar por qué esta acción puede reducir la producción de energía eléctrica de la estación. (b) Un ingeniero dice que la producción eléctrica se reduce debido a la "mayor contrapresión en las palas de la turbina". Comente sobre la exactitud de esta afirmación.
17. O Suponga que una muestra de un gas ideal está a temperatura ambiente. ¿Qué acción necesariamente hará que aumente la entropía de la muestra? (a) transferir energía hacia él mediante el calor (b) transferir energía hacia él de manera irreversible mediante el calor (c) realizar trabajo sobre él (d) aumentar su temperatura o su volumen, sin permitir que la otra variable disminuya (e) ninguno de estos opciones
18. Suponga que su compañero de cuarto es "Sr. Clean" y ordena tu habitación desordenada después de una gran fiesta. Debido a que su compañero de cuarto está creando más orden, ¿representa este proceso una violación de la segunda ley de la termodinámica?
19. "La energía es la dueña del Universo y la entropía es su sombra." Escribiendo para una audiencia de lectores generales, argumente esta afirmación con ejemplos. Alternativamente, argumente a favor de la opinión de que la entropía es como un ejecutivo práctico y decisivo que determina instantáneamente lo que sucederá, mientras que la energía es como un contable de oficina que nos dice lo poco que podemos permitirnos. (Arnold Sommerfeld sugirió la idea de esta pregunta).
20. Si agitas un frasco lleno de gominolas de diferentes tamaños, las gominolas más grandes tienden a aparecer cerca de la parte superior y las más pequeñas tienden a caer al fondo. ¿Por qué? ¿Viola este proceso la segunda ley de la termodinámica?

## Problemas

**WebAssign** Los problemas de este capítulo se pueden asignar en línea en WebAssign.

**ThomsonNOW™** Regístrate en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com) y vaya a ThomsonNOW para evaluar su comprensión de los temas de este capítulo con cuestionarios adicionales y preguntas conceptuales.

1, 2, 3 denota sencillo, intermedio, desafiante; indica la solución completa disponible en el Manual de soluciones para estudiantes/Guía de estudio; indica una solución guiada con sugerencias disponibles en [www.thomsonedu.com](http://www.thomsonedu.com); denota desarrollo de razonamiento simbólico; denota pedir un razonamiento cualitativo; indica que la computadora es útil para resolver problemas

### Sección 22.1 Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

1. Una máquina térmica toma 360 J de energía de un depósito caliente y realiza 25,0 J de trabajo en cada ciclo. Encuentre (a) la eficiencia del motor y (b) la energía expulsada al depósito frío en cada ciclo.
2. Una pistola es un motor térmico. En particular, es un motor de pistón de combustión interna que no opera en un ciclo, sino que se deshace durante su proceso de expansión adiabática. Cierta pistola consta de 1.80 kg de hierro. Dispara una bala de 2,40 g a 320 m/s con una eficiencia energética del 1,10 %. Suponga que el cuerpo del arma absorbe toda la energía de escape (el otro 98,9 %) y aumenta uniformemente la temperatura durante un breve intervalo de tiempo antes de que pierda energía por calor en el medio ambiente. Encuentre su aumento de temperatura.
3. Una máquina térmica particular tiene una potencia mecánica de salida de 5,00 kW y una eficiencia de 25,0%. El motor expulsa 8 000 J de energía de escape en cada ciclo. Encuentre (a) la energía absorbida durante cada ciclo y (b) el intervalo de tiempo para cada ciclo.
4. Un motor de gasolina de cilindros múltiples en un avión, operando a 2 500 rev/min, toma 7.89 103 J de energía y gasta 4.58 103 J por cada revolución del cigüeñal. (a) ¿Cuántos litros de combustible consume en 1.00 h de operación si el calor de combustión es 4.03 107 J/L? (b) ¿Cuál es la salida de potencia mecánica del motor? Ignore la fricción y exprese la respuesta en caballos de fuerza. (c) ¿Cuál es el par de torsión ejercido por el cigüeñal sobre la carga? (d) ¿Qué potencia debe transferir el sistema de escape y enfriamiento del motor?
5. Suponga que una máquina térmica está conectada a dos depósitos de energía, uno es una piscina de aluminio fundido (660 °C) y el otro un bloque de mercurio sólido (38,9 °C). El motor funciona congelando 1,00 g de aluminio y fundiendo 15,0 g

de mercurio durante cada ciclo. El calor de fusión del aluminio es de 3,97 x 105 J/kg; el calor de fusión del mercurio es 1.18 104 J/kg. ¿Cuál es la eficiencia de este motor?

