

calcularemos la cantidad de trabajo realizado empleando la primera ley de la termodinámica: el trabajo efectuado en un ciclo completo es la suma del calor absorbido y del calor (negativo) expulsado [véase la ecuación (20.2)]. Obtenemos la eficiencia a partir de las dos temperaturas, empleando la ecuación (20.14).

EJECUTAR: Por la ecuación (20.13), el calor Q_C expulsado por la máquina es

$$\begin{aligned} Q_C &= -Q_H \frac{T_C}{T_H} = -(2000 \text{ J}) \frac{350 \text{ K}}{500 \text{ K}} \\ &= -1400 \text{ J} \end{aligned}$$

Por la primera ley, el trabajo W efectuado por la máquina es

$$\begin{aligned} W &= Q_H + Q_C = 2000 \text{ J} + (-1400 \text{ J}) \\ &= 600 \text{ J} \end{aligned}$$

Por la ecuación (20.14), la eficiencia térmica es

$$e = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{350 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 0.30 = 30\%$$

EVALUAR: El signo negativo de Q_C es correcto: indica que sale calor de la máquina hacia la fuente fría. Podemos comprobar nuestro resultado para e utilizando la definición básica de eficiencia térmica:

$$e = \frac{W}{Q_H} = \frac{600 \text{ J}}{2000 \text{ J}} = 0.30 = 30\%$$

Ejemplo 20.3 Análisis de una máquina de Carnot II

Suponga que 0.200 moles de un gas diatómico con comportamiento ideal ($\gamma = 1.40$) efectúa un ciclo de Carnot con temperaturas de 227 °C y 27 °C. La presión inicial es $p_a = 10.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ y, durante la expansión isotérmica a la temperatura superior, se duplica el volumen. a) Calcule la presión y el volumen en los puntos a , b , c y d del diagrama pV de la figura 20.13. b) Calcule Q , W y ΔU para cada paso y para todo el ciclo. c) Determine la eficiencia directamente a partir de los resultados del inciso b) y compárela con el resultado de la ecuación (20.14).

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En este problema intervienen las propiedades del ciclo de Carnot y las del gas ideal.

PLANTEAR: Nos dan el número de moles y la presión y temperatura en el punto a (que es la más alta de las temperaturas de las dos fuentes), así que podremos calcular el volumen en a utilizando la ecuación del gas ideal. Después, obtendremos la presión y el volumen en los demás puntos utilizando las ecuaciones dadas en esta sección, en combinación con la ecuación del gas ideal. Después, para cada paso del ciclo, usaremos las ecuaciones (20.10) y (20.11) para obtener el flujo de calor y el trabajo efectuado, y la ecuación (19.13), para calcular el cambio de energía interna. Al igual que en el ejemplo anterior, calcularemos la eficiencia con la ecuación (20.14).

EJECUTAR: a) Primero convertimos las temperaturas Celsius en absolutas. La temperatura superior es $T_H = (227 + 273.15) \text{ K} = 500 \text{ K}$; y la inferior, $T_C = (27 + 273.15) \text{ K} = 300 \text{ K}$. Luego usamos la ecuación del gas ideal para obtener V_a :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{nRT_H}{p_a} = \frac{(0.200 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(500 \text{ K})}{10.0 \times 10^5 \text{ Pa}} \\ &= 8.31 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

El volumen se duplica durante la expansión isotérmica $a \rightarrow b$, así que

$$\begin{aligned} V_b &= 2V_a = 2(8.31 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \\ &= 16.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Además, durante esa expansión $a \rightarrow b$, $p_a V_a = p_b V_b$, así que

$$p_b = \frac{p_a V_a}{V_b} = 5.00 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Para la expansión adiabática $b \rightarrow c$, $T_H V_b^{\gamma-1} = T_C V_c^{\gamma-1}$, y

$$\begin{aligned} V_c &= V_b \left(\frac{T_H}{T_C} \right)^{1/(\gamma-1)} = (16.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \left(\frac{500 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right)^{2.5} \\ &= 59.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Aplicamos otra vez la ecuación del gas ideal en el punto c :

$$\begin{aligned} p_c &= \frac{nRT_C}{V_c} = \frac{(0.200 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}{59.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3} \\ &= 0.837 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Para la compresión adiabática $d \rightarrow a$, $T_C V_d^{\gamma-1} = T_H V_a^{\gamma-1}$, y

$$\begin{aligned} V_d &= V_a \left(\frac{T_H}{T_C} \right)^{1/(\gamma-1)} = (8.31 \times 10^{-4} \text{ m}^3) \left(\frac{500 \text{ K}}{300 \text{ K}} \right)^{2.5} \\ &= 29.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \\ p_d &= \frac{nRT_C}{V_d} = \frac{(0.200 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}{29.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3} \\ &= 1.67 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

b) Para la expansión isotérmica $a \rightarrow b$, $\Delta U_{ab} = 0$. Para calcular W_{ab} ($= Q_H$) usamos la ecuación (20.10):

$$\begin{aligned} W_{ab} &= Q_H = nRT_H \ln \frac{V_b}{V_a} \\ &= (0.200 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(500 \text{ K})(\ln 2) \\ &= 576 \text{ J} \end{aligned}$$

Para la expansión adiabática $b \rightarrow c$, $Q_{bc} = 0$. Por la primera ley de la termodinámica, $\Delta U_{bc} = Q_{bc} - W_{bc} = -W_{bc}$; así que el trabajo W_{bc} efectuado por el gas en este proceso es el negativo del cambio de energía interna del gas. Por la ecuación (19.13), tenemos $\Delta U = nC_V \Delta T$, donde $\Delta T = T_C - T_H$ (temperatura final menos temperatura inicial). Con $C_V = 20.8 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ para un gas diatómico que obedece la ecuación del gas ideal, obtenemos

$$\begin{aligned} W_{bc} &= -\Delta U_{bc} = -nC_V(T_C - T_H) = nC_V(T_H - T_C) \\ &= (0.200 \text{ mol})(20.8 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(500 \text{ K} - 300 \text{ K}) \\ &= 832 \text{ J} \end{aligned}$$

continúa

Para la compresión isotérmica $c \rightarrow d$, $\Delta U_{cd} = 0$; la ecuación (20.11) da

$$\begin{aligned} W_{cd} &= Q_C = nRT_C \ln \frac{V_d}{V_c} \\ &= (0.200 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K}) \left(\ln \frac{29.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{59.6 \times 10^{-4} \text{ m}^3} \right) \\ &= -346 \text{ J} \end{aligned}$$

Para la compresión adiabática $d \rightarrow a$, $Q_{da} = 0$, y

$$\begin{aligned} W_{da} &= -\Delta U_{da} = -nC_V(T_H - T_C) = nC_V(T_C - T_H) \\ &= (0.200 \text{ mol})(20.8 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K} - 500 \text{ K}) \\ &= -832 \text{ J} \end{aligned}$$

Podemos tabular los resultados como sigue:

Proceso	Q	W	ΔU
$a \rightarrow b$	576 J	576 J	0
$b \rightarrow c$	0	832 J	-832 J
$c \rightarrow d$	-346 J	-346 J	0
$d \rightarrow a$	0	-832 J	832 J
Total	230 J	230 J	0

c) De la tabla, $Q_H = 576 \text{ J}$ y el trabajo total es 230 J. Así,

$$e = \frac{W}{Q_H} = \frac{230 \text{ J}}{576 \text{ J}} = 0.40 = 40\%$$

Podemos comparar esto con el resultado de la ecuación (20.14):

$$e = \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{500 \text{ K} - 300 \text{ K}}{500 \text{ K}} = 0.40 = 40\%$$

EVALUAR: En la tabla de resultados del inciso b), observe que, para todo el ciclo, $Q = W$ y $\Delta U = 0$. Estos resultados son los esperados: en un ciclo completo, el aporte neto de calor se utiliza para realizar trabajo con cero cambio neto en la energía interna del sistema. Observe también que la cantidad de trabajo en los dos procesos adiabáticos es igual con signo opuesto. A partir del análisis que condujo a la ecuación (20.13), ¿puede demostrar qué esto *siempre* sucede en un ciclo de Carnot?

Vemos que la eficiencia en este ejemplo es mayor que la obtenida en el ejemplo 20.2. Ello se debe a que la razón de temperaturas alta a baja es mayor: $(500 \text{ K})/(300 \text{ K})$ en vez de $(500 \text{ K})/(350 \text{ K})$.

El refrigerador de Carnot

Dado que cada paso del ciclo de Carnot es reversible, *todo el ciclo* podría revertirse, convirtiendo la máquina en refrigerador. El coeficiente de rendimiento del refrigerador de Carnot se obtiene combinando la definición general de K , ecuación (20.9), con la ecuación (20.13) para el ciclo de Carnot. Primero reescribimos la ecuación (20.9) así:

$$K = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} = \frac{|Q_C|/|Q_H|}{1 - |Q_C|/|Q_H|}$$

Luego sustituimos la ecuación (20.13), $|Q_C|/|Q_H| = T_C/T_H$, en esta expresión. El resultado es

$$K_{\text{Carnot}} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (\text{coeficiente de rendimiento de un refrigerador de Carnot}) \quad (20.15)$$

Si la diferencia de temperatura $T_H - T_C$ es pequeña, K es mucho mayor que 1; en este caso, puede “bombarse” mucho calor de la temperatura inferior a la superior con muy poco gasto de trabajo. Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura, menor será K y se requerirá más trabajo para transferir una cantidad dada de calor.

Ejemplo 20.4 Análisis de un refrigerador de Carnot

Si el ciclo descrito en el ejemplo 20.3 se efectúa hacia atrás como refrigerador, ¿qué coeficiente de rendimiento tiene?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este problema utiliza las ideas de la sección 20.3 (para refrigeradores en general), así como el análisis previo de los refrigeradores de Carnot.

PLANTEAR: La ecuación (20.9) da el coeficiente de rendimiento de *cualquier* refrigerador, en términos del calor extraído de la fuente fría en cada ciclo y el trabajo que debe efectuarse en cada ciclo.

EJECUTAR: En el ejemplo 20.3, vimos que, en un ciclo, la máquina de Carnot expulsa un calor $Q_C = -346 \text{ J}$ a la fuente fría y efectúa un trabajo $W = 230 \text{ J}$. Por lo tanto, cuando la operamos en reversa como re-

frigerador, el sistema extrae un calor $Q_C = +346 \text{ J}$ de la fuente fría, y requiere un aporte de trabajo $W = -230 \text{ J}$. Por la ecuación (20.9),

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{346 \text{ J}}{230 \text{ J}} = 1.50$$

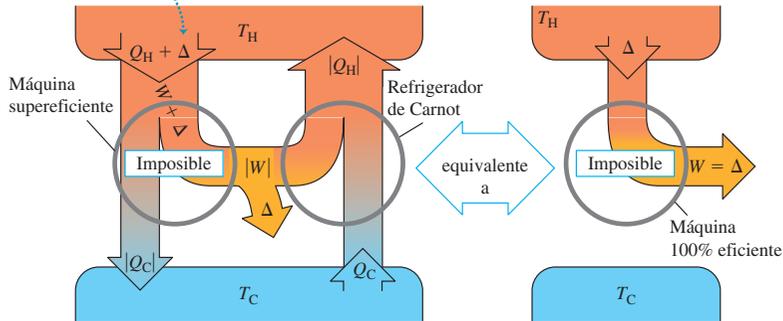
Puesto que se trata de un ciclo de Carnot, también podemos usar la ecuación (20.15):

$$K = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{300 \text{ K}}{500 \text{ K} - 300 \text{ K}} = 1.50$$

EVALUAR: En un ciclo de Carnot, e y K sólo dependen de las temperaturas, como indican las ecuaciones (20.14) y (20.15), y no necesitamos calcular Q y W . Sin embargo, si el ciclo contiene procesos irreversibles, estas ecuaciones no son válidas y se requieren cálculos más detallados.

20.15 Demostración de que la máquina de Carnot tiene la máxima eficiencia posible. Una máquina “supereficiente” (más eficiente que una máquina de Carnot), combinada con un refrigerador de Carnot, podría convertir el calor totalmente en trabajo sin transferencia neta de calor a la fuente fría. Ello violaría la segunda ley de la termodinámica.

Si fuera posible una máquina supereficiente, podría utilizarse junto con un refrigerador de Carnot para convertir el calor Δ totalmente en trabajo, sin transferencia neta de calor a la fuente fría.



Ciclo de Carnot y la segunda ley

Podemos demostrar que **ninguna máquina puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que opera entre las mismas dos temperaturas**. La clave para demostrarlo es que, puesto que cada paso del ciclo de Carnot es reversible, *todo el ciclo* puede revertirse. Operada en reversa, la máquina se convierte en un refrigerador. Suponga que tenemos una máquina más eficiente que una de Carnot (figura 20.15). La máquina de Carnot, operada en reversa como refrigerador mediante un aporte de trabajo negativo $-|W|$, toma un calor Q_C de la fuente fría y expulsa un calor $|Q_H|$ a la fuente caliente. La máquina supereficiente expulsa calor $|Q_C|$ pero, para hacerlo, toma una cantidad mayor de calor $Q_H + \Delta$. Así, su salida de trabajo es $W + \Delta$, y el efecto neto de las dos máquinas juntas es tomar una cantidad de calor Δ y convertirla totalmente en trabajo. Esto viola el planteamiento de máquina de la segunda ley. Podríamos elaborar un argumento similar usando una máquina supereficiente para violar el planteamiento de refrigerador de la segunda ley. Observe que no tuvimos que suponer que la máquina supereficiente es reversible. Del mismo modo, podemos demostrar que *ningún refrigerador puede tener un coeficiente de rendimiento mayor que el de un refrigerador de Carnot que opera entre las mismas dos temperaturas*.

Así, la afirmación de que ninguna máquina puede ser más eficiente que una máquina de Carnot es otro planteamiento equivalente de la segunda ley de la termodinámica, y de él se sigue directamente que **todas las máquinas de Carnot que operan entre las mismas dos temperaturas tienen la misma eficiencia, sea cual fuere la naturaleza de la sustancia de trabajo**. Aunque deducimos la ecuación (20.14) para una máquina de Carnot usando un gas ideal como sustancia de trabajo, la ecuación es válida para *cualquier* máquina de Carnot, sea cual fuere la sustancia de trabajo.

La ecuación (20.14), que expresa la eficiencia de una máquina de Carnot, establece un límite superior para la eficiencia de una máquina real, como una turbina de vapor. Con la finalidad de aumentar al máximo este límite y la eficiencia real de la máquina, el diseñador debe hacer la temperatura de admisión T_H lo más alta posible, y la de escape T_C , lo más baja posible (figura 20.16).

La temperatura de escape no puede ser menor que la temperatura más baja con que se cuenta para enfriar el escape. En el caso de una turbina de vapor en una planta eléctrica, T_C podría ser la temperatura de un río o lago; entonces, queremos que la temperatura de la caldera T_H sea lo más alta posible. La presión de vapor de todos los líquidos aumenta rápidamente con la temperatura, así que estamos limitados por la resistencia mecánica de la caldera. A 500 °C, la presión de vapor del agua es de aproximadamente 240×10^5 Pa (235 atm); ésta es generalmente la máxima presión práctica en las grandes calderas de vapor actuales.