### Sección 22.2 Bombas de calor y refrigeradores

6. Un refrigerador tiene un coeficiente de desempeño igual a 5.00. El refrigerador toma 120 J de energía de un depósito frío en cada ciclo. Encuentre (a) el trabajo requerido en cada ciclo y (b) la energía expulsada al depósito caliente.
7. Un refrigerador tiene un coeficiente de desempeño de 3.00. El compartimiento de la bandeja de hielo está a 20,0 °C y la temperatura ambiente es de 22,0 °C. El refrigerador puede convertir 30,0 g de agua a 22,0 °C en 30,0 g de hielo a 20,0 °C cada minuto. ¿Qué potencia de entrada se requiere? Dé su respuesta en vatios.
8. En 1993, el gobierno de los EE. UU. instituyó el requisito de que todos los acondicionadores de aire para habitaciones vendidos en los EE. UU. debe tener un índice de eficiencia energética (EER) de 10 o superior. El EER se define como la relación entre la capacidad de enfriamiento del acondicionador de aire, medida en unidades térmicas británicas por hora, o Btu/h, y su requerimiento de energía eléctrica en vatios. (a) Convierta la EER de 10.0 a la forma adimensional, usando la conversión 1 Btu = 1 055 J. (b) ¿Cuál es el nombre apropiado para esta cantidad adimensional? (c) En la década de 1970, era común encontrar espacio acondicionadores de aire con EER de 5 o menos. Indique cómo el los costos de operación se comparan para acondicionadores de aire de 10 000 Btu/h con EER de 5.00 y 10.0. Suponga que cada aire acondicionado funciona durante 1 500 h durante el verano en una ciudad donde la electricidad cuesta 10,0 ¢ por kWh.

### Sección 22.3 Procesos reversibles e irreversibles

### Sección 22.4 La máquina de Carnot 9. Una

- de las máquinas térmicas más eficientes jamás construidas es una turbina de vapor en el valle del río Ohio, que opera entre

430°C y 1 870°C en la energía del carbón de Virginia Occidental para producir electricidad para el Medio Oeste. (a) ¿Cuál es su eficiencia teórica máxima? (b) La eficiencia real del motor es 42.0%. ¿Cuánta potencia mecánica entrega 105 J de energía el motor si segundo de su depósito caliente? toma 1.40 por

10. Un motor de Carnot tiene una potencia de salida de 150 kW. El motor opera entre dos depósitos a 20.0°C y 500°C. (a) ¿Cuánta energía consume por hora? (b) ¿Cuánta energía se pierde por hora en su escape?
11. Un motor opera en un ciclo, absorbiendo energía por calor a 180°C y expulsando gases a 100°C. En cada ciclo, la energía de escape es de 2,00 104 J y el motor realiza 1,50 103 J de trabajo. Explique cómo se compara la eficiencia real del motor con la eficiencia de un motor reversible que opera entre las mismas temperaturas.
12. Una máquina térmica de Carnot opera entre las temperaturas  $T_h$  y  $T_c$ . (a) Si  $T_h$  500 K y  $T_c$  350 K, ¿cuál es la eficiencia del motor? (b) ¿Cuál es el cambio en su eficiencia por cada grado de aumento en  $T_h$  por encima de 500 K? (c) ¿Cuál es el cambio en su eficiencia por cada grado de disminución en  $T_c$  por debajo de 350 K?
13. Se lleva un gas ideal a través de un ciclo de Carnot. La expansión isotérmica ocurre a 250°C y la compresión isotérmica a 50.0°C. El gas absorbe 1 200 J de energía del depósito caliente durante la expansión isotérmica. Encuentre (a) la energía expulsada al depósito frío en cada ciclo y (b) el trabajo neto realizado por el gas en cada ciclo.
14. Una central eléctrica opera con una eficiencia del 32,0 % durante el verano cuando el agua de mar que se usa para enfriar está a 20,0 °C. La planta utiliza vapor a 350°C para impulsar las turbinas. Si la eficiencia de la planta cambia en la misma proporción que la eficiencia ideal, ¿cuál es la eficiencia de la planta en invierno, cuando el agua de mar está a 10,0 °C?
15. El argón entra a una turbina a razón de 80.0 kg/min, una temperatura de 800 °C y una presión de 1.50 MPa. Se expande adiabáticamente cuando empuja los álabes de la turbina y sale a una presión de 300 kPa. (a) Calcule su temperatura a la salida. (b) Calcule la salida de potencia (máxima) de la turbina giratoria. (c) La turbina es un componente de un modelo de motor de turbina de gas de ciclo cerrado. Calcule la eficiencia máxima del motor.
16. Se ha propuesto una central eléctrica que aprovecharía el gradiente de temperatura del océano. El sistema debe funcionar entre 20,0 °C (temperatura del agua superficial) y 5,00 °C (temperatura del agua a una profundidad de aproximadamente 1 km). (a) ¿Cuál es la eficiencia máxima de dicho sistema? (b) Si la producción de energía eléctrica de la planta es de 75,0 MW, ¿cuánta energía se extrae del depósito caliente por hora? (c) En vista de su respuesta a la parte (a), explique si cree que tal sistema vale la pena. Tenga en cuenta que el "combustible" es gratis.

17. Suponga que construye un dispositivo de dos motores con la salida de energía de escape de un motor térmico suministrando la energía de entrada para un segundo motor térmico. Decimos que los dos motores funcionan en serie. Sean  $e_1$  y  $e_2$  las eficiencias de los dos motores. (a) La eficiencia general del dispositivo de dos motores se define como la producción de trabajo total dividida por la energía que el calor pone en el primer motor. Demuestre que la eficiencia global está dada por

mi mi 1 mi 2 mi 1e 2

(b) ¿Qué pasa si? Suponga que los dos motores son motores de Carnot. El motor 1 funciona entre las temperaturas  $T_h$  y  $T_i$ . La temperatura del gas en el motor 2 varía entre  $T_i$  y  $T_c$ . En cuanto a las temperaturas, ¿cuál es la eficiencia del motor combinado? ¿Resulta una mejora en la eficiencia neta del uso de dos motores en lugar de uno? (c) ¿Qué valor de la temperatura intermedia  $T_i$  da como resultado el mismo trabajo realizado por cada uno de los dos motores en serie? (d) ¿Qué valor de  $T_i$  da como resultado que cada uno de los dos motores en serie tenga la misma eficiencia?

18. Se diseña una central eléctrica para tener una potencia de salida eléctrica de 1,40 MW usando una turbina con dos tercios de la eficiencia de un motor de Carnot. La energía de escape se transfiere por calor a una torre de enfriamiento a 110°C. (a) Encuentre la tasa a la cual la estación agota energía por calor, en función de la temperatura de combustión del combustible  $T_h$ . Si se modifica la cámara de combustión para que funcione más caliente mediante el uso de tecnología de combustión más avanzada, ¿cómo cambia la cantidad de escape de energía? (b) Encuentre la potencia de escape para  $T_h$  800°C. (c) Encuentre el valor de  $T_h$  para el cual la potencia de escape sería solo la mitad de grande que en la parte (b). (d) Encuentre el valor de  $T_h$  para el cual la potencia de escape sería un cuarto de la del inciso (b).

19. ¿Cuál es el coeficiente de desempeño de un refrigerador que opera con eficiencia de Carnot entre temperaturas de 3.00°C y 27.0°C?

20. En el punto A de un ciclo de Carnot, 2,34 mol de un gas ideal monoatómico tiene una presión de 1 400 kPa, un volumen de 10,0 L y una temperatura de 720 K. El gas se expande isotérmicamente hasta el punto B y luego se expande adiabáticamente . al punto C, donde su volumen es de 24,0 L. Una compresión isotérmica lo lleva al punto D, donde su volumen es de 15,0 L. Un proceso adiabático devuelve el gas al punto A. (a) Determine todas las presiones, volúmenes y valores desconocidos. temperaturas a medida que completa la siguiente tabla:

	P TV		
A	1 400 kPa	10,0 litros	720K
B			
C		24,0 litros	
D		15,0 litros	

(b) Halle la energía añadida por el calor, el trabajo realizado por la máquina y el cambio de energía interna para cada uno de los pasos A S B, B S C, C S D y D S A. (c) Calcule la eficiencia  $W_{neto}/Q_h$ . Demuestre que es igual a  $1/T_C - 1/T_A$ , la eficiencia de Carnot.

21. Un refrigerador ideal o una bomba de calor ideal es equivalente a un motor de Carnot funcionando en reversa. Es decir, la energía  $Q_c$  se toma de un depósito frío y la energía  $Q_h$  se rechaza a un depósito caliente. (a) Demuestre que el trabajo que debe suministrarse para hacer funcionar el refrigerador o la bomba de calor es

$$W = \frac{el tc}{tc} Q_c$$

(b) Demuestre que el coeficiente de rendimiento del refrigerador ideal es

$$\text{POLICIA } \frac{tc}{el tc}$$

22. ¿ Cuál es el máximo coeficiente de rendimiento posible de una bomba de calor que trae energía del exterior a

3.00°C en una casa a 22.0°C? Nota: El trabajo realizado para ejecutar la bomba de calor también está disponible para calentar la casa.

23. ¿Cuánto trabajo requiere un refrigerador de Carnot ideal para extraer 1,00 J de energía del helio líquido a 4,00 K y rechazar esta energía en un ambiente a temperatura ambiente (293 K)?

24. Una bomba de calor utilizada para calefacción que se muestra en la figura P22.24 es esencialmente un acondicionador de aire instalado al revés. Extrae energía del aire exterior más frío y la deposita en una habitación más caliente. Suponga que la relación entre la energía real que entra en la habitación y el trabajo realizado por el motor del dispositivo es el 10,0 % de la relación máxima teórica. Determine la energía que ingresa a la habitación por joule de trabajo realizado por el motor, dado que la temperatura interior es de 20.0 °C y la temperatura exterior es de 5.00 °C.

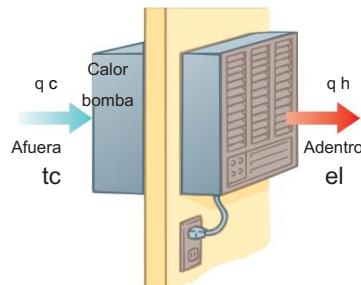


Figura P22.24

25. Un congelador ideal (Carnot) en una cocina tiene una temperatura constante de 260 K, mientras que el aire en la cocina tiene una temperatura constante de 300 K. Suponga que el aislamiento del congelador no es perfecto y conduce energía al congelador a una tasa de 0.150 W. Determine la potencia promedio requerida por el motor del congelador para mantener la temperatura constante en el congelador.