20.16 Para obtener la eficiencia máxima, se busca que las temperaturas dentro de un motor a reacción sean lo más altas posible. Se usan materiales cerámicos exóticos que resisten temperaturas de más de 1000 °C sin derretirse ni reblandecerse.



*La escala de temperatura Kelvin

En el capítulo 17 indicamos la necesidad de una escala de temperatura que no dependiera de las propiedades de un material específico. Ahora podemos usar el ciclo de Carnot para definir tal escala. La eficiencia térmica de una máquina de Carnot que opera entre dos fuentes de calor a temperaturas T_H y T_C es independiente de la naturaleza de la sustancia de trabajo y depende únicamente de las temperaturas. Por la ecuación (20.4), la eficiencia térmica es

$$e = \frac{Q_H + Q_C}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H}$$

Por lo tanto, la razón Q_C/Q_H es la misma para *todas* las máquinas de Carnot que operan entre dos temperaturas dadas T_H y T_C .

Kelvin propuso que, *por definición*, la razón T_C/T_H fuera igual a la magnitud del cociente Q_C/Q_H de las cantidades de calor absorbida y expulsada:

$$\frac{T_C}{T_H} = \frac{|Q_C|}{|Q_H|} = -\frac{Q_C}{Q_H} \quad (\text{definición de temperatura de Kelvin}) \quad (20.16)$$

La ecuación (20.16) parece idéntica a la (20.13), pero hay una sutil y crucial diferencia. Las temperaturas de la ecuación (20.13) se basan en un termómetro de gas ideal, definido en la sección 17.3; mientras que la ecuación (20.16) *define* una escala de temperatura con base en el ciclo de Carnot y la segunda ley de la termodinámica, y es independiente del comportamiento de cualquier sustancia específica. Por lo tanto, la **escala de temperatura Kelvin** es en verdad *absoluta*. Para completar la definición de la escala Kelvin, asignamos, como en la sección 17.3, el valor arbitrario de 273.16 K a la temperatura del punto triple del agua. Cuando llevamos una sustancia por un ciclo de Carnot, la razón de los calores absorbido y expulsado, $|Q_H|/|Q_C|$, es igual a la razón de las temperaturas de las fuentes *expresadas en la escala de termómetro de gas* definida en la sección 17.3. Puesto que el punto triple del agua se elige como 273.16 K en ambas escalas, se sigue que *las escalas Kelvin y de gas ideal son idénticas*.

El punto cero de la escala Kelvin se denomina **cero absoluto**, y se puede interpretar en un nivel molecular: en el cero absoluto, el sistema tiene su *mínima* energía interna total (cinética más potencial) posible. Sin embargo, a causa de efectos cuánticos, *no* es cierto que en $T = 0$ cese todo el movimiento molecular. Hay razones teóricas para creer que no es posible lograr el cero absoluto experimentalmente, aunque se hayan alcanzado temperaturas por debajo de 10^{-7} K. Cuanto más nos acercamos al cero absoluto, más difícil será acercarse más. Un planteamiento de la *tercera ley de la termodinámica* es que es imposible alcanzar el cero absoluto en un número finito de pasos termodinámicos.

Evalúe su comprensión de la sección 20.6 Imagine que un inventor en busca de apoyo financiero acude a usted con una idea para un motor de gasolina que opera según un novedoso tipo de ciclo termodinámico. El diseño requiere usar exclusivamente cobre en la construcción, y enfriamiento con aire. El inventor asegura que la eficiencia del motor será del 85%. ¿Le conviene invertir en este maravilloso motor?

(Sugerencia: véase la tabla 17.4.)

20.7 Entropía

La segunda ley de la termodinámica, tal como la planteamos, tiene una forma un tanto distinta de la de muchas leyes físicas que el lector ya conoce. No es una ecuación ni una relación cuantitativa, sino un planteamiento de *imposibilidad*. No obstante, *sí podemos* expresar esta ley como una relación cuantitativa empleando el concepto de *entropía*, que es el tema de esta sección.

Hemos mencionado varios procesos que se efectúan naturalmente en la dirección de desorden creciente. El flujo de calor irreversible aumenta el desorden porque las moléculas inicialmente están acomodadas en regiones más calientes y más frías; este ordenamiento se pierde cuando el sistema alcanza equilibrio térmico. La adición de calor a un cuerpo aumenta su desorden porque aumenta las velocidades moleculares medias y, con ello, la aleatoriedad del movimiento molecular. La expansión libre de un gas aumenta su desorden porque las moléculas tienen mayor aleatoriedad de posición después de la expansión. La figura 20.17 muestra otro proceso donde aumenta en desorden.

Entropía y desorden

La **entropía** es una medida *cuantitativa* del desorden. Para introducir este concepto, consideremos una expansión isotérmica infinitesimal del gas ideal. Agregamos calor dQ y dejamos que el gas se expanda apenas lo suficiente para mantener constante la temperatura. Dado que la energía interna del gas ideal sólo depende de su temperatura, la energía interna también es constante; por la primera ley, el trabajo dW efectuado por el gas es igual al calor dQ agregado. Es decir,

$$dQ = dW = p dV = \frac{nRT}{V} dV \quad \text{así que} \quad \frac{dV}{V} = \frac{dQ}{nRT}$$

El gas está en un estado más desordenado después de la expansión, porque las moléculas se mueven en un volumen mayor y tienen más aleatoriedad de posición. Por lo tanto, el cambio fraccionario de volumen dV/V es una medida del aumento del desorden, y la ecuación anterior indica que es proporcional a la cantidad dQ/T . Introducimos el símbolo S para la entropía del sistema, y definimos el cambio infinitesimal de entropía dS durante un proceso reversible infinitesimal a temperatura absoluta T como

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (\text{proceso infinitesimal reversible}) \quad (20.17)$$

Si se agrega un calor total Q durante un proceso isotérmico reversible a temperatura absoluta T , el cambio de entropía total $\Delta S = S_2 - S_1$ está dado por

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (\text{proceso isotérmico reversible}) \quad (20.18)$$

La entropía tiene unidades de energía entre temperatura; la unidad de entropía en el SI es 1 J/K .

Ahora vemos cómo se relaciona el cociente Q/T con el aumento del desorden. Una temperatura más alta implica mayor aleatoriedad de movimiento. Si la sustancia inicialmente está fría, con poco movimiento molecular, la adición de Q causa un aumento fraccionario considerable en el movimiento y la aleatoriedad molecular. Pero si la sustancia ya está caliente, la misma cantidad de calor aumenta relativamente poco el mayor movimiento molecular que ya existe. Así, el cociente Q/T es una caracterización adecuada del aumento de aleatoriedad o desorden, cuando hay flujo de calor hacia un sistema.

Ejemplo 20.5 Cambio de entropía durante la fusión

Un kilogramo de hielo a 0°C se derrite y convierte en agua a 0°C . Calcule el cambio de entropía, suponiendo que la fusión es reversible. El calor de fusión del agua es $L_f = 3.34 \times 10^5 \text{ J/kg}$.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: La fusión se efectúa a una temperatura constante de 0°C , así que se trata de un proceso isotérmico reversible.

PLANTEAR: Nos dan la cantidad de calor agregada (en términos del calor de fusión) y la temperatura $T = 273 \text{ K}$. (Recuerde que, en cálculos de entropía, siempre debemos usar temperaturas absolutas (Kelvin).) Calcularemos el cambio de entropía con la ecuación (20.18).



20.17 Cuando explotan los fuegos pirotécnicos, aumenta el desorden. Las sustancias químicas esmeradamente envueltas dentro de cada petardo se dispersa en todas direcciones, y la energía química almacenada se convierte en energía cinética aleatoria de los fragmentos.

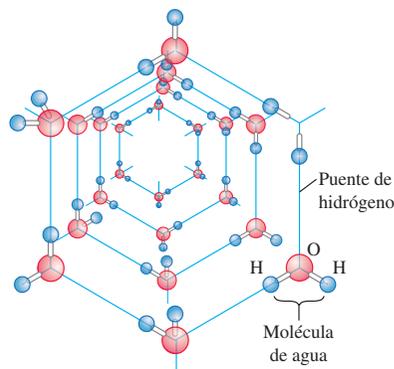
EJECUTAR: El calor necesario para fundir el hielo es $Q = mL_f = 3.34 \times 10^5 \text{ J}$. Por la ecuación (20.18), el aumento de entropía del sistema es

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} = \frac{3.34 \times 10^5 \text{ J}}{273 \text{ K}} = 1.22 \times 10^3 \text{ J/K}$$

EVALUAR: Este incremento corresponde al aumento del desorden cuando las moléculas de agua pasan del estado altamente ordenado de un sólido cristalino, al estado mucho más desordenado de un líquido (figura 20.18).

En todo proceso *isotérmico* reversible, el cambio de entropía es igual al calor transferido dividido entre la temperatura absoluta. Si volvemos a congelar el agua, Q tendrá el signo opuesto, y el cambio de entropía del agua será $\Delta S = -1.22 \times 10^3 \text{ J/K}$. Las moléculas de agua se reacomodan en un cristal para formar hielo, disminuyendo el desorden y la entropía.

20.18 Las moléculas de agua están acomodadas en un patrón regular y ordenado en un cristal de hielo. Al derretirse el hielo, los puentes de hidrógeno entre las moléculas se rompen, aumentando el desorden y la entropía del agua.



Entropía en los procesos reversibles

Podemos generalizar la definición de cambio de entropía para incluir *cualquier* proceso reversible que lleva de un estado a otro, sea isotérmico o no. Representamos el proceso como una serie de pasos reversibles infinitesimales. Durante un paso típico, se agrega una cantidad infinitesimal de calor dQ al sistema a temperatura absoluta T . Luego sumamos (integramos) los cocientes dQ/T para todo el proceso:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (\text{cambio de entropía en un proceso reversible}) \quad (20.19)$$

Los límites 1 y 2 se refieren a los estados inicial y final.

Dado que la entropía es una medida del desorden de un sistema en un estado específico, debe depender sólo del estado actual del sistema, no de su historia. Después demostraremos esto. Cuando un sistema pasa de un estado inicial con entropía S_1 a uno final con entropía S_2 , el cambio de entropía $\Delta S = S_2 - S_1$ definido por la ecuación (20.19) no depende de la trayectoria que lleva del estado inicial al final; es el mismo para *todos* los procesos posibles que conduzcan del estado 1 al 2. Por lo tanto, la entropía de un sistema también debe tener un valor definido para cualquier estado dado del sistema. Recordamos que la *energía interna*, introducida en el capítulo 19, también tiene esta propiedad, aunque la entropía y la energía interna son cantidades muy distintas.

Puesto que la entropía sólo es función del estado de un sistema, también podemos calcular cambios de entropía en procesos *irreversibles* (sin equilibrio), para los que no son válidas las ecuaciones (20.17) y (20.19). Basta con inventar una trayectoria que conecte los estados inicial y final dados, y que *sí* consista totalmente en procesos reversibles que llevan al equilibrio, y calcular el cambio de entropía total para esa trayectoria. No será el verdadero camino, pero el cambio de entropía debe ser el mismo.

Al igual que con la energía interna, lo anterior no nos indica cómo calcular la entropía en sí, sólo el cambio de entropía en un proceso dado. Como hicimos con la energía interna, podemos asignar arbitrariamente un valor a la entropía de un sistema en un estado de referencia específico y luego calcular la entropía de cualquier otro estado con referencia a él.

Ejemplo 20.6 Cambio de entropía en un cambio de temperatura

Un kilogramo de agua a 0°C se calienta a 100°C . Calcule su cambio de entropía.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: En la práctica, el proceso descrito se efectuaría de manera irreversible, quizá colocando un cazo con agua sobre una parrilla eléctrica cuya superficie de cocción se mantiene a 100°C . Sin embargo, el cambio de entropía del agua sólo depende de los estados inicial y final del sistema, y es el mismo si el proceso es reversible o si es irreversible.

PLANTEAR: Podemos imaginar que la temperatura del agua se eleva reversiblemente en una serie de pasos infinitesimales, en cada uno de los cuales la temperatura aumenta una cantidad infinitesimal dT . Entonces usamos la ecuación (20.19) para integrar sobre todos esos pasos y calculamos el cambio de entropía del proceso total.

EJECUTAR: Por la ecuación (17.14), el calor requerido para efectuar cada paso infinitesimal es $dQ = mc dT$. Sustituyendo esto en la ecuación (20.19) e integrando, obtenemos

$$\begin{aligned}\Delta S &= S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_{T_1}^{T_2} mc \frac{dT}{T} = mc \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= (1.00 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \left(\ln \frac{373 \text{ K}}{273 \text{ K}} \right) \\ &= 1.31 \times 10^3 \text{ J/K}\end{aligned}$$

EVALUAR: El cambio de entropía es positivo, como debe ser en un proceso en el que el sistema absorbe calor.

En este cálculo, consideramos que el calor específico c no depende de la temperatura. Tal aproximación es razonable, pues c del agua sólo aumenta en un 1% entre 0°C y 100°C .

CUIDADO No utilice $\Delta S = Q/T$ Al resolver este problema, el lector podría sentirse tentado a evitar la integración empleando la expresión más sencilla de la ecuación (20.18), $\Delta S = Q/T$. Sin embargo, sería un error, porque esa ecuación sólo es válida para procesos *isotérmicos*, y en nuestro ejemplo las temperaturas inicial y final *no* son las mismas. La *única* forma correcta de calcular el cambio de entropía en un proceso en el que las temperaturas inicial y final son distintas es usar la ecuación (20.19). ■

Ejemplo conceptual 20.7 Proceso adiabático reversible

Un gas se expande de forma adiabática y reversible. Calcule el cambio de entropía.

SOLUCIÓN

En un proceso adiabático, no entra ni sale calor del sistema. Por lo tanto, $dQ = 0$ y la entropía *no* cambia en este proceso reversible,

$\Delta S = 0$. Todo proceso adiabático *reversible* es de entropía constante. (Por ello, llamamos *isoentrópicos* a los procesos adiabáticos reversibles.) El aumento en el desorden debido a que el gas ocupa un volumen mayor es exactamente igual a la disminución en el desorden asociada a la disminución de temperatura y la reducción de las velocidades moleculares.

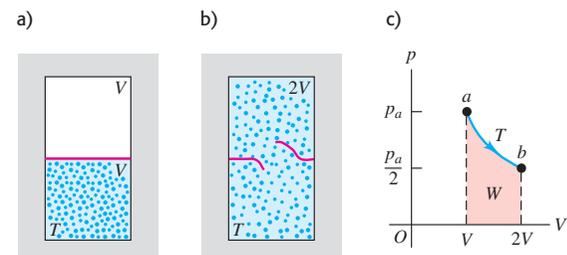
Ejemplo 20.8 Cambio de entropía en una expansión libre

Una caja térmicamente aislada está dividida en dos compartimentos, cada uno con volumen V , por una membrana (figura 20.19). Inicialmente, un compartimiento contiene n moles de gas ideal a temperatura T , y el otro está vacío. Se rompe la membrana y el gas se expande hasta llenar los dos compartimentos. Calcule el cambio de entropía en este proceso de expansión libre.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Para este proceso, $Q = 0$, $W = 0$, $\Delta U = 0$ y (puesto que el sistema es un gas ideal) $\Delta T = 0$. Podríamos pensar que el cambio de entropía es cero porque no hay intercambio de calor, pero sólo podemos usar la ecuación (20.19) para calcular los cambios de entropía en procesos *reversibles*; esta expansión libre *no* es reversible, y *sí* hay un cambio de entropía. El proceso es adiabático porque $Q = 0$, pero no isoentrópico, pues $\Delta S \neq 0$. Como mencionamos al

20.19 a), b) Expansión libre de gas ideal aislado. c) El proceso de expansión libre no pasa por estados de equilibrio de a a b , pero el cambio de entropía $S_b - S_a$ puede calcularse usando el camino isotérmico mostrado o *cualquier* camino reversible de a a b .



continúa

principio de esta sección, la entropía aumenta en una expansión libre porque las posiciones de las moléculas son más aleatorias que antes de la expansión.

PLANTEAR: Para calcular ΔS , recordamos que el cambio de entropía sólo depende de los estados inicial y final. Podemos inventar un proceso *reversible* que tenga los mismos extremos, usar la ecuación (20.19) para calcular ΔS y así determinar el cambio de entropía para el proceso original. En este caso, un proceso reversible apropiado sería una expansión isotérmica de V a $2V$ a temperatura T . El gas efectúa un trabajo W durante esta expansión, así que debe suministrarse una cantidad de calor Q igual para mantener constante la energía interna. Calcularemos el cambio de entropía para este proceso isotérmico reversible empleando la ecuación (20.18); el cambio de entropía para la expansión libre será igual.

EJECUTAR: Vimos en el ejemplo 19.1 (sección 19.2) que el trabajo efectuado por n moles de gas ideal en una expansión isotérmica de V_1 a V_2 es $W = nRT \ln(V_2/V_1)$. Usando $V_1 = V$ y $V_2 = 2V$, tenemos

$$Q = W = nRT \ln \frac{2V}{V} = nRT \ln 2$$

Por lo tanto, el cambio de entropía es

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = nR \ln 2$$

y éste es también el cambio para la expansión libre con los mismos estados inicial y final. Para un mol,

$$\Delta S = (1 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(\ln 2) = 5.76 \text{ J/K}$$

EVALUAR: El cambio de entropía es positivo, como lo anticipamos. El factor $(\ln 2)$ de nuestra respuesta es resultado de que el volumen haya aumentado en un factor de 2. ¿Puede demostrarse que, si el volumen hubiera aumentado de V a xV durante la expansión libre, donde x es un número arbitrario, el cambio de entropía habría sido $\Delta S = nR \ln x$?

Ejemplo 20.9 Entropía y el ciclo de Carnot

Para la máquina de Carnot del ejemplo 20.2 (sección 20.6), calcule el cambio de entropía total en la máquina durante un ciclo.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: El ciclo de Carnot se compone de cuatro pasos reversibles (véase figura 20.13), de manera que podemos utilizar la expresión para el cambio de entropía en un proceso reversible.

PLANTEAR: Calcularemos el cambio de entropía ΔS para cada paso y luego sumaremos esos cambios para obtener el cambio total de entropía ΔS para el ciclo entero.

EJECUTAR: No hay cambio de entropía durante la expansión adiabática ni la compresión adiabática. Durante la expansión isotérmica a $T_H = 500 \text{ K}$, la máquina admite 2000 J de calor, y su cambio de entropía es, por la ecuación (20.18),

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{2000 \text{ J}}{500 \text{ K}} = 4.0 \text{ J/K}$$

Durante la compresión isotérmica a $T_C = 350 \text{ K}$, la máquina cede (expulsa) 1400 J de calor y su cambio de entropía es

$$\Delta S_C = \frac{Q_C}{T_C} = \frac{-1400 \text{ J}}{350 \text{ K}} = -4.0 \text{ J/K}$$

El cambio total de entropía en la máquina durante un ciclo es $\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_H + \Delta S_C = 4.0 \text{ J/K} + (-4.0 \text{ J/K}) = 0$.

EVALUAR: El resultado $\Delta S_{\text{total}} = 0$ nos dice que, cuando la máquina de Carnot completa un ciclo, tiene la misma entropía que tenía al principio del ciclo. Exploraremos este resultado en el siguiente apartado.

¿Qué magnitud tiene el cambio total de entropía del *entorno* de la máquina durante este ciclo? La fuente caliente (500 K) cede 2000 J de calor durante la expansión isotérmica reversible, así que su cambio de entropía es $(-2000 \text{ J})/(500 \text{ K}) = -4.0 \text{ J/K}$; la fuente fría (350 K) absorbe 1400 J de calor durante la compresión isotérmica reversible, así que su cambio de entropía es $(+1400 \text{ J})/(350 \text{ K}) = +4.0 \text{ J/K}$. Por lo tanto, cada fuente individual sufre un cambio de entropía; sin embargo, la suma de esos cambios —es decir, el cambio total de entropía del entorno del sistema— es cero.

Los resultados son válidos para el caso especial del ciclo de Carnot, en el que *todos* los procesos son reversibles. En este caso, vemos que el cambio total de entropía del sistema y su entorno es cero. Veremos que, si el ciclo incluye procesos irreversibles (como sucede con el ciclo Otto o el ciclo Diesel de la sección 20.3), el cambio total de entropía del sistema y el entorno *no puede* ser cero; debe ser positivo.

Entropía en procesos cíclicos

El ejemplo 20.9 mostró que el cambio total de entropía para un ciclo de una máquina de Carnot dada, con gas ideal como sustancia de trabajo, es cero. Este resultado es consecuencia directa de la ecuación (20.13), que podemos reescribir como

$$\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad (20.20)$$

El cociente Q_H/T_H es igual a ΔS_H , el cambio de entropía de la máquina que se da en $T = T_H$. Asimismo, Q_C/T_C es igual a ΔS_C , el cambio de entropía (negativo) de la

máquina que se da en $T = T_C$. Por lo tanto, la ecuación (20.20) dice que $\Delta S_H + \Delta S_C = 0$; es decir, el cambio neto de entropía en el ciclo es cero.

¿Qué sucede con las máquinas de Carnot que usan una sustancia de trabajo distinta? La segunda ley nos dice que *cualquier* máquina de Carnot que opere entre dos temperaturas dadas T_H y T_C tiene la misma eficiencia $e = 1 - T_C/T_H$ [ecuación (20.14)]. Si combinamos esta expresión con la ecuación (20.4), $e = 1 + Q_C/Q_H$, reproducimos la ecuación (20.20). Por lo tanto, la ecuación (20.20) es válida para cualquier máquina de Carnot que opere entre estas temperaturas, sea su sustancia de trabajo el gas ideal o no. Concluimos que *el cambio de entropía total en un ciclo de cualquier máquina de Carnot es cero*.

Este resultado puede generalizarse para demostrar que el cambio total de entropía durante *cualquier* proceso reversible cíclico es cero. En un diagrama pV , un proceso cíclico reversible aparece como un camino cerrado (figura 20.20a). Podemos aproximar un camino así tanto como queramos con una sucesión de procesos isotérmicos y adiabáticos que formen parte de muchos ciclos de Carnot largos y delgados (figura 20.20b). El cambio de entropía total para el ciclo entero es la suma de los cambios para cada ciclo de Carnot pequeño, todos los cuales son cero. Por lo tanto, **el cambio de entropía total en cualquier ciclo reversible es cero**:

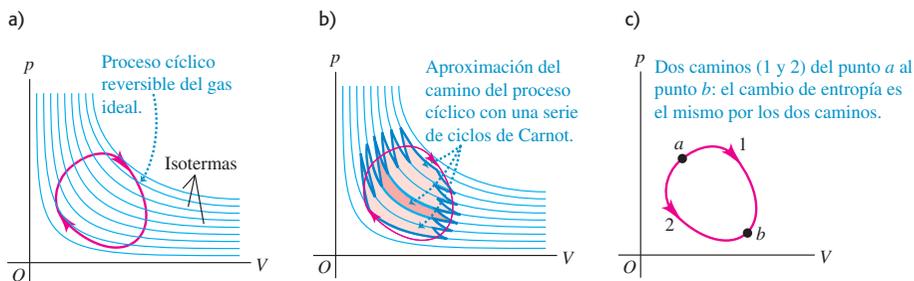
$$\int \frac{dQ}{T} = 0 \quad (\text{proceso cíclico reversible}) \quad (20.21)$$

Se deduce que, cuando un sistema experimenta un proceso reversible que lo lleva de un estado a hacia cualquier otro estado b , *el cambio de entropía del sistema es independiente del camino* (figura 20.20c). Si el cambio de entropía para el camino 1 fuera diferente del cambio para el camino 2, el sistema podría llevarse por el camino 1 y regresar por el 2 al punto de partida, con un cambio neto de entropía distinto de cero. Esto violaría la conclusión de que el cambio total de entropía en semejante proceso cíclico debe ser cero. Puesto que el cambio de entropía en tales procesos es independiente del camino, concluimos que, en cualquier estado dado, el sistema tiene un valor definido de entropía que sólo depende del estado, no de los procesos que lo llevaron a él.

Entropía en procesos irreversibles

En un proceso reversible idealizado que implica sólo estados de equilibrio, el cambio total de entropía del sistema y su entorno es cero. En cambio, todos los procesos *irreversibles* implican un aumento de entropía. A diferencia de la energía, *la entropía no se conserva*. La entropía de un sistema aislado *puede* cambiar, pero, como veremos, nunca puede disminuir. La expansión libre de un gas, descrita en el ejemplo 20.8, es un proceso irreversible en un sistema aislado en el que hay un aumento de entropía.

20.20 a) Proceso cíclico reversible para el gas ideal, indicado con un camino cerrado rojo en un diagrama pV . Se muestran varias isotermas de gas ideal en azul. b) Podemos aproximar el camino de a) con una serie de ciclos de Carnot largos y delgados; se destaca un ciclo en tono más oscuro. El cambio de entropía total es cero para cada ciclo de Carnot y para el proceso cíclico real. c) El cambio de entropía entre los puntos a y b es independiente del camino.



Ejemplo 20.10 Proceso irreversible

Suponga que 1.00 kg de agua a 100 °C se coloca en contacto térmico con 1.00 kg de agua a 0 °C. Calcule el cambio total de entropía. Considere que el calor específico del agua 4190 J/kg · K es constante en este intervalo de temperaturas.

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Este proceso implica flujo irreversible de calor por la diferencia de temperatura.

PLANTEAR: Como hay masas iguales a 0 °C y 100 °C, la temperatura final es el promedio de estas dos temperaturas, o 50 °C. Aunque los procesos son irreversibles, calcularemos los cambios de entropía para el agua (inicialmente) caliente y el agua (inicialmente) fría tal como hicimos en el ejemplo 20.6, suponiendo que el proceso es reversible. Calcularemos ΔS para cada sustancia con la ecuación (20.19), porque las temperaturas cambian en el proceso.

EJECUTAR: La temperatura final es 50 °C = 323 K. El cambio de entropía del agua caliente es

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{caliente}} &= mc \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = (1.00 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K}) \int_{373 \text{ K}}^{323 \text{ K}} \frac{dT}{T} \\ &= (4190 \text{ J/K}) \left(\ln \frac{323 \text{ K}}{373 \text{ K}} \right) = -603 \text{ J/K}\end{aligned}$$

El cambio de entropía del agua fría es

$$\Delta S_{\text{fría}} = (4190 \text{ J/K}) \left(\ln \frac{323 \text{ K}}{273 \text{ K}} \right) = +705 \text{ J/K}$$

El cambio *total* de entropía del sistema es

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{caliente}} + \Delta S_{\text{fría}} = (-603 \text{ J/K}) + 705 \text{ J/K} = +102 \text{ J/K}$$

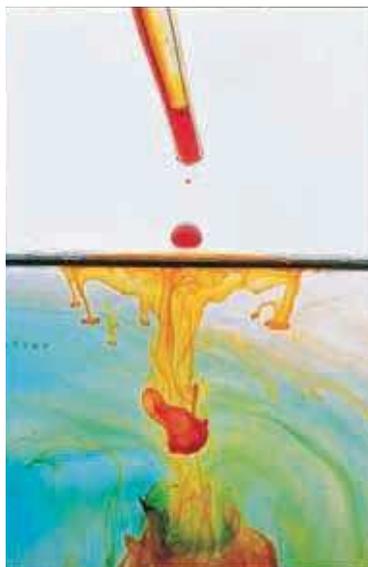
EVALUAR: Un flujo irreversible de calor en un sistema aislado va acompañado de un aumento de entropía. Podríamos haber llegado al mismo estado final mezclando simplemente las dos cantidades de agua. Éste también es un proceso irreversible; puesto que la entropía sólo depende del estado del sistema, el cambio total sería el mismo, 102 J/K.

Vale la pena señalar que la entropía del sistema aumenta *continuamente* conforme las dos cantidades de agua se acercan al equilibrio térmico. Por ejemplo, los primeros 4190 J de calor transferido enfrían el agua caliente a 99 °C y calientan el agua fría a 1 °C. El cambio neto de entropía para este paso es aproximadamente

$$\Delta S = \frac{-4190 \text{ J}}{373 \text{ K}} + \frac{4190 \text{ J}}{273 \text{ K}} = +4.1 \text{ J/K}$$

¿Puede demostrar de manera similar que el cambio neto de entropía es positivo para *cualquier* cambio de temperatura de un grado que conduce a la condición de equilibrio?

20.21 El mezclado de tinta y agua parte de un estado de orden relativo (baja entropía) en el que cada fluido está separado y es distinto del otro. El estado final es más desordenado (tiene mayor entropía). Nunca se observa la separación espontánea de la tinta y el agua, un proceso en el que habría una reducción neta de la entropía.

**Entropía y la segunda ley**

Los resultados del ejemplo 20.10 con respecto al flujo de calor de una temperatura mayor a una menor, o el mezclado de sustancias a diferentes temperaturas, son característicos de *todos* los procesos naturales (es decir, irreversibles). Si incluimos los cambios de entropía de todos los sistemas que participan en el proceso, los aumentos siempre son mayores que las reducciones. En el caso especial de un proceso *reversible*, los aumentos y reducciones son iguales, y podemos enunciar el siguiente principio general: **Si se incluyen todos los sistemas que participan en un proceso, la entropía se mantiene constante, o bien, aumenta.** En otras palabras, **no puede haber un proceso en el que la entropía total disminuya, si se incluyen todos los sistemas que participan en el proceso.** Éste es otro planteamiento de la segunda ley de la termodinámica en términos de entropía, así que es equivalente a los planteamientos de “máquina” y “refrigerador” que vimos antes. La figura 20.21 presenta un ejemplo específico de este principio general.

El aumento de entropía en todos los procesos naturales (irreversibles) mide el aumento del desorden o la aleatoriedad del Universo asociado con ese proceso. Consideremos otra vez el ejemplo de mezclar agua caliente y fría (ejemplo 20.10). *Podríamos* haber usado estas aguas como fuentes de alta y baja temperatura de una máquina térmica. Al tomar calor del agua caliente y cederlo a la fría, podríamos haber obtenido algo de trabajo mecánico. Sin embargo, una vez que las dos aguas se mezclan y alcanzan una temperatura uniforme, esa oportunidad de convertir calor en trabajo mecánico se pierde irremediamente. El agua tibia nunca se *separará* en porciones fría y caliente. No hay disminución de *energía* cuando se mezclan las aguas fría y caliente; lo que se pierde no es *energía*, sino *oportunidad*: la oportunidad de convertir parte del calor del agua caliente en trabajo mecánico. Por lo tanto, cuando la entropía aumenta, la energía está menos *disponible*, y el Universo se vuelve más aleatorio o “gastado”.