26. Si una máquina térmica de Carnot con una eficiencia del 35,0% (figura activa 22.2) se hace funcionar en sentido inverso para formar un refrigerador (figura activa 22.4), ¿cuál sería el coeficiente de rendimiento de este refrigerador?

#### Sección 22.5 Motores de gasolina y diesel 27. En un

- cilindro de un motor de automóvil, inmediatamente después de la combustión, el gas está confinado a un volumen de 50,0 cm<sup>3</sup> y tiene una presión inicial de 3,00 × 10<sup>6</sup> Pa. El pistón se mueve hacia afuera hasta un volumen final de 300 cm<sup>3</sup>, y el gas se expande sin pérdida de energía por calor. (a) Si g = 1.40 para el gas, ¿cuál es la presión final? (b) ¿Cuánto trabajo realiza el gas al expandirse?

28. La relación de compresión de un ciclo Otto, como se muestra en la figura activa 22.12, es VA/VB 8.00. Al principio A del proceso de compresión, 500 cm<sup>3</sup> de gas están a 100 kPa y 20,0°C. Al comienzo de la expansión adiabática, la temperatura es TC 750°C. Modele el fluido de trabajo como un gas ideal con Eint nCVT 2.50 nRT y g = 1.40. (a) Complete esta tabla para seguir los estados del gas:

	T (K)	P (kPa)	V (cm <sup>3</sup> )	Punto (J)
A	293	100	500	
B				
C	1 023			
D				
A				

(b) Complete esta tabla para seguir los procesos:

Q (entrada)	W (salida)	Evento
ASB __		
BSC __		
CSD __		
DS A __		
ABCPA		

(c) Identifique la entrada de energía Q h, la salida de energía y el trabajo de salida neto Weng. (d) Calcule la eficiencia térmica. (e) Encuentre el número de revoluciones del cigüeñal por minuto requeridas para que un motor de un cilindro tenga una potencia de salida de 1.00 kW 1.34 hp. Nota: El ciclo termodinámico implica cuatro carreras de pistón.

29. Un motor de gasolina tiene una relación de compresión de 6,00 y usa un gas para el cual g = 1.40. (a) ¿Cuál es la eficiencia del motor si opera en un ciclo Otto idealizado? (b) ¿Qué pasa si? Si la eficiencia real es del 15,0%, ¿qué fracción del combustible se desperdicia como resultado de la fricción y las pérdidas de energía por calor que podrían evitarse en un motor reversible? Suponga una combustión completa de la mezcla de aire y combustible.

#### Sección 22.6 Entropía 30.

Una cubeta de hielo contiene 500 g de agua líquida a 0°C. Calcule el cambio de entropía del agua a medida que se congela lenta y completamente a 0°C.

31. Una muestra que consta de una masa m de una sustancia con calor específico c se calienta desde la temperatura T<sub>i</sub> hasta la temperatura T<sub>f</sub>. Imagine que absorbe energía por calor sucesivamente de depósitos a temperaturas incrementalmente más altas T<sub>i</sub> d, T<sub>i</sub> 2d, T<sub>i</sub> 3d, ..., T<sub>f</sub>. Demuestre que el cambio de entropía de la muestra viene dado por mc ln (T<sub>f</sub>/T<sub>i</sub>).
32. Para hacer mermelada de fresa, se combinan 900 g de jugo de fresa con 930 g de azúcar. La mezcla comienza a temperatura ambiente, 23.0 °C, y se calienta lentamente en una estufa hasta que alcanza los 220 °F. Luego se vierte en frascos calientes y se deja enfriar. Suponga que el jugo tiene el mismo calor específico que el agua. El calor específico de la sacarosa es 0,299 cal/g °C. Considere el proceso de calentamiento. (a) ¿Cuál de los siguientes términos describe este proceso: adiabático, isobárico, isotérmico, isovolumétrico, cíclico, reversible, isoentrópico? Explique tu respuesta. (b) ¿Cuánta energía absorbe la mezcla? (c) ¿Cuál es el cambio mínimo en la entropía de la jalea mientras se calienta? Puede usar el resultado del Problema 31.

33. Calcule el cambio de entropía de 250 g de agua calentada lentamente de 20,0 °C a 80,0 °C. Puede usar el resultado del Problema 31.

#### Sección 22.7 Cambios de entropía en procesos irreversibles 34. La

temperatura en la superficie del Sol es de aproximadamente 5 700 K, y la temperatura en la superficie de la Tierra es de aproximadamente 290 K. ¿Qué cambio de entropía ocurre cuando se transfieren 1 000 J de energía por la radiación del Sol a la Tierra?