Evalúe su comprensión de la sección 20.7 Suponga que 2.00 kg de agua a 50 °C cambia espontáneamente de temperatura, de manera que la mitad del agua se enfría a 0 °C mientras que la otra mitad se calienta a 100 °C. (Toda el agua sigue siendo líquida: no se congela ni se vaporiza.) ¿Cuánto cambiaría la entropía del agua? ¿Es posible este proceso? ¿Por qué?

*20.8 Interpretación microscópica de la entropía

En la sección 19.4 vimos que podemos calcular la energía interna de un sistema, al menos en principio, sumando todas las energías cinéticas de sus partículas constituyentes y todas las energías potenciales de interacción entre las partículas. Esto es un *cálculo microscópico* de la energía interna. También podemos realizar un cálculo microscópico de la entropía S de un sistema. A diferencia de la energía, sin embargo, la entropía no es algo que pertenezca a cada partícula o par de partículas individuales del sistema; más bien, es una medida del desorden del sistema en su totalidad. Para entender el cálculo microscópico de la entropía, primero debemos analizar la idea de *estados macroscópicos* y *microscópicos*.

Suponga que lanza N monedas idénticas al piso, y la mitad muestra cara y la mitad cruz. Ésta es una descripción del **estado macroscópico** (a gran escala) del sistema de N monedas. Una descripción del **estado microscópico** del sistema incluye información acerca de cada moneda individual: la moneda 1 es cara, la 2 cruz, la 3 cruz, etcétera. Puede haber muchos estados microscópicos que correspondan a la misma descripción macroscópica. Por ejemplo, con $N = 4$ monedas hay seis posibles estados en los que la mitad son cara y la mitad cruz (figura 20.22). El número de estados microscópicos crece rápidamente al aumentar N ; con $N = 100$ hay $2^{100} = 1.27 \times 10^{30}$ estados microscópicos, de los que 1.01×10^{29} son mitad cara y mitad cruz.

Los resultados menos probables del lanzamiento de monedas son los casos en que aparecen sólo caras o sólo cruces. Sin duda es posible lanzar 100 caras seguidas, pero no apueste a ello; la probabilidad de lograrlo es de sólo 1 en 1.27×10^{30} . El resultado más probable de lanzar N monedas es que la mitad sean cara y la mitad cruz. La razón es que este estado *macroscópico* tiene el mayor número de estados *microscópicos* correspondientes, como se aprecia en la figura 20.22.

Para vincular esto con el concepto de entropía, observe que N monedas que son todas cara constituyen un estado macroscópico totalmente ordenado; la descripción “todas cara” especifica por completo el estado de cada una de las N monedas. Lo mismo se cumple si todas las monedas son cruz. En cambio, la descripción macroscópica “mitad cara, mitad cruz” por sí sola nos dice muy poco acerca del estado (cara o cruz) de cada moneda individual. Decimos que el sistema está *desordenado* porque sabemos muy poco acerca de su estado microscópico. En comparación con el estado “todas cara” o “todas cruz”, el estado “mitad cara, mitad cruz” tiene un número mucho mayor de posibles estados microscópicos, mucho mayor desorden y, por lo tanto, mucha mayor entropía (que es una medida cuantitativa del desorden).

Ahora, en vez de N monedas, consideremos un mol de gas ideal que contiene el número de Avogadro de moléculas. El estado macroscópico de este gas está dado por su presión p , volumen V y temperatura T ; una descripción del estado microscópico implica dar la posición y velocidad de cada molécula del gas. A una presión, volumen y temperatura dados, el gas podría estar en cualquiera de un número astronómicamente grande de estados microscópicos, dependiendo de las posiciones y velocidades de sus 6.02×10^{23} moléculas. Si el gas se expande libremente para alcanzar un mayor volumen, la gama de posibles posiciones aumenta, al igual que el número de estados microscópicos posibles; el sistema se desordena más y la entropía aumenta como se calculó en el ejemplo 20.8 (sección 20.7).

Podemos obtener la siguiente conclusión general: **para cualquier sistema, el estado macroscópico más probable es el que tiene el mayor número de estados microscópicos correspondientes, y es también el estado macroscópico con el mayor desorden y la mayor entropía.**

20.22 Todos los posibles estados microscópicos de cuatro monedas. Puede haber varios estados microscópicos posibles para cada estado macroscópico.

Estado macroscópico	Estados microscópicos correspondientes
Cuatro caras	
Tres caras, una cruz	
Dos caras, dos cruces	
Una cara, tres cruces	
Cuatro cruces	

Cálculo de la entropía: Estados microscópicos

Sea w el número de posibles estados microscópicos para un estado macroscópico dado. (Para las cuatro monedas de la figura 20.22, el estado de cuatro caras tiene $w = 1$, el de tres caras y una cruz tiene $w = 4$, y así sucesivamente.) Entonces, puede demostrarse que la entropía S de un estado macroscópico es

$$S = k \ln w \quad (\text{expresión microscópica de la entropía}) \quad (20.22)$$

donde $k = R/N_A$ es la constante de Boltzmann (constante de los gases por molécula) que se explicó en la sección 18.3. Como muestra la ecuación (20.22), aumentar el número de estados microscópicos posibles w aumenta la entropía S .

Lo que importa en un proceso termodinámico no es la entropía absoluta S , sino la *diferencia* de entropía entre los estados inicial y final. Por lo tanto, una definición igualmente válida y útil sería $S = k \ln w + C$, donde C es una constante, ya que C se cancela en cualquier cálculo de diferencia de entropía entre dos estados. No obstante, es mejor igualar esta constante a cero y usar la ecuación (20.22). Así, y dado que el valor más pequeño posible de w es 1, el valor más pequeño posible de S para cualquier sistema es $k \ln 1 = 0$. La entropía *nunca* puede ser negativa.

En la práctica resulta difícil calcular w , por lo que la ecuación (20.22) sólo suele usarse para calcular la entropía absoluta S de ciertos sistemas especiales. No obstante, podemos usar esta relación para calcular *diferencias* de entropía entre un estado y otro. Considere un sistema que experimenta un proceso termodinámico que lo lleva del estado macroscópico 1, que tiene w_1 posibles estados microscópicos, al estado macroscópico 2, que tiene w_2 estados microscópicos. El cambio de entropía en este proceso es

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln w_2 - k \ln w_1 = k \ln \frac{w_2}{w_1} \quad (20.23)$$

La *diferencia* de entropía entre los dos estados macroscópicos depende del *cociente* de los números de posibles estados microscópicos.

Como ilustra el siguiente ejemplo, usar la ecuación (20.23) para calcular un cambio de entropía de un estado macroscópico a otro da el mismo resultado que considerar un proceso reversible que conecta esos dos estados y usar la ecuación (20.19).

Ejemplo 20.11 Cálculo microscópico de cambio de entropía

A partir de la ecuación (20.23), calcule el cambio de entropía en la expansión libre de n moles del gas a temperatura T que se describió en el ejemplo 20.8 (figura 20.23).

SOLUCIÓN

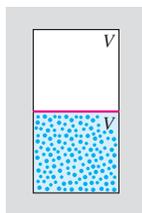
IDENTIFICAR: Se nos pide calcular el cambio de entropía con base en el número de microestados en el estado macroscópico inicial (figura 20.23a) y en el estado macroscópico final (figura 20.23b).

PLANTEAR: Cuando se rompe la membrana, las velocidades de las moléculas no cambian, ya que no se efectúa trabajo, pero ahora cada molécula tiene el doble de volumen para moverse y, por ende, dos veces más posiciones posibles. Esto es todo lo que necesitamos para calcular el cambio de entropía con la ecuación (20.23).

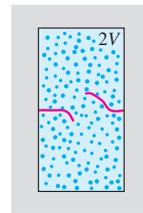
EJECUTAR: Sea w_1 el número de estados microscópicos del sistema total cuando el gas ocupa el volumen V (figura 20.23a). El número de

20.23 En una expansión libre de N moléculas en la que el volumen se duplica, el número de posibles estados microscópicos aumenta en 2^N .

a) El gas ocupa un volumen V ; número de microestados = w_1 .



b) El gas ocupa un volumen $2V$; número de microestados = $w_2 = 2^N w_1$.



moléculas es $N = nN_A$ y cada molécula tiene el doble de posibles estados después de romperse la membrana. Por lo tanto, el número w_2 de posibles estados microscópicos cuando el gas ocupa el volumen $2V$ (figura 20.23b) aumenta en un factor de 2^N ; es decir, $w_2 = 2^N w_1$.

El cambio de entropía en este proceso es

$$\begin{aligned}\Delta S &= k \ln \frac{w_2}{w_1} = k \ln \frac{2^N w_1}{w_1} = k \ln 2^N \\ &= Nk \ln 2\end{aligned}$$

Puesto que $N = nN_A$ y $k = R/N_A$, esto se convierte en

$$\Delta S = (nN_A)(R/N_A) \ln 2 = nR \ln 2$$

EVALUAR: Éste es el mismo resultado que el del ejemplo 20.8, pero sin referencia al camino termodinámico seguido.

Estados microscópicos y la segunda ley

La relación entre entropía y el número de estados microscópicos nos permite entender mejor el planteamiento de entropía de la segunda ley de la termodinámica, de que la entropía de un sistema cerrado nunca puede disminuir. De acuerdo con la ecuación (20.22), esto implica que un sistema cerrado nunca puede sufrir espontáneamente un proceso que reduzca el número de estados microscópicos posibles.

Un ejemplo de semejante proceso prohibido sería si todo el aire de una habitación se moviera espontáneamente a una mitad de la habitación, dejando vacío en la otra mitad. Tal “compresión libre” sería lo contrario de la expansión libre de los ejemplos 20.8 y 20.11, y reduciría en un factor de 2^N el número de posibles estados microscópicos. En sentido estricto, ¡este proceso no es imposible! La probabilidad de hallar una molécula dada en una mitad de la habitación es de $\frac{1}{2}$, así que la probabilidad de hallar todas las moléculas en la misma mitad es $(\frac{1}{2})^N$. (Ésta es exactamente la probabilidad de obtener N caras seguidas al lanzar una moneda.) Esta probabilidad *no* es cero. Sin embargo, por si le preocupa encontrarse repentinamente sin aire en la mitad evacuada de su habitación, considere que ésta podría contener 1000 moles de aire, de manera que $N = 1000N_A = 6.02 \times 10^{26}$ moléculas. La probabilidad de que todas las moléculas estén en la misma mitad del cuarto es entonces $(\frac{1}{2})^{6.02 \times 10^{26}}$. Expresado como decimal, este número tiene ¡más de 10^{26} ceros a la derecha del punto decimal!

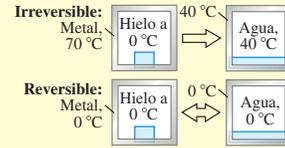
Dada la probabilidad tan insignificante de que tal “compresión libre” ocurra, es casi seguro que nunca ha ocurrido en el Universo desde el principio del tiempo. Concluimos que, en la práctica, la segunda ley de la termodinámica nunca se viola.

Evalúe su comprensión de la sección 20.8 N moléculas de gas ideal ocupan inicialmente un volumen V . Luego, el gas se expande a un volumen $2V$. El número de estados microscópicos del gas aumenta con esta expansión. ¿En cuál de las siguientes circunstancias aumentará al máximo este número? i) La expansión es reversible e isotérmica; ii) la expansión es reversible y adiabática; iii) el número cambiará en la misma cantidad para ambas circunstancias.



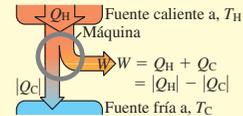
CAPÍTULO 20 RESUMEN

Procesos reversibles e irreversibles: Un proceso reversible es uno cuya dirección puede revertirse con un cambio infinitesimal en las condiciones del proceso, y en el cual el sistema siempre está en equilibrio térmico o muy cerca de él. Todos los demás procesos termodinámicos son irreversibles.



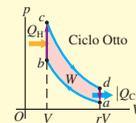
Máquinas térmicas: Una máquina térmica toma calor Q_H de una fuente, convierte parte de él en trabajo W y desecha o expulsa el resto $|Q_C|$ a una temperatura menor. La eficiencia térmica e de una máquina térmica mide qué tanto del calor absorbido se convierte en trabajo. (Véase el ejemplo 20.1.)

$$e = \frac{W}{Q_H} = 1 + \frac{Q_C}{Q_H} = 1 - \left| \frac{Q_C}{Q_H} \right| \quad (20.4)$$



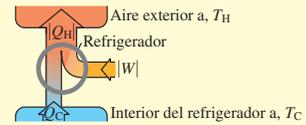
Ciclo Otto: Un motor de gasolina que opera según el ciclo Otto tiene una eficiencia térmica máxima teórica e que depende de la razón de compresión r y de la razón de capacidades caloríficas γ de la sustancia de trabajo.

$$e = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \quad (20.6)$$

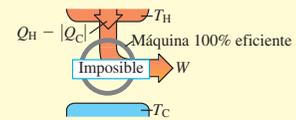


Refrigeradores: Un refrigerador toma calor Q_C de un lugar más frío, tiene un aporte de trabajo $|W|$, y desecha o expulsa calor $|Q_H|$ a un lugar más caliente. La eficiencia del refrigerador está dada por su coeficiente de rendimiento K .

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|} = \frac{|Q_C|}{|Q_H| - |Q_C|} \quad (20.9)$$

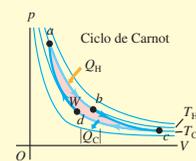


Segunda ley de la termodinámica: La segunda ley de la termodinámica describe la direccionalidad de los procesos termodinámicos naturales y puede plantearse de varias formas equivalentes. El planteamiento de *máquina* es que ningún proceso cíclico puede convertir calor totalmente en trabajo; el planteamiento de *refrigerador* es que ningún proceso cíclico puede transferir calor de un lugar más frío a uno más caliente sin aporte de trabajo mecánico.



Ciclo de Carnot: El ciclo de Carnot opera entre dos fuentes de calor a temperaturas T_H y T_C y usa sólo procesos reversibles. Su eficiencia térmica depende únicamente de T_H y T_C . Otro planteamiento equivalente de la segunda ley es que ninguna máquina que opere entre dos temperaturas dadas puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas. (Véanse los ejemplos 20.2 y 20.3.)

$$e_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad (20.14)$$



Una máquina de Carnot operada al revés es un refrigerador de Carnot; su coeficiente de rendimiento depende únicamente de T_H y T_C . Otra forma de la segunda ley dice que ningún refrigerador que opere entre dos temperaturas dadas puede tener un mayor coeficiente de rendimiento que un refrigerador de Carnot que opera entre las mismas temperaturas. (Véase el ejemplo 20.4.)

$$K_{\text{Carnot}} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (20.15)$$

Entropía: La entropía es una medida cuantitativa del desorden de un sistema. El cambio de entropía en cualquier proceso reversible depende de la cantidad de flujo de calor y de la temperatura absoluta T . La entropía sólo depende del estado del sistema, y el cambio de entropía entre un estado inicial y uno final dados es el mismo para todos los procesos que llevan de uno al otro. Esto puede servir para calcular el cambio de entropía en un proceso irreversible. (Véanse los ejemplos 20.5 a 20.10.)