35. Un automóvil de 1 500 kg se mueve a 20,0 m/s. El conductor frena hasta detenerse. Los frenos se enfrian a la temperatura del aire circundante, que es casi constante a 20,0 °C. ¿Cuál es el cambio de entropía total? Puede usar el resultado del Problema 31.
36. Calcula el aumento de entropía del Universo cuando agregas 20,0 g de crema a 5,00 °C a 200 g de café a 60,0 °C.

Suponga que los calores específicos de la crema y el café son ambos de  $4,20 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ . Puede usar el resultado del Problema 31.

37. ¿Qué tan rápido estás haciendo personalmente que aumente la entropía del Universo en este momento? Calcule una estimación del orden de magnitud, indicando qué cantidades toma como datos y los valores que mide o estima para ellas.
38. Una herradura de hierro de 1,00 kg se saca de una fragua a  $900^\circ\text{C}$  y se deja caer en 4,00 kg de agua a  $10,0^\circ\text{C}$ . Suponiendo que no se pierde energía por calor hacia los alrededores, determine el cambio de entropía total del sistema de herradura más agua.  
Puede usar el resultado del Problema 31.

39. Una muestra de 1,00 mol de gas H<sub>2</sub> está contenida en el lado izquierdo del recipiente que se muestra en la figura P22.39, que tiene volúmenes iguales a la izquierda y a la derecha. El lado derecho está evacuado. Cuando se abre la válvula, el gas fluye hacia el lado derecho. ¿Cuál es el cambio de entropía final del gas? ¿Cambia la temperatura del gas? Suponga que el recipiente es tan grande que el hidrógeno se comporta como un gas ideal.

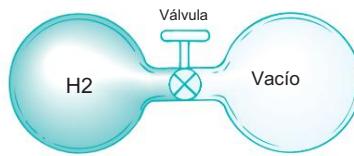


Figura P22.39

40. Un recipiente de 2,00 L tiene una partición central que lo divide en dos partes iguales, como se muestra en la figura P22.40. El lado izquierdo contiene gas H<sub>2</sub> y el lado derecho contiene gas O<sub>2</sub>. Ambos gases están a temperatura ambiente ya presión atmosférica. Se retira la partición y se permite que los gases se mezclen. ¿Cuál es el aumento de entropía del sistema?

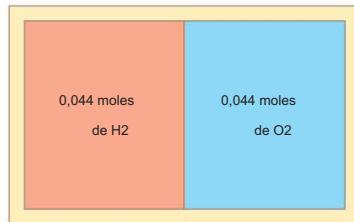


Figura P22.40

Sección 22.8 Entropía a escala microscópica 41. Si lanzas dos dados, ¿cuál es el número total de formas en que puedes obtener (a) un 12? (b) un 7?

42. Prepare una tabla como la Tabla 22.1 para la siguiente ocurrencia. Lanzas cuatro monedas al aire simultáneamente y luego registras los resultados de tus lanzamientos en términos del número de caras y cruces que resultan. Por ejemplo, HHTH y HTHH son dos formas posibles en las que se pueden lograr tres caras y una cruz. (a) Sobre la base de su tabla, ¿cuál es el resultado más probable registrado para un lanzamiento? En términos de entropía, (b) ¿cuál es el macroestado más ordenado y (c) cuál es el más desordenado?

43. Repita el procedimiento utilizado para construir la tabla 22.1 (a) para el caso en que saca tres canicas de su bolsa en lugar de cuatro y (b) para el caso en que saca cinco en lugar de cuatro.

#### Problemas adicionales

44. Cada segundo en las Cataratas del Niágara, unos 5 000 m<sup>3</sup> de agua caen a una distancia de 50,0 m. ¿Cuál es el aumento de entropía por

segundo debido a la caída del agua? Suponga que la masa de los alrededores es tan grande que su temperatura y la del agua permanecen casi constantes a  $20.0^\circ\text{C}$ . Suponga también que se evapora una cantidad insignificante de agua.

45. Una cámara de combustión está a 750 K y la temperatura ambiente es de 300 K. La eficiencia de una máquina de Carnot que realiza 150 J de trabajo mientras transporta energía entre estos baños a temperatura constante es del 60,0%. La máquina de Carnot debe recibir 150 J/0.600 = 250 J de energía del depósito caliente y debe emitir 100 J de energía por calor al ambiente. Para seguir el razonamiento de Carnot, suponga que otra máquina térmica S pudiera tener una eficiencia del 70,0%. (a) Encuentre la entrada de energía y la salida de energía desperdiciada del motor S cuando realiza 150 J de trabajo. (b) Deje que el motor S opere como en la parte (a) y haga funcionar el motor de Carnot en reversa. Encuentre la energía total que emite la cámara de combustión cuando ambos motores funcionan juntos y la energía total transferida al medio ambiente. Explique cómo los resultados muestran que se viola el enunciado de Clausius de la segunda ley de la termodinámica. (c) Encuentre la entrada de energía y la salida de trabajo del motor S cuando emite una energía de escape de 100 J. (d) Deje que el motor S opere como en la parte (c) y contribuya con 150 J de su salida de trabajo para hacer funcionar el motor de Carnot en reversa. Encuentre la energía total que emite la cámara de combustión cuando ambos motores funcionan juntos, la producción total de trabajo y la energía total transferida al medio ambiente. Explique cómo los resultados muestran que se cumple el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley. Por lo tanto, nuestra suposición sobre la eficiencia del motor S debe ser falsa. (e) Deje que los motores operen juntos durante un ciclo como en la parte (d). Encuentre el cambio en la entropía del Universo. Explique cómo el resultado muestra que se viola el enunciado de entropía de la segunda ley.

46. Problema de repaso. Este problema complementa el Problema 24 del Capítulo 10. En la operación de un motor de pistón de combustión interna de un solo cilindro, una carga de combustible explota para impulsar el pistón hacia afuera en la llamada carrera de potencia. Parte de su producción de energía se almacena en un volante giratorio. Luego, esta energía se usa para empujar el pistón hacia adentro para comprimir la siguiente carga de combustible y aire. En este proceso de compresión, suponga que un volumen original de 0.120 L de un gas ideal diatómico a presión atmosférica se comprime adiabáticamente a un octavo de su volumen original. (a) Encuentre la entrada de trabajo requerida para comprimir el gas. (b) Suponga que el volante es un disco sólido de 5,10 kg de masa y 8,50 cm de radio, que gira libremente sin fricción entre la carrera de potencia y la carrera de compresión. ¿A qué velocidad debe girar el volante inmediatamente después de la carrera de potencia? Esta situación representa la velocidad angular mínima a la que puede funcionar el motor; está a punto de estancarse. (c) Cuando la operación del motor está muy por encima del punto de calado, suponga que el volante pone el 5,00% de su energía máxima en comprimir la siguiente carga de combustible y aire. Encuentre su rapidez angular máxima en este caso.

47. Una casa pierde energía a través de las paredes exteriores y el techo a razón de 5 000 J/s, 5,00 kW cuando la temperatura interior es de  $22,0^\circ\text{C}$  y la temperatura exterior es de  $5,00^\circ\text{C}$ . (a) Calcule la energía eléctrica requerida para mantener la temperatura interior a  $22.0^\circ\text{C}$  si la energía eléctrica se usa en calentadores de resistencia eléctrica que convierten toda la energía transferida por transmisión eléctrica en energía interna. (b) ¿Qué pasa si? Calcule la potencia eléctrica requerida para mantener la temperatura interior a  $22.0^\circ\text{C}$  si el elec

La energía eléctrica se utiliza para accionar un motor eléctrico que acciona el compresor de una bomba de calor que tiene un coeficiente de rendimiento igual al 60,0% del valor del ciclo de Carnot.

48. Una máquina térmica opera entre dos depósitos en T2 600 K y T1 350 K. Toma 1 000 J de energía del depósito de mayor temperatura y realiza 250 J de trabajo. Encuentre (a) el cambio de entropía del Universo SU para este proceso y (b) el trabajo W que podría haber realizado una máquina ideal de Carnot operando entre estos dos depósitos. (c) Demuestre que la diferencia entre las cantidades de trabajo realizado en los incisos (a) y (b) es T1 SU.

49. En 1816, Robert Stirling, un clérigo escocés, patentó el motor Stirling, que desde entonces ha encontrado una amplia variedad de aplicaciones. El combustible se quema externamente para calentar uno de los dos cilindros del motor. Una cantidad fija de gas inerte se mueve cíclicamente entre los cilindros, expandiéndose en el caliente y contrayéndose en el frío. La figura P22.49 representa un modelo para su ciclo termodinámico. Considere n mol de un gas monoatómico ideal que se toma una vez a través del ciclo, que consta de dos procesos isotérmicos a temperaturas 3Ti y Ti y dos procesos de volumen constante. Determine en términos de n, R y Ti (a) la energía neta transferida por calor al gas y (b) la eficiencia del motor. Un motor Stirling es más fácil de fabricar que un motor de combustión interna o una turbina.

Puede funcionar con basura en llamas. Puede funcionar con la energía de la luz solar y no producir escape de material.

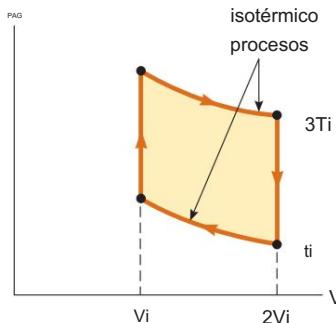


Figura P22.49

50. Un atleta cuya masa es de 70,0 kg bebe 16 onzas (453,6 g) de agua refrigerada. El agua está a una temperatura de 35.0°F. (a) Ignorando el cambio de temperatura del cuerpo que resulta de la entrada de agua (de modo que el cuerpo se considere como un depósito siempre a 98.6 °F), encuentre el aumento de entropía de todo el sistema. (b) ¿Qué pasa si? Suponga que la bebida enfriá todo el cuerpo y que el calor específico promedio de una persona es igual al calor específico del agua líquida. Ignorando cualquier otra transferencia de energía por calor y cualquier liberación de energía metabólica, encuentre la temperatura del atleta después de beber el agua fría, dada una temperatura corporal inicial de 98.6°F. Bajo estos supuestos, ¿cuál es el aumento de entropía de todo el sistema? Indique cómo se compara este resultado con el que obtuvo en la parte (a).