Un planteamiento importante de la segunda ley de la termodinámica es que la entropía de un sistema aislado puede aumentar pero nunca disminuir. Si un sistema interactúa con su entorno, el cambio total de entropía del sistema y el entorno nunca puede ser negativo. Si la interacción implica sólo procesos reversibles, la entropía total es constante y $\Delta S = 0$; si hay procesos irreversibles, la entropía total aumenta y $\Delta S > 0$.

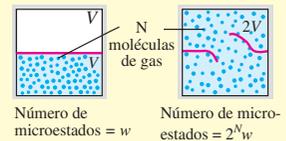
$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (20.19)$$

(proceso reversible)



Entropía y estados microscópicos: Cuando un sistema está en cierto estado macroscópico, las partículas que lo componen pueden estar en cualquiera de w posibles estados microscópicos. Cuanto mayor es w , mayor es la entropía. (Véase el ejemplo 20.11.)

$$S = k \ln w \quad (20.22)$$



Términos clave

procesos irreversibles, 673
proceso reversible, 674
proceso en equilibrio, 674
máquina térmica, 675
sustancia de trabajo, 675
proceso cíclico, 675
eficiencia térmica, 676

razón de compresión, 678
ciclo Otto, 678
ciclo Diesel, 680
refrigerador, 680
coeficiente de rendimiento, 680
calificación de eficiencia de energía, 682
bomba de calor, 682

segunda ley de la termodinámica, 682
ciclo de Carnot, 684
escala de temperatura Kelvin, 690
cero absoluto, 690
entropía, 691
estado macroscópico, 697
estado microscópico, 697

Respuesta a la pregunta de inicio de capítulo ?

Sí. Eso es lo que logra un refrigerador: hace que fluya calor del interior frío al exterior cálido. La segunda ley de la termodinámica dice que no puede haber un flujo espontáneo de calor de un cuerpo frío a uno caliente. El refrigerador cuenta con un motor que efectúa trabajo sobre el sistema para forzar al calor a que fluya en ese sentido.

Respuestas a las preguntas de Evalúe su comprensión

20.1 Respuesta: ii) Al igual que deslizar un libro por una mesa, frotarse las manos utiliza fricción para convertir energía mecánica en calor. En el proceso opuesto (que es imposible), las manos se enfriarían espontáneamente y la energía así liberada haría que las manos se movieran rítmicamente.

20.2 Respuestas: iii), i), ii) A partir de la ecuación (20.4), la eficiencia es $e = W/Q_H$, y de la ecuación (20.2), $W = Q_H + Q_C = |Q_H| - |Q_C|$. Para la máquina i), $Q_H = 5000 \text{ J}$ y $Q_C = -4500 \text{ J}$, de manera que $W = 5000 \text{ J} + (-4500 \text{ J}) = 500 \text{ J}$ y $e = (500 \text{ J})/(5000 \text{ J}) = 0.100$. Para la máquina ii), $Q_H = 25,000 \text{ J}$ y $W = 2000 \text{ J}$, por lo que $e = (2000 \text{ J})/(25,000 \text{ J}) = 0.080$. Para la

máquina iii), $W = 400 \text{ J}$ y $Q_C = -2800 \text{ J}$, de manera que $Q_H = W - Q_C = 400 \text{ J} - (-2800 \text{ J}) = 3200 \text{ J}$ y $e = (400 \text{ J})/(3200 \text{ J}) = 0.125$.

20.3 Respuestas: i), ii) Duplicar la cantidad de combustible quemado por ciclo significa que Q_H se duplica, de manera que el aumento resultante en la presión de b a c en la figura 20.6 es mayor. La razón de compresión r , por lo tanto, la eficiencia permanecen igual, así que $|Q_C|$ (la cantidad de calor expulsado hacia el ambiente) debe incrementarse en el mismo factor que Q_H . Por consiguiente, la caída de presión de d a a en la figura 20.6 también es mayor. El volumen V y la razón de compresión r no cambian, de manera que las dimensiones horizontales del diagrama pV no se alteran.

20.4 Respuesta: no Un refrigerador utiliza un suministro de trabajo para transferir calor de un sistema (el interior del refrigerador) a otro (su exterior, que incluye la casa donde el refrigerador está instalado). Si la puerta está abierta, estos dos sistemas son en realidad el mismo sistema, y tarde o temprano estarán a la misma temperatura. Por la primera ley de la termodinámica, todo el suministro de trabajo al motor del refrigerador se convertirá en calor y la temperatura de la casa aumentará. Para enfriar la casa se requiere un sistema que transfiera calor de ella al mundo exterior, como un acondicionador de aire o una bomba de calor.

20.5 Respuestas: no, no Tanto la máquina 100% eficiente de la figura 20.11a como el refrigerador de la figura 20.11b que no realiza trabajo, al final de un ciclo, regresan al mismo estado que al principio, así que el cambio neto en energía interna de cada sistema es cero ($\Delta U = 0$). Para la máquina 100% eficiente, el flujo neto de calor hacia la máquina es igual que el trabajo neto realizado, por lo que $Q = W$, $Q - W = 0$, y se cumple la primera ley ($\Delta U = Q - W$). En el caso del refrigerador, no se realiza ningún trabajo neto (así que $W = 0$) y fluye tanto calor hacia dentro como hacia fuera ($Q = 0$); de nuevo, $Q - W = 0$ y $\Delta U = Q - W$ de acuerdo con la primera ley. La segunda ley de la termodinámica nos dice que tanto la máquina 100% eficiente como el refrigerador que no realiza trabajo son imposibles.

20.6 Respuesta: no La eficiencia no puede ser mayor que la de una máquina de Carnot que opera entre los mismos límites de temperatura, $e_{\text{Carnot}} = 1 - (T_C/T_H)$ [ecuación (20.14)]. La temperatura T_C de la fuente fría de este motor enfriado por aire es cercana a 300 K (temperatura ambiente) y la temperatura T_H de la fuente caliente no puede exceder el punto de fusión del cobre, 1356 K (véase la tabla 17.4). Por lo tanto, la máxima eficiencia de Carnot que puede lograrse es $e = 1 - (300 \text{ K})/(1356 \text{ K}) = 0.78$, es decir, 78%. La temperatura de cualquier motor real sería menor, así que el motor del inventor jamás

podrá alcanzar una eficiencia del 85%. Mejor invierta su dinero en otro proyecto.

20.7 Respuestas: -102 J/K , no El proceso descrito es exactamente opuesto al empleado en el ejemplo 20.10. Este resultado viola la segunda ley de la termodinámica, que dice que la entropía de un sistema aislado no puede disminuir.

20.8 Respuesta: i) Con respecto a i), en el ejemplo 20.8 (sección 20.7) vimos que, para el gas ideal, el cambio de entropía durante una expansión libre es igual al de una expansión isotérmica. Por la ecuación (20.23), esto implica que la razón del número de estados microscópicos después y antes de la expansión, w_2/w_1 , también es la misma en los dos casos. Por el ejemplo 20.11, $w_2/w_1 = 2^N$, así que el número de estados microscópicos aumenta en un factor de 2^N . Con respecto a ii), en una expansión reversible, el cambio de entropía es $\Delta S = \int dQ/T = 0$. Si la expansión es adiabática, no hay flujo de calor, así que $\Delta S = 0$. Por la ecuación (20.23), $w_2/w_1 = 1$ y el número de estados microscópicos no cambia. La diferencia es que, durante una expansión adiabática, la temperatura baja y las moléculas se mueven más lentamente, de manera que pueden estar en menos estados microscópicos que durante una expansión isotérmica.

PROBLEMAS

Para las tareas asignadas por el profesor, visite www.masteringphysics.com



Preguntas para análisis

P20.1. Una olla está llena a la mitad con agua y se tapa formando un sello hermético que no permite el escape de vapor. La olla se calienta en una estufa, formándose vapor de agua dentro de ella. La estufa se apaga y el vapor se condensa. ¿Este ciclo es reversible o irreversible? ¿Por qué?

P20.2. Cite dos ejemplos de procesos reversibles y dos de procesos irreversibles en sistemas puramente mecánicos, como bloques que se deslizan por planos, resortes, poleas y cuerdas. Explique qué hace a cada proceso reversible o irreversible.

P20.3. ¿Qué procesos irreversibles se efectúan en un motor de gasolina? ¿Por qué son irreversibles?

P20.4. Suponga que trata de enfriar su cocina dejando abierta la puerta del refrigerador. ¿Qué sucede? ¿Por qué? ¿El resultado sería el mismo si se dejara abierta una hielera llena de hielo? Explique las diferencias, si las hay.

P20.5. Un congresista de Estados Unidos sugirió un plan para generar energía. Se rompen moléculas de agua (H_2O) para producir hidrógeno y oxígeno. El hidrógeno se quema (se combina con oxígeno) para liberar energía. El único producto de esta combustión es agua, así que no hay contaminación. A la luz de la segunda ley de la termodinámica, ¿qué piensa usted de este plan?

P20.6. Convertir energía mecánica totalmente en calor, ¿viola la segunda ley de la termodinámica? ¿Y convertir calor totalmente en trabajo? Explique.

P20.7. Imagine un filtro de aire especial colocado en la ventana de una casa. Los diminutos orificios en el filtro sólo permiten la salida de moléculas de aire cuya rapidez sea mayor que cierto valor, y sólo permite la entrada de moléculas cuya rapidez sea menor que ese valor. Explique por qué tal filtro enfriaría la casa y por qué la segunda ley de la termodinámica imposibilita la construcción de semejante filtro.

P20.8. El eje de un motor eléctrico está acoplado al de un generador eléctrico. El motor impulsa al generador, y una parte de la corriente de

éste opera el motor. El resto de la corriente se usa para iluminar una casa. ¿Qué defecto tiene este esquema?

P20.9. Si un trapo mojado se cuelga en el desierto, donde hay viento caliente, se enfría por evaporación a una temperatura hasta 20°C menor que la del aire. Analice esto a la luz de la segunda ley de la termodinámica.

P20.10. Compare el diagrama pV para el ciclo Otto en la figura 20.6 con el diagrama para la máquina térmica de Carnot de la figura 20.13. Explique algunas diferencias importantes entre los dos ciclos.

P20.11. Si ninguna máquina real puede ser tan eficiente como una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas, ¿qué caso tiene deducir y usar la ecuación (20.14)?

P20.12. La eficiencia de las máquinas térmicas es elevada cuando la diferencia de temperatura entre las fuentes caliente y fría es grande. Por otro lado, los refrigeradores funcionan mejor cuando la diferencia de temperatura es pequeña. Considerando el ciclo mecánico del refrigerador de la figura 20.9, explique en términos físicos por qué requiere menos trabajo eliminar calor de una sustancia de trabajo si las dos fuentes (el interior del refrigerador y el aire exterior) están casi a la misma temperatura, que si el aire exterior está mucho más caliente que el interior del refrigerador.

P20.13. ¿Qué eficiencia tendría una máquina de Carnot que opera con $T_H = T_C$? ¿Y si $T_C = 0 \text{ K}$ y T_H fuera cualquier temperatura mayor que 0 K ? Interprete sus respuestas.

P20.14. Las máquinas térmicas reales, como el motor de gasolina de un auto, siempre tienen fricción entre sus piezas móviles, aunque los lubricantes la reducen al mínimo. ¿Una máquina térmica con piezas totalmente sin fricción sería 100% eficiente? ¿Por qué? ¿Depende la respuesta de si la máquina ejecuta un ciclo de Carnot o no? ¿Por qué?

P20.15. ¿Un refrigerador lleno de alimentos consume más potencia si la temperatura ambiente es 20°C que si es 15°C ? ¿O el consumo es el mismo? Explique su razonamiento.

P20.16. En el ejemplo 20.4, un refrigerador de Carnot requiere una entrada de trabajo de sólo 230 J para extraer 346 J de calor de la fuente

fría. ¿Esta discrepancia implica una violación a la ley de la conservación de la energía? Explique por qué.

P20.17. Explique por qué cada uno de los siguientes procesos es un ejemplo de desorden o aleatoriedad creciente: mezclado de agua caliente y fría; expansión libre de un gas; flujo irreversible de calor; producción de calor por fricción mecánica. ¿Hay aumentos de entropía en todos ellos? ¿Por qué?

P20.18. La libre expansión de un gas es un proceso adiabático, por lo que no hay transferencia de calor. No se realiza trabajo, de manera que la energía interna no cambia. Por lo tanto, $Q/T = 0$; sin embargo, el desorden del sistema y, por lo tanto, la entropía se incrementan después de la expansión. ¿Por qué la ecuación (20.19) no se aplica a esta situación?

P20.19. ¿La Tierra y el Sol están en equilibrio térmico? Hay cambios de entropía asociados a la transmisión de energía del Sol a la Tierra? ¿La radiación es diferente de otros modos de transferencia de calor con respecto a los cambios de entropía? Explique su razonamiento.

P20.20. Analice los cambios de entropía implicados en la preparación y el consumo de una *hot fudge sundae* (helado bañado con jarabe de chocolate caliente).

P20.21. Si proyectamos una película en reversa, es como si se invirtiera la dirección del tiempo. En tal proyección, ¿veríamos procesos que violan la conservación de la energía? ¿La conservación de la cantidad de movimiento lineal? ¿Y la segunda ley de la termodinámica? En cada caso en que puedan verse procesos que violan una ley, dé ejemplos.

P20.22. Algunos críticos de la evolución biológica aseguran que ésta viola la segunda ley de la termodinámica, pues implica organismos simples que dan origen a otros más ordenados. Explique por qué éste no es un argumento válido contra la evolución.

P20.23. Al crecer, una planta crea una estructura muy compleja y organizada a partir de materiales simples, como aire, agua y minerales. ¿Viola esto la segunda ley de la termodinámica? Explique por qué. ¿Cuál es la fuente de energía final de la planta? Explique su razonamiento.

Ejercicios

Sección 20.2 Máquinas térmicas

20.1. Un motor Diesel efectúa 2200 J de trabajo mecánico y desecha (expulsa) 4300 J de calor en cada ciclo. *a)* ¿Cuánto calor debe apartarse al motor en cada ciclo? *b)* Calcule la eficiencia térmica del motor.

20.2. Un motor de avión recibe 9000 J de calor y desecha 6400 J en cada ciclo. *a)* Calcule el trabajo mecánico efectuado por el motor en un ciclo. *b)* Calcule la eficiencia térmica del motor.

20.3. Motor de gasolina. Un motor de gasolina recibe 1.61×10^4 J de calor y produce 3700 J de trabajo por ciclo. El calor proviene de quemar gasolina que tiene un calor de combustión de 4.60×10^4 J/g. *a)* Calcule la eficiencia térmica. *b)* ¿Cuánto calor se desecha en cada ciclo? *c)* ¿Qué masa de gasolina se quema en cada ciclo? *d)* Si el motor opera a 60.0 ciclos/s, determine su salida de potencia en kilowatts y en hp.

20.4. Un motor de gasolina desarrolla una potencia de 180 kW (aproximadamente 241 hp). Su eficiencia térmica es del 28.0%. *a)* ¿Cuánto calor debe suministrarse al motor por segundo? *b)* ¿Cuánto calor desecha el motor cada segundo?