51. Una central eléctrica, con una eficiencia de Carnot, produce 1 000 MW de energía eléctrica a partir de turbinas que toman vapor a 500 K y expulsan agua a 300 K en un río que fluye. El agua aguas abajo es 6.00 K más caliente debido a la salida de la planta de energía. Determine el caudal del río.

52. Una central eléctrica, que tiene una eficiencia de Carnot, produce energía eléctrica a partir de turbinas que toman energía del vapor a temperatura Th y descargan energía a temperatura Tc a través de un intercambiador de calor en un río que fluye. El agua corriente abajo está más caliente por T debido a la producción de la central eléctrica. Determine el caudal del río.

53. Un laboratorio de biología se mantiene a una temperatura constante de 7.00 °C mediante un acondicionador de aire, que se ventila hacia el exterior. En un típico día caluroso de verano, la temperatura exterior es de 27,0 °C y la unidad de aire acondicionado emite energía al exterior a razón de 10,0 kW. Modele la unidad con un coeficiente de rendimiento igual al 40,0 % del coeficiente de rendimiento de un dispositivo de Carnot ideal. (a) ¿A qué tasa extrae energía el acondicionador de aire del laboratorio? (b) Calcule la potencia requerida para la entrada de trabajo. (c) Encuentre el cambio de entropía producido por el acondicionador de aire en 1.00 h. (d) ¿Qué pasa si? La temperatura exterior aumenta a 32.0°C. Encuentre el cambio fraccionario en el coeficiente de desempeño del acondicionador de aire.

54. Una muestra de 1,00 mol de un gas monoatómico ideal se lleva a través del ciclo que se muestra en la figura P22.54. El proceso A → B es una expansión isotérmica reversible. Calcule (a) el trabajo neto realizado por el gas, (b) la energía añadida al gas por calor, (c) la energía expulsada del gas por calor y (d) la eficiencia del ciclo. (e) Explique cómo se compara la eficiencia con la de una máquina de Carnot que opera entre los mismos extremos de temperatura.

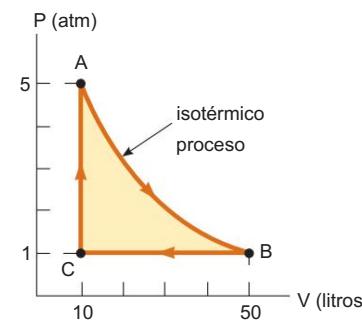


Figura P22.54

55. Se toma una muestra de 1,00 mol de un gas ideal monoatómico a través del ciclo que se muestra en la figura P22.55. En el punto A, la presión, el volumen y la temperatura son Pi, Vi y Ti, respectivamente. En términos de R y Ti, encuentre (a) la energía total que ingresa al sistema por calor por ciclo, (b) la energía total que sale del sistema por calor por ciclo, y (c) la eficiencia de un motor que opera en este ciclo. (d) Explique cómo se compara la eficiencia con la de un motor que opera en un ciclo de Carnot entre los mismos extremos de temperatura.

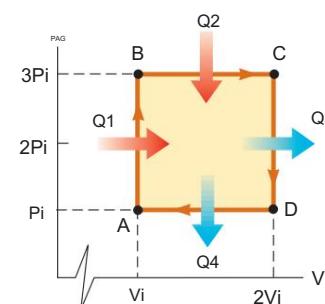


Figura P22.55

56. Una muestra que consta de  $n$  mol de un gas ideal sufre una expansión isobárica reversible desde el volumen  $V_i$  hasta el volumen  $3V_i$ . Encuentre el cambio en la entropía del gas calculando  $dQ/T$ , donde  $dQ = nCP \, dT$ .

57. Un sistema que consta de  $n$  mol de un gas ideal sufre dos procesos reversibles. Comienza con presión  $P_i$  y volumen  $V_i$ , se expande isotérmicamente y luego se contrae adiabáticamente para alcanzar un estado final con presión  $P_f$  y volumen  $3V_i$ . (a) Encuentre su cambio de entropía en el proceso isotérmico. (La entropía no cambia en el proceso adiabático.) (b) ¿Y si? Explique por qué la respuesta a la parte (a) debe ser la misma que la respuesta al Problema 56.

58. Una muestra de 1,00 mol de un gas ideal se expande isotérmicamente, duplicando su volumen. (a) Demuestre que el trabajo que realiza al expandirse es  $W = RT \ln 2$ . (b) Debido a que la energía interna  $E_{int}$  de un gas ideal depende únicamente de su temperatura, el cambio en la energía interna es cero durante la expansión. De la primera ley se sigue que la entrada de energía al gas por calor durante la expansión es igual a la salida de energía por trabajo. ¿Tiene este proceso una eficiencia del 100 % para convertir la entrada de energía por calor en salida de trabajo? ¿Esta conversión viola la segunda ley?

Explique sus respuestas.

59. Un motor diesel idealizado opera en un ciclo conocido como el ciclo diesel de aire estándar que se muestra en la figura P22.59. El combustible es

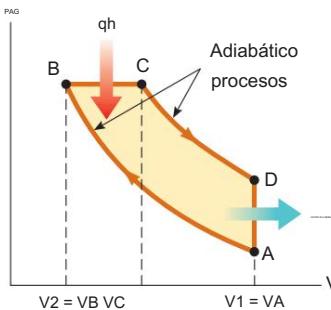


Figura P22.59

## Respuestas a cuestionarios rápidos

22.1 (i), (c). La ecuación 22.2 da este resultado directamente. (ii), (b).

El trabajo representa un tercio de la energía de entrada. Los dos tercios restantes deben ser expulsados al depósito frío.

22.2 (d). El COP de 4,00 para la bomba de calor significa que estás recibiendo cuatro veces más energía que la que entra por transmisión eléctrica. Con cuatro veces más energía por unidad de energía de la electricidad, solo necesitas una cuarta parte de esa electricidad.

22.3 C, B, A. Aunque los tres motores funcionan con una diferencia de temperatura de 300 K, la eficiencia depende de la relación de temperaturas, no de la diferencia. 22.4 (a) Un

microestado: los cuatro doses. (b) Seis microestados: trébol-diamante, trébol-corazón, trébol-pica, diamante-corazón, diamante-pica, corazón-pica. El macroestado de dos ases es más probable que el de cuatro doses en la parte (a) porque hay seis veces más microestados para este macroestado en particular en comparación con el macroestado

se rocía en el cilindro en el punto de máxima compresión, B. La combustión ocurre durante la expansión B S C, que se modela como un proceso isobárico. Demuestre que la eficiencia de un motor que opera en este ciclo diesel idealizado es

$$\frac{1}{\text{mi}} = \frac{1}{\text{q}_h + \frac{\text{q}_c}{\text{T}_f - \text{T}_i}}$$

60. Suponga que está trabajando en una oficina de patentes y un inventor se le presenta con la afirmación de que su motor térmico, que emplea agua como sustancia de trabajo, tiene una eficiencia termodinámica de 0,61. Ella explica que opera entre reservorios de energía a 4°C y 0°C. Es un dispositivo muy complicado, con muchos pistones, engranajes y poleas, y el ciclo involucra congelamiento y derretimiento. ¿Su afirmación de que  $\eta = 0.61$  justifica una consideración seria?

Explica tu respuesta.

61. Suponga que 1,00 kg de agua a 10,0 °C se mezcla con 1,00 kg de agua a 30,0 °C a presión constante. Cuando la mezcla ha alcanzado el equilibrio, (a) ¿cuál es la temperatura final? (b) Tome  $c_P = 4.19 \text{ kJ/kg K}$  para el agua y demuestre que la entropía del sistema aumenta en

$$\Delta S = 4.19 \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right) = 4.19 \ln \left( \frac{293}{283} \right) = 0.081 \text{ kJ/K}$$

Puede usar el resultado del problema 31. (c) Verifique numéricamente que  $S_f > S_i$ . (d) ¿Es la mezcla un proceso irreversible? Explica cómo lo sabes.

62. Una muestra de 1,00 mol de un gas ideal ( $\gamma = 1.40$ ) se lleva a través del ciclo de Carnot descrito en la figura activa 22.10. En el punto A, la presión es de 25,0 atm y la temperatura de 600 K. En el punto C, la presión es de 1,00 atm y la temperatura de 400 K. a) Determine las presiones y los volúmenes en los puntos A, B, C y D. (b) Calcule el trabajo neto realizado por ciclo. (c) Determine la eficiencia de un motor que opera en este ciclo.

de cuatro deuces. Por lo tanto, en una mano de póquer, dos de una clase es menos valioso que cuatro de una clase.

- 22.5 (a). De la primera ley de la termodinámica, para estos dos procesos reversibles,  $Q = W$ . Durante el proceso de volumen constante,  $W = 0$ , mientras que el trabajo  $W$  es distinto de cero y negativo durante la expansión a presión constante. Por lo tanto,  $Q$  es mayor para el proceso de presión constante, lo que conduce a un valor mayor para el cambio de entropía. En términos de entropía como desorden, durante el proceso de presión constante el gas debe expandirse. El aumento de volumen da como resultado más formas de ubicar las moléculas del gas en un recipiente, lo que resulta en un mayor aumento de entropía.

- 22.6 Falso. El factor determinante para el cambio de entropía es  $Q/r$ , no  $Q$ . Si el proceso adiabático no es reversible, el cambio de entropía no es necesariamente cero porque un camino reversible entre los mismos estados inicial y final puede implicar transferencia de energía por calor.