20.5. Cierta planta nuclear produce una potencia mecánica (que impulsa un generador eléctrico) de 330 MW. Su tasa de aporte de calor proveniente del reactor nuclear es de 1300 MW. *a)* Calcule la eficiencia térmica del sistema, *b)* ¿con qué rapidez desecha calor el sistema?

Sección 20.3 Motores de combustión interna

20.6. *a)* Calcule la eficiencia teórica para un ciclo Otto con $\gamma = 1.40$ y $r = 9.50$. *b)* Si este motor consume 10,000 J de calor a partir de la quema de su combustible, ¿cuánto calor desecha hacia el aire exterior?

20.7. ¿Qué razón de compresión debe tener un ciclo Otto para alcanzar una eficiencia ideal del 65.0% si $\gamma = 1.40$?

20.8. El motor de un Mercedes-Benz SLK230 realiza un ciclo Otto con una razón de compresión de 8.8. *a)* Calcule la eficiencia ideal del motor. Use $\gamma = 1.40$. *b)* El motor de un Dodge Viper GT2 tiene una razón de compresión un poco mayor, de 9.6. ¿Cuánto aumenta la eficiencia con este aumento en la razón de compresión?

Sección 20.4 Refrigeradores

20.9. Un refrigerador tiene un coeficiente de rendimiento de 2.10. Durante cada ciclo, absorbe 3.40×10^4 J de la fuente fría. *a)* ¿Cuánta energía mecánica se requiere en cada ciclo para operar el refrigerador? *b)* Durante cada ciclo, ¿cuánto calor se desecha a la fuente caliente?

20.10. Un acondicionador de aire tiene un coeficiente de rendimiento de 2.9 en un día caluroso y utiliza 850 W de energía eléctrica. *a)* ¿Cuántos joules de calor elimina el sistema de aire acondicionado de la habitación en un minuto? *b)* ¿Cuántos joules de calor entrega el sistema de aire acondicionado al aire caliente del exterior en un minuto? *c)* Explique por qué sus respuestas a los incisos *a)* y *b)* son diferentes.

20.11. En un minuto, un acondicionador de aire de ventana absorbe 9.80×10^4 J de calor de la habitación enfriada y deposita 1.44×10^5 J de calor al aire exterior. *a)* Calcule el consumo de potencia de la unidad en watts. *b)* Calcule la calificación de eficiencia de energía de la unidad.

20.12. Un congelador tiene un coeficiente de rendimiento de 2.40, y debe convertir 1.80 kg de agua a 25.0 °C en 1.80 kg de hielo a -5.0 °C en una hora. *a)* ¿Cuánto calor es necesario extraer del agua a 25.0 °C para convertirla en hielo a -5.0 °C? *b)* ¿Cuánta energía eléctrica consume el congelador en esa hora? *c)* ¿Cuánto calor de desecho (expulsado) fluye al cuarto donde está el congelador?

Sección 20.6 El ciclo de Carnot

20.13. Una máquina de Carnot cuya fuente de alta temperatura está a 620 K recibe 550 J de calor a esta temperatura en cada ciclo y cede 335 J a la fuente de baja temperatura. *a)* ¿Cuánto trabajo mecánico realiza la máquina en cada ciclo? *b)* ¿A qué temperatura está la fuente fría? *c)* Calcule la eficiencia térmica del ciclo.

20.14. Una máquina de Carnot opera entre dos fuentes de calor a 520 K y 300 K. *a)* Si el motor recibe 6.45 kJ de calor de la fuente a 520 K en cada ciclo, ¿cuántos joules por ciclo cede a la fuente a 300 K? *b)* ¿Cuánto trabajo mecánico realiza la máquina en cada ciclo? *c)* Determine la eficiencia térmica de la máquina.

20.15. Una máquina de Carnot tiene una eficiencia del 59% y realiza 2.5×10^4 J de trabajo en cada ciclo. *a)* ¿Cuánto calor extrae la máquina de su fuente de calor en cada ciclo? *b)* Suponga que la máquina expulsa calor a temperatura ambiente (20.0 °C). ¿Cuál es la temperatura de su fuente de calor?

20.16. Una máquina para hacer hielo opera en un ciclo de Carnot; toma calor de agua a 0.0 °C y desecha calor a un cuarto a 24.0 °C. Suponga que 85.0 kg de agua a 0.0 °C se convierten en hielo a 0.0 °C. *a)* ¿Cuánto calor se desecha al cuarto? *b)* ¿Cuánto trabajo debe suministrarse al aparato?

20.17. Un refrigerador de Carnot opera entre dos fuentes de calor a temperaturas de 320 K y 270 K. *a)* Si en cada ciclo el refrigerador recibe 415 J de calor de la fuente a 270 K, ¿cuántos joules de calor cede a la fuente a 320 K? *b)* Si el refrigerador realiza 165 ciclos/min, ¿qué alimentación de potencia se requiere para operarlo? *c)* Calcule el coeficiente de rendimiento del refrigerador.

20.18. Un dispositivo de Carnot extrae 5.00 kJ de calor de un cuerpo a $-10.0\text{ }^\circ\text{C}$. ¿Cuánto trabajo se efectúa si el dispositivo expulsa calor al entorno *a)* a $25.0\text{ }^\circ\text{C}$ *b)* a $0.0\text{ }^\circ\text{C}$ *c)* a $-25.0\text{ }^\circ\text{C}$? En cada caso, ¿el dispositivo actúa como máquina o como refrigerador?

20.19. Cierta marca de congeladores afirma en su publicidad que sus productos utilizan $730\text{ kW}\cdot\text{h}$ al año. *a)* Suponiendo que el congelador opera durante 5 horas cada día, ¿cuánta potencia requiere mientras está operando? *b)* Si el congelador mantiene su interior a una temperatura de $-5.0\text{ }^\circ\text{C}$ en una habitación a $20.0\text{ }^\circ\text{C}$, ¿cuál es el máximo coeficiente de rendimiento teórico? *c)* ¿Cuál es la máxima cantidad teórica de hielo que este congelador puede hacer en una hora, comenzando con agua a $20.0\text{ }^\circ\text{C}$?

20.20. Una máquina de Carnot ideal opera entre $500\text{ }^\circ\text{C}$ y $100\text{ }^\circ\text{C}$ con un suministro de calor de 250 J por ciclo. *a)* ¿Cuánto calor se entrega a la fuente fría en cada ciclo? *b)* ¿Qué número mínimo de ciclos se requieren para que la máquina levante una piedra de 500 kg a una altura de 100 m?

20.21. Una máquina de Carnot tiene una eficiencia térmica de 0.600 y la temperatura de su fuente caliente es de 800 K. Si expulsa 3000 J de calor a la fuente fría en un ciclo, ¿cuánto trabajo efectuará en ese tiempo?

20.22. Una máquina térmica de Carnot utiliza una fuente caliente que consiste en una gran cantidad de agua en ebullición y una fuente fría que consiste en una tina grande llena de hielo y agua. En cinco minutos de operación, el calor expulsado por la máquina derrite 0.0400 kg de hielo. En ese tiempo, ¿cuánto trabajo W efectúa la máquina?

20.23. Usted diseña una máquina que toma $1.50 \times 10^4\text{ J}$ de calor a 650 K en cada ciclo y expulsa calor a una temperatura de 350 K . La máquina completa 240 ciclos en 1 minuto. ¿Cuál es la potencia de salida teórica máxima de esa máquina en caballos de potencia?

20.24. *a)* Demuestre que la eficiencia e de una máquina de Carnot y el coeficiente de rendimiento K de un refrigerador de Carnot tienen la relación $K = (1 - e)/e$. La máquina y el refrigerador operan entre las mismas fuentes caliente y fría. *b)* Calcule K para los valores límite $e \rightarrow 1$ y $e \rightarrow 0$. Explique.

Sección 20.7 Entropía

20.25. Un estudiante ocioso agrega calor a 0.350 kg de hielo a $0.0\text{ }^\circ\text{C}$ hasta derretirlo todo. *a)* Calcule el cambio de entropía del agua. *b)* La fuente de calor es un cuerpo muy masivo que está a $25.0\text{ }^\circ\text{C}$. Calcule el cambio de entropía de ese cuerpo. *c)* Determine el cambio total de entropía del agua y la fuente de calor.

20.26. Usted decide tomar un reconfortante baño caliente, pero descubre que su desconsiderado compañero de cuarto consumió casi toda el agua caliente. Usted llena la tina con 270 kg de agua a $30.0\text{ }^\circ\text{C}$ e intenta calentarla más vertiendo 5.00 kg de agua que alcanzó la ebullición en una estufa. *a)* ¿Se trata de un proceso reversible o irreversible? Utilice un razonamiento de física para explicar el hecho. *b)* Calcule la temperatura final del agua para el baño. *c)* Calcule el cambio neto de entropía del sistema (agua del baño + agua en ebullición), suponiendo que no hay intercambio de calor con el aire o con la tina misma.

20.27. Un bloque de hielo de 15.0 kg a $0.0\text{ }^\circ\text{C}$ se derrite dentro de una habitación grande cuya temperatura es de $20.0\text{ }^\circ\text{C}$. Considere el hielo

más la habitación como sistema aislado y suponga que la habitación es lo bastante grande como para despreciar su cambio de temperatura. *a)* ¿El proceso de la fusión del hielo es reversible o irreversible? Explique su razonamiento con argumentos físicos sencillos, sin recurrir a ninguna ecuación. *b)* Calcule el cambio neto de entropía del sistema durante este proceso. Explique si el resultado es congruente o no con su respuesta en el inciso *a)*.

20.28. Usted prepara té con 0.250 kg de agua a $85.0\text{ }^\circ\text{C}$ y lo deja enfriar a temperatura ambiente ($20.0\text{ }^\circ\text{C}$) antes de beberlo. *a)* Calcule el cambio de entropía del agua mientras se enfría. *b)* En esencia, el proceso de enfriamiento es isotérmico para el aire en su cocina. Calcule el cambio de entropía del aire mientras el té se enfría, suponiendo que todo el calor que pierde el agua va al aire. ¿Cuál es el cambio total de entropía del sistema constituido por té + aire?

20.29. Tres moles de gas ideal sufren una compresión isotérmica reversible a $20.0\text{ }^\circ\text{C}$, durante la cual se efectúa 1850 J de trabajo sobre el gas. Calcule el cambio de entropía del gas.

20.30. Calcule el cambio de entropía de 0.130 kg de helio gaseoso en el punto de ebullición normal del helio cuando se condensa isotérmicamente a 1.00 L de helio líquido. (*Sugerencia:* véase la tabla 17.4 de la sección 17.6.)

20.31. *a)* Calcule el cambio de entropía cuando 1.00 kg de agua a $100\text{ }^\circ\text{C}$ se convierte en vapor a $100\text{ }^\circ\text{C}$. (Véase la tabla 17.4.) *b)* Compare su respuesta con el cambio de entropía cuando 1.00 kg de hielo se funde a $0\text{ }^\circ\text{C}$, calculado en el ejemplo 20.5 (sección 20.7). ¿El cambio de entropía es mayor para la fusión o para la vaporización? Interprete su respuesta con base en la idea de que la entropía es una medida de la aleatoriedad de un sistema.

20.32. *a)* Calcule el cambio de entropía cuando 1.00 mol de agua (masa molar de 18.0 g/mol) a $100\text{ }^\circ\text{C}$ se convierte en vapor de agua. *b)* Repita el cálculo del inciso *a)* para 1.00 mol de nitrógeno líquido, 1.00 mol de plata y 1.00 mol de mercurio cuando cada uno se vaporiza a su punto de ebullición normal. (Tome los valores de vaporización de la tabla 17.4 y las masas molares del Apéndice D. Recuerde que la molécula de nitrógeno es N_2 .) *c)* Sus resultados de los incisos *a)* y *b)* deberán ser muy similares. (Esto se conoce como *regla de Dreyer y Trouton*.) Explique por qué es natural que así suceda, con base en la idea de que la entropía es una medida de la aleatoriedad de un sistema.

20.33. Si 25.0 g de metal galio se funden en su mano (véase la figura 17.20), ¿cuál es el cambio de entropía del galio en ese proceso? ¿Qué sucede con el cambio de entropía de su mano? ¿Es positivo o negativo? ¿Es mayor o menor esta magnitud que el cambio de entropía del galio?

*Sección 20.8 Interpretación microscópica de la entropía

***20.34.** Una caja se divide, mediante una membrana, en dos partes de igual volumen. El lado izquierdo contiene 500 moléculas de nitrógeno gaseoso; el derecho contiene 100 moléculas de oxígeno gaseoso. Los dos gases están a la misma temperatura. La membrana se perfora y finalmente se logra el equilibrio. Suponga que el volumen de la caja es suficiente para que cada gas sufra una expansión libre y no cambie de temperatura. *a)* En promedio, ¿cuántas moléculas de cada tipo habrá en cada mitad de la caja? *b)* Calcule el cambio de entropía del sistema cuando se perfora la membrana. *c)* Calcule la probabilidad de que las moléculas se encuentren en la misma distribución que tenían antes de la perforación, esto es, 500 moléculas de N_2 en la mitad izquierda y 100 moléculas de O_2 en la derecha.

***20.35.** Dos moles de gas ideal ocupan un volumen V . El gas se expande isotérmica y reversiblemente a un volumen $3V$. *a)* ¿Cambia la distribución de velocidades por esta expansión isotérmica? Explique.

b) Use la ecuación (20.23) para calcular el cambio de entropía del gas. c) Use la ecuación (20.18) para calcular el cambio de entropía del gas. Compare este resultado con el del inciso b).

***20.36.** Un solitario globo de una fiesta con un volumen de 2.40 L y que contiene 0.100 moles de aire se deja a la deriva en la Estación Espacial Internacional, temporalmente inhabitada y despresurizada. La luz solar que pasa por una ventanilla incide sobre el globo y hace que explote provocando que el aire en su interior experimente una expansión libre en la estación vacía, cuyo volumen total es de 425 m³. Calcule el cambio de entropía del aire durante la expansión.

Problemas

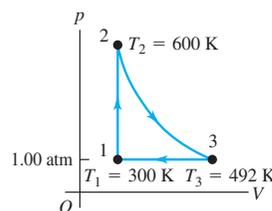
20.37. Usted diseña una máquina de Carnot que opera entre temperaturas de 500 K y 400 K y produce 2000 J de trabajo en cada ciclo. a) Calcule la eficiencia de la máquina. b) Calcule la cantidad de calor cedida durante la compresión isotérmica a 400 K. c) Trace las isotermas de 500 K y 400 K en un diagrama pV (sin efectuar cálculos); luego dibuje el ciclo de Carnot que sigue la máquina. d) En el mismo diagrama, trace la isoterma de 300 K; a continuación, dibuje con otro color el ciclo de Carnot que comienza en el mismo punto sobre la isoterma de 500 K, pero que opera en un ciclo entre las isotermas de 500 K y 300 K. e) Compare las áreas contenidas por las trayectorias cerradas (el trabajo neto realizado) para los dos ciclos. Advierta que se extrae la misma cantidad de calor de la fuente caliente en ambos casos. ¿Puede explicar por qué se “desperdicia” menos calor durante la compresión isotérmica que durante la compresión de 400 K?

20.38. Se está diseñando una máquina de Carnot que usa dos moles de CO₂ como sustancia de trabajo; el gas puede tratarse como ideal. El CO₂ debe tener una temperatura máxima de 527 °C y una presión máxima de 5.00 atm. Con un aporte de 400 J por ciclo, se desea obtener 300 J de trabajo útil. a) Calcule la temperatura de la fuente fría. b) ¿Durante cuántos ciclos debe operar esta máquina para derretir totalmente un bloque de hielo con masa de 10.0 kg que inicialmente estaba a 0.0 °C, empleando únicamente el calor cedido por la máquina?

20.39. Una máquina de Carnot cuya fuente de baja temperatura está a -90.0 °C tiene una eficiencia del 40.0%. Se asigna a un ingeniero el problema de aumentar la eficiencia al 45.0%. a) ¿En cuántos grados Celsius debe aumentarse la temperatura de la fuente caliente si la temperatura de la fuente fría permanece constante? b) ¿En cuántos grados Celsius debe reducirse la temperatura de la fuente fría si la temperatura de la fuente caliente no cambia?

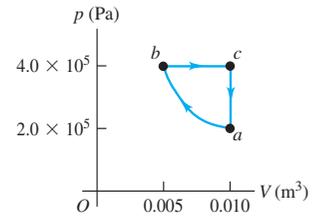
20.40. Una máquina térmica utiliza 0.350 mol de un gas diatómico con comportamiento ideal en el ciclo que se muestra en el diagrama pV de la figura 20.24. El proceso 1 → 2 es a volumen constante, el 2 → 3 es adiabático y el 3 → 1 es a presión constante a 1.00 atm. Para este gas, $\gamma = 1.40$. a) Calcule la presión y el volumen en los puntos 1, 2 y 3. b) Calcule Q , W y ΔU para cada uno de los tres procesos. c) Calcule el trabajo neto efectuado por el gas en el ciclo. d) Calcule el flujo neto de calor hacia la máquina en un ciclo. e) Determine la eficiencia térmica de la máquina y compárela con la de una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas mínima y máxima T_1 y T_2 .

Figura 20.24 Problema 20.40.



20.41. Usted construye una máquina térmica que utiliza 1.00 mol de un gas diatómico ideal en el ciclo mostrado en la figura 20.25. a) Demuestre que el segmento ab es una compresión isotérmica. b) ¿Durante cuál segmento (o segmentos) del ciclo el gas absorbe calor? ¿Durante cuál segmento (o segmentos) cede calor? ¿Cómo lo sabe? c) Calcule la temperatura en los puntos a , b y c . d) Calcule el calor neto intercambiado con los alrededores y el trabajo neto que realiza la máquina en un ciclo. e) Calcule la eficiencia térmica de la máquina.

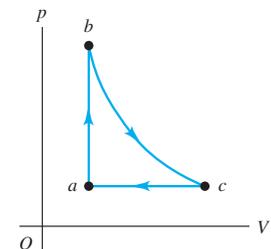
Figura 20.25 Problema 20.41.



20.42. Bomba de calor. Una bomba de calor es una máquina térmica operada en reversa. En invierno bombea calor del aire exterior frío al aire más cálido del interior del edificio, manteniéndolo a una temperatura agradable. En verano bombea calor del aire más fresco dentro del edificio al aire más cálido del exterior, actuando como acondicionador de aire. a) Si la temperatura exterior en invierno es de -5.0 °C y la temperatura interior es de 17.0 °C, ¿cuántos joules de calor suministrará la bomba al interior por cada joule de energía eléctrica empleado para operar la unidad, suponiendo un ciclo ideal de Carnot? b) Suponga que tiene la opción de usar calefacción por resistencia eléctrica en lugar de una bomba de calor. ¿Cuánta energía eléctrica necesitaría para suministrar al interior de la casa la misma cantidad de calor que en el inciso a)? Considere una bomba de calor de Carnot que suministra calor al interior de una casa para mantenerla a 68 °F. Demuestre que la bomba de calor suministra menos calor por cada joule de energía eléctrica empleado para operar la unidad a medida que disminuye la temperatura exterior. Observe que este comportamiento es opuesto a la dependencia de una máquina térmica de Carnot con respecto a la diferencia entre las temperaturas de las fuentes. Explique a qué se debe esto.

20.43. Una máquina térmica opera empleando el ciclo de la figura 20.26. La sustancia de trabajo es 2.00 moles de helio gaseoso, que alcanza una temperatura máxima de 327 °C. Suponga que el helio se puede tratar como gas ideal. El proceso bc es isotérmico. La presión en los estados a y c es de 1.00×10^5 Pa, y en el estado b , de 3.00×10^5 Pa. a) ¿Cuánto calor entra en el gas y cuánto sale del gas en cada ciclo? b) ¿Cuánto trabajo efectúa la máquina en cada ciclo y qué eficiencia tiene? c) Compare la eficiencia de esta máquina con la máxima eficiencia que puede lograrse con las fuentes caliente y fría que se usan en este ciclo.

Figura 20.26 Problema 20.43.



20.44. Imagine que, como ingeniero mecánico, le piden diseñar una máquina de Carnot que use como sustancia de trabajo 2.00 moles de un gas monoatómico con comportamiento ideal y que funcione con una fuente caliente a 500 °C. La máquina debe levantar 2.00 m una masa de 15.0 kg en cada ciclo, empleando un suministro de calor de 500 J. El gas en la cámara de la máquina puede tener un volumen mínimo de 5.00 L durante el ciclo. a) Dibuje un diagrama pV para este ciclo, indicando dónde entra calor en el gas y dónde sale de él. b) ¿A qué temperatura debe estar la fuente fría? c) Calcule la eficiencia térmica de la

máquina. *d*) ¿Cuánta energía térmica gasta esta máquina en cada ciclo?

e) Calcule la presión máxima que tendrá que resistir la cámara de gas.

20.45. Una planta de electricidad experimental en el Laboratorio de Energía Natural de Hawai genera electricidad a partir del gradiente de temperatura del océano. Las temperaturas superficial y de agua profunda son de 27 °C y 6 °C, respectivamente. *a*) Calcule la eficiencia teórica máxima de esta planta. *b*) Si la planta debe producir 210 kW de potencia, ¿con qué rapidez debe extraerse calor del agua tibia? ¿Con qué rapidez debe absorber calor el agua fría? Suponga la eficiencia teórica máxima. *c*) El agua fría que ingresa en la planta sale a 10 °C. Calcule la rapidez, en kg/h y en L/h, con que debe fluir el agua fría por el sistema.

20.46. Calcule la eficiencia térmica de una máquina que opera sometiendo *n* moles de gas ideal diatómico al ciclo 1 → 2 → 3 → 4 → 1 que se muestra en la figura 20.27.

20.47. Un cilindro contiene oxígeno a una presión de 2.00 atm y 300 K. El volumen es de 4.00 L. Suponga que el O₂ se puede tratar como gas ideal, y que se somete a los siguientes procesos:

i) Calentar a presión constante del estado inicial (estado 1) al estado 2, donde *T* = 450 K.
 ii) Enfriar a volumen constante a 250 K (estado 3).
 iii) Comprimir a temperatura constante a un volumen de 4.00 L (estado 4).
 iv) Calentar a volumen constante a 300 K, regresando el sistema al estado 1.

a) Muestre estos cuatro procesos en un diagrama *pV*, dando los valores numéricos de *p* y *V* en cada estado. *b*) Calcule *Q* y *W* para cada proceso. *c*) Calcule el trabajo neto efectuado por el O₂. *d*) Determine la eficiencia de este dispositivo como máquina térmica y compárela con la de una máquina de ciclo de Carnot que opera entre las mismas temperaturas mínima y máxima de 250 K y 450 K.

20.48. Procesos termodinámicos en un refrigerador. Un refrigerador opera de acuerdo con el ciclo de la figura 20.28. Los pasos de compresión (*d* → *a*) y expansión (*b* → *c*) son adiabáticos. La temperatura, la presión y el volumen del refrigerante en cada estado *a*, *b*, *c* y *d* son:

Estado	<i>T</i> (°C)	<i>P</i> (kPa)	<i>V</i> (m ³)	<i>U</i> (kJ)	Porcentaje que es líquido
<i>a</i>	80	2305	0.0682	1969	0
<i>b</i>	80	2305	0.00946	1171	100
<i>c</i>	5	363	0.2202	1005	54
<i>d</i>	5	363	0.4513	1657	5

a) En cada ciclo, ¿cuánto calor pasa del interior del refrigerador al refrigerante mientras este último se encuentra en el evaporador? *b*) En cada ciclo, ¿cuánto calor pasa del refrigerante al aire exterior mientras el refrigerante está en el condensador? *c*) En cada ciclo, ¿cuánto trabajo efectúa el motor del compresor? *d*) Calcule el coeficiente de rendimiento del refrigerador.

Figura 20.27 Problema 20.46.

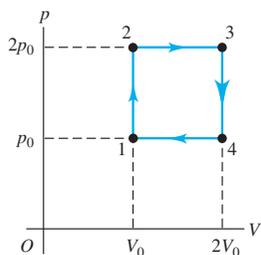
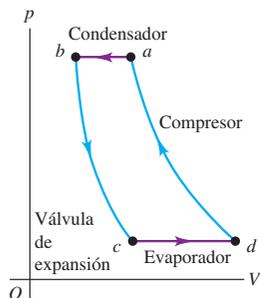
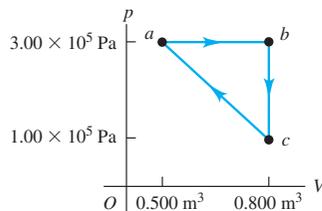


Figura 20.28 Problema 20.48.



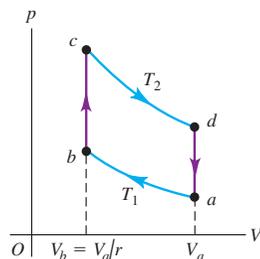
20.49. Un gas monoatómico con comportamiento ideal se somete al ciclo de la figura 20.29 en el sentido que se indica. El camino del proceso *c* → *a* es una recta en el diagrama *pV*. *a*) Calcule *Q*, *W* y ΔU para cada proceso: *a* → *b*, *b* → *c* y *c* → *a*. *b*) Calcule *Q*, *W* y ΔU para un ciclo completo, *c*) Determine la eficiencia del ciclo.

Figura 20.29 Problema 20.49.



20.50. Motor de ciclo Stirling. El ciclo Stirling es similar al ciclo Otto, excepto que la compresión y expansión del gas se efectúan a temperatura constante, no adiabáticamente. El ciclo Stirling se usa en motores de combustión externa (de hecho, no se necesita quemar combustible; se puede utilizar cualquier forma de producir una diferencia de temperatura: gradiente de temperatura solar, geotérmica, oceánica, etcétera), lo que implica que el gas del interior del cilindro no participa en la combustión. El calor se suministra quemando combustible constantemente afuera del cilindro, no explosivamente en su interior como en el ciclo Otto. Por ello, los motores de ciclo Stirling son más silenciosos, pues no hay válvulas de admisión y escape (una fuente importante de ruido). Si bien se usan motores Stirling pequeños para diversos propósitos, las versiones para automóvil no han tenido éxito porque son más grandes, pesadas y costosas que los motores de auto convencionales. La secuencia de pasos del fluido de trabajo dentro del ciclo (figura 20.30) es:

Figura 20.30 Problema 20.50.



- Compresión isotérmica a temperatura *T*₁ del estado inicial *a* al estado *b*, con una razón de compresión *r*.
- Calentamiento a volumen constante al estado *c* a temperatura *T*₂.
- Expansión isotérmica a *T*₂ al estado *d*.
- Enfriamiento a volumen constante de vuelta al estado *a*.

Suponga que el fluido de trabajo es n moles de gas ideal (cuya C_V es independiente de T). a) Calcule: Q , W y ΔU para cada proceso, $a \rightarrow b$, $b \rightarrow c$, $c \rightarrow d$ y $d \rightarrow a$. b) En el ciclo Stirling, las transferencias de calor en $b \rightarrow c$ y $d \rightarrow a$ no implican fuentes de calor externas, sino que usan *regeneración*: la misma sustancia que transfiere calor al gas del interior del cilindro en el proceso $b \rightarrow c$ absorbe calor del gas en el proceso $d \rightarrow a$. Por lo tanto, las transferencias de calor $Q_{b \rightarrow c}$ y $Q_{d \rightarrow a}$ no afectan la eficiencia del motor. Explique esta afirmación comparando las expresiones para $Q_{b \rightarrow c}$ y $Q_{d \rightarrow a}$ calculadas en el inciso a). c) Calcule la eficiencia de un motor de ciclo Stirling en términos de las temperaturas T_1 y T_2 y compárela con la de una máquina de ciclo de Carnot que opera entre las mismas temperaturas. (Históricamente, el ciclo Stirling se inventó antes que el de Carnot.) ¿Este resultado viola la segunda ley de la termodinámica? Explique. Por desgracia, los motores de ciclo Stirling reales no pueden lograr esta eficiencia a causa de problemas con los procesos de transferencia de calor y pérdidas de presión en el motor.

20.51. Una máquina de Carnot opera entre dos fuentes de calor a temperaturas T_H y T_C . Un inventor propone aumentar la eficiencia operando una máquina entre T_H y una temperatura intermedia T' , y una segunda máquina entre T' y T_C usando el calor expulsado por la primera. Calcule la eficiencia de este sistema compuesto y compárela con la de la máquina original.

20.52. Una planta generadora de energía eléctrica de 1000 MW, alimentada con carbón, tiene una eficiencia térmica del 40%. a) ¿Cuál es la tasa de suministro de calor a la planta? b) La planta quema carbón de piedra (antracita), que tiene un calor de combustión de 2.65×10^7 J/kg. ¿Cuánto carbón consume la planta al día, si opera de manera continua? c) ¿A qué tasa se expulsa el calor hacia la fuente fría, la cual es un río cercano? d) La temperatura del río es de 18.0°C antes de llegar a la planta de energía y de 18.5°C después de que recibe el calor de desecho de la planta. Calcule la tasa de flujo del río en metros cúbicos por segundo. e) ¿En cuánto aumenta la entropía del río cada segundo?

20.53. Termodinámica de un motor de automóvil. Un Volkswagen Passat tiene un motor de ciclo Otto de seis cilindros con razón de compresión $r = 10.6$. El diámetro de cada cilindro, llamado *barreno* del motor, es de 82.5 mm. La distancia que el pistón se mueve durante la compresión en la figura 20.5 (la *carrera* del motor) es de 86.4 mm. La presión inicial de la mezcla aire-combustible (en el punto *a* de la figura 20.6) es de 8.50×10^4 Pa, y la temperatura inicial es de 300 K (la del aire exterior). Suponga que, en cada ciclo, se agregan 200 J de calor a cada cilindro al quemarse la gasolina y que el gas tiene $C_V = 20.5$ J/mol \cdot K y $\gamma = 1.40$. a) Calcule el trabajo total que realiza cada cilindro del motor en un ciclo y el calor que se desprende cuando el gas se enfría a la temperatura del aire exterior. b) Calcule el volumen de la mezcla aire-combustible en el punto *a* del ciclo. c) Calcule la presión, el volumen y la temperatura del gas en los puntos *b*, *c* y *d* del ciclo. Dibuje un diagrama pV que muestre los valores numéricos de p , V y T para cada uno de los cuatro estados. d) Compare la eficiencia de este motor con la de una máquina de Carnot que opera entre las mismas temperaturas máxima y mínima.

20.54. Un sistema de aire acondicionado opera con 800 W de potencia y tiene un coeficiente de rendimiento de 2.80 a una temperatura ambiente de 21.0°C y una temperatura exterior de 35.0°C . a) Calcule la tasa a la que esta unidad elimina el calor. b) Calcule la tasa a la que se descarga calor al aire exterior. c) Calcule el cambio total de entropía en la habitación si el sistema de aire acondicionado funciona durante una hora. Calcule el cambio total de entropía en el aire exterior durante el mismo período. d) Calcule el cambio neto de entropía para el sistema (habitación + aire exterior).

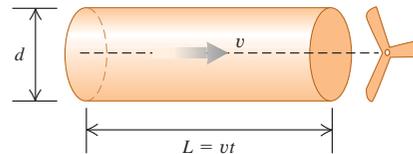
20.55. Energía no disponible. Según el análisis de la entropía y la segunda ley que hicimos después del ejemplo 20.10 (sección 20.7), el aumento de entropía durante un proceso irreversible está asociado con una disminución en la disponibilidad de energía. Considere un ciclo de Carnot que usa una fuente fría con temperatura Kelvin T_c . Se trata de una verdadera fuente, lo bastante grande como para que no cambie su temperatura cuando acepta calor de la máquina. Esta última acepta calor de un objeto a temperatura T' , donde $T' > T_c$. El objeto tiene tamaño finito, así que se enfría cuando se extrae calor de él. La máquina sigue operando hasta que $T' = T_c$. a) Demuestre que la magnitud total del calor cedido a la fuente de baja temperatura es $T_c |\Delta S_H|$, donde ΔS_H es el cambio de entropía de la fuente caliente. b) Aplique el resultado del inciso a) a 1.00 kg de agua que inicialmente está a una temperatura de 373 K, como fuente de calor para la máquina, y $T_c = 273$ K. ¿Cuánto trabajo mecánico total puede efectuar la máquina hasta detenerse? c) Repita el inciso b) para 2.00 kg de agua a 323 K. d) Compare la cantidad de trabajo que puede obtenerse de la energía contenida en el agua del ejemplo 20.10 antes y después de mezclarse. Indique si su resultado demuestra que ahora hay menos energía disponible.

20.56. La máxima potencia que puede extraer una turbina de viento de una corriente de aire es aproximadamente

$$P = kd^2v^3$$

donde d es el diámetro de las aspas, v es la rapidez del viento y la constante $k = 0.5 \text{ W} \cdot \text{s}^3/\text{m}^5$. a) Explique la dependencia de P con respecto a d y a v considerando un cilindro de aire que pasa por las aspas en un tiempo t (figura 20.31). Este cilindro tiene diámetro d , longitud $L = vt$ y densidad ρ . b) La turbina de viento Mod-5B de Kahaku en la isla hawaiana de Oahu tiene un diámetro de aspas de 97 m (un poco más largo que un campo de fútbol americano), está sobre una torre de 58 m y genera 3.2 MW de potencia eléctrica. Suponiendo una eficiencia del 25%, ¿qué rapidez del viento (en m/s y km/h) se requiere para obtener esa potencia? c) Las turbinas de viento comerciales suelen colocarse en cañones montañosos o lugares por donde pasa el viento. ¿Por qué?

Figura 20.31 Problema 20.56.



20.57. a) ¿Cuánto trabajo debe realizar un refrigerador de Carnot en un día caluroso para transferir 1000 J de calor de su interior, que está a 10°C , al aire exterior que se encuentra a 35.0°C . b) ¿Cuánto trabajo debe efectuar el mismo refrigerador para transferir la misma cantidad de calor si la temperatura interior es la misma, pero el aire exterior está a sólo 15.0°C ? c) Elabore diagramas pV para ambas situaciones. ¿Puede explicar en términos físicos por qué debe realizarse más trabajo cuando la diferencia de temperatura entre las dos etapas isotérmicas es mayor?

20.58. Un cubo de hielo de 0.0500 kg a una temperatura inicial de -15.0°C se coloca en 0.600 kg de agua a $T = 45.0^\circ\text{C}$ en un recipiente aislado con masa despreciable. a) Calcule la temperatura final del agua una vez que el hielo se funde. b) Calcule el cambio de entropía del sistema.

20.59. a) Para el ciclo Otto de la figura 20.6, calcule los cambios de entropía del gas en cada uno de los procesos a volumen constante $b \rightarrow c$ y $d \rightarrow a$ en términos de las temperaturas T_a , T_b , T_c y T_d , el número de

moles n y la capacidad calorífica C_V del gas. *b*) Calcule el cambio total de entropía en el motor durante un ciclo. (*Sugerencia:* use la relación entre T_a y T_b y entre T_d y T_c .) *c*) Los procesos $b \rightarrow c$ y $d \rightarrow a$ se efectúan irreversiblemente en un motor Otto real. Explique cómo puede conciliarse esto con el resultado del inciso *b*).

20.60. Diagrama TS . *a*) Dibuje una gráfica de un ciclo de Carnot, con la temperatura Kelvin en el eje vertical y la entropía en el horizontal. Esto es un diagrama de temperatura-entropía, o TS . *b*) Demuestre que el área bajo cualquier curva que representa un camino reversible en un diagrama TS representa el calor absorbido por el sistema. *c*) A partir de su diagrama deduzca la expresión para la eficiencia térmica de un ciclo de Carnot. *d*) Dibuje un diagrama TS para el ciclo Stirling, descrito en el problema 20.50. Use este diagrama para relacionar las eficiencias de los ciclos de Carnot y Stirling.

20.61. Un estudiante de física sumerge un extremo de una varilla de cobre en agua hirviendo a 100°C y el otro en una mezcla agua-hielo a 0°C . Los costados de la varilla están aislados. Una vez que la varilla alcanza condiciones de estado estable, 0.160 kg de hielo se derrite en cierto tiempo. Para este lapso, calcule *a*) el cambio de entropía del agua en ebullición; *b*) el cambio de entropía de la mezcla agua-hielo; *c*) el cambio de entropía de la varilla de cobre; *d*) el cambio total de entropía del sistema completo.

20.62. Imagine que para calentar una taza de agua (250 cm^3) y preparar café, coloca un elemento calentador eléctrico en la taza. Mientras la temperatura del agua aumenta de 20°C a 65°C , la temperatura del elemento calefactor permanece en 120°C . Calcule el cambio de entropía de *a*) el agua, *b*) el elemento calefactor, *c*) el sistema de agua y elemen-

to calefactor. (Use el mismo supuesto acerca del calor específico del agua que usamos en el ejemplo 20.10 (sección 20.7) y desprecie el calor que fluye a la taza en sí.) *d*) ¿Este proceso es reversible o irreversible? Explique.

20.63. Un objeto de masa m_1 , capacidad calorífica específica c_1 y temperatura T_1 se coloca en contacto con otro de masa m_2 , capacidad calorífica específica c_2 y temperatura $T_2 > T_1$. Como resultado, la temperatura del primer objeto aumenta a T y la del segundo baja a T' . *a*) Demuestre que el aumento de entropía del sistema es

$$\Delta S = m_1 c_1 \ln \frac{T}{T_1} + m_2 c_2 \ln \frac{T'}{T_2}$$

y que la conservación de la energía exige que

$$m_1 c_1 (T - T_1) = m_2 c_2 (T_2 - T')$$

b) Demuestre que el cambio de entropía ΔS , considerado como función de T , es *máximo* si $T = T'$, la condición de equilibrio termodinámico. *c*) Analice el resultado del inciso *b*) en términos de la idea de entropía como medida del desorden.

Problema de desafío

20.64. Considere un ciclo Diesel que inicia (punto *a* de la figura 20.7) con aire a una temperatura T_a . El aire puede tratarse como gas ideal. *a*) Si la temperatura en el punto *c* es T_c , deduzca una expresión para la eficiencia del ciclo en términos de la razón de compresión r . *b*) Calcule la eficiencia si $T_a = 300\text{ K}$, $T_c = 950\text{ K}$, $\gamma = 1.40$ y $r = 21.0$.

APÉNDICE A

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

El Système International d'Unités, SI, es el sistema desarrollado por la Conferencia General de Pesos y Medidas y adoptado por casi todas las naciones industriales del mundo. El siguiente material es una adaptación de B. N. Taylor, ed., National Institute of Standards and Technology Spec. Pub. 911 (U.S. Govt. Printing Office, Washington, DC, 1995). Véase también <http://physics.nist.gov/cuu>

Cantidad	Nombre de la unidad	Símbolo	
Unidades básicas del SI			
longitud	metro	m	
masa	kilogramo	kg	
tiempo	segundo	s	
corriente eléctrica	ampere	A	
temperatura termodinámica	kelvin	K	
cantidad de sustancia	mol	mol	
intensidad luminosa	candela	cd	
Unidades derivadas del SI			
			Unidades equivalentes
área	metro cuadrado	m ²	
volumen	metro cúbico	m ³	
frecuencia	hertz	Hz	s ⁻¹
densidad de masa (densidad)	kilogramo por metro cúbico	kg/m ³	
rapidez, velocidad	metro por segundo	m/s	
velocidad angular	radián por segundo	rad/s	
aceleración	metro por segundo cuadrado	m/s ²	
aceleración angular	radián por segundo cuadrado	rad/s ²	
fuerza	newton	N	kg · m/s ²
presión (esfuerzo mecánico)	pascal	Pa	N/m ²
viscosidad cinemática	metro cuadrado por segundo	m ² /s	
viscosidad dinámica	newton-segundo por metro cuadrado	N · s/m ²	
trabajo, energía, cantidad de calor	joule	J	N · m
potencia	watt	W	J/s
cantidad de electricidad	coulomb	C	A · s
diferencia de potencial, fuerza electromotriz	volt	V	J/C, W/A
intensidad de campo eléctrico	volt por metro	V/m	N/C
resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
capacitancia	farad	F	A · s/V
flujo magnético	weber	Wb	V · s
inductancia	henry	H	V · s/A
densidad de flujo magnético	tesla	T	Wb/m ²
intensidad de campo magnético	ampere por metro	A/m	
fuerza magnetomotriz	ampere	A	
flujo luminoso	lumen	lm	cd · sr
luminancia	candela por metro cuadrado	cd/m ²	
iluminancia	lux	lx	lm/m ²
número de onda	1 por metro	m ⁻¹	
entropía	joule por kelvin	J/K	
capacidad de calor específico	joule por kilogramo kelvin	J/kg · K	
conductividad térmica	watt por metro kelvin	W/m · K	

Cantidad	Nombre de la unidad	Símbolo	Unidades equivalentes
intensidad radiante	watt por esterradián	W/sr	
actividad (de una fuente radiactiva)	becquerel	Bq	s ⁻¹
dosis de radiación	gray	Gy	J/kg
dosis de radiación equivalente	sievert	Sv	J/kg
Unidades complementarias del SI			
ángulo plano	radián	rad	
ángulo sólido	esterradián	sr	

Definiciones de las unidades del SI

metro (m) El *metro* es la longitud igual a la distancia recorrida por la luz, en el vacío, en un tiempo de 1/299,792,458 segundos.

kilogramo (kg) El *kilogramo* es la unidad de masa; es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo (que es un cilindro particular de una aleación de platino-iridio que la Oficina Internacional de Pesas y Medidas conserva en una bóveda de seguridad en Sèvres, Francia).

segundo (s) El *segundo* es la duración de 9,192,631,770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.

ampere (A) El *ampere* es la corriente constante que, si se mantiene en dos conductores rectos y paralelos de longitud infinita, de sección transversal circular despreciable y separados por una distancia de 1 metro en el vacío, produciría entre ellos una fuerza igual a 2×10^{-7} newtons por metro de longitud.

kelvin (K) El *kelvin*, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción 1/273.16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua.

ohm (Ω) El *ohm* es la resistencia eléctrica entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia constante de potencial de 1 volt aplicada entre ellos, produce en el conductor una corriente de 1 ampere, sin que el conductor sea fuente de ninguna fuerza electromotriz.

coulomb (C) El *coulomb* es la cantidad de electricidad transportada en 1 segundo por una corriente de 1 ampere.

candela (cd) La *candela* es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} herztz y que tiene una intensidad radiante en esa dirección de 1/683 watts por esterradián.

mole (mol) El *mole* es la cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos de carbono hay en 0.012 kg de carbono 12. Las entidades elementales deben estar especificadas y pueden ser átomos, moléculas, iones, electrones, otras partículas, o grupos especificados de esas partículas.

newton (N) El *newton* es la fuerza que da a una masa de 1 kilogramo una aceleración de 1 metro por segundo por segundo.

joule (J) El *joule* es el trabajo realizado cuando el punto de aplicación de una fuerza constante de 1 newton se desplaza una distancia de 1 metro en la dirección de esa fuerza.

watt (W) El *watt* es la potencia que da lugar a la generación de energía a razón de 1 joule por segundo.

volt (V) El *volt* es la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un alambre conductor que transporta una corriente constante de 1 ampere, cuando la potencia disipada entre tales puntos es igual a 1 watt.

weber (Wb) El *weber* es el flujo magnético que, al cerrar un circuito de una vuelta, produce en éste una fuerza electromotriz de 1 volt conforme se reduce a cero a una tasa uniforme de 1 segundo.

lumen (lm) El *lumen* es el flujo luminoso emitido en un ángulo sólido de 1 esterradián por una fuente puntual uniforme que tiene una intensidad de 1 candela.

farad (F) El *farad* es la capacitancia de un capacitor entre cuyas placas hay una diferencia de potencial de 1 volt cuando tiene una carga de electricidad igual a 1 coulomb.

henry (H) El *henry* es la inductancia de un circuito cerrado en el que se produce una fuerza electromotriz de 1 volt cuando la corriente eléctrica en el circuito varía de manera uniforme a razón de 1 ampere por segundo.

radian (rad) El *radián* es el ángulo plano entre dos radios de un círculo que recorre en la circunferencia un arco igual a la longitud del radio.

esterradián (sr) El *esterradián* es el ángulo sólido que, cuando tiene su vértice en el centro de una esfera, recorre un área de la superficie de la esfera igual a la de un cuadrado cuyos lados tengan una longitud igual al radio de la esfera.

prefijos del SI Los nombres de los múltiplos y submúltiplos de unidades del SI se forman con la aplicación de los prefijos listados en el Apéndice F.

APÉNDICE B

RELACIONES MATEMÁTICAS ÚTILES

Álgebra

$$a^{-x} = \frac{1}{a^x} \quad a^{(x+y)} = a^x a^y \quad a^{(x-y)} = \frac{a^x}{a^y}$$

Logaritmos: Si $\log a = x$, entonces $a = 10^x$. $\log a + \log b = \log(ab)$ $\log a - \log b = \log(a/b)$ $\log(a^n) = n \log a$
Si $\ln a = x$, entonces $a = e^x$. $\ln a + \ln b = \ln(ab)$ $\ln a - \ln b = \ln(a/b)$ $\ln(a^n) = n \ln a$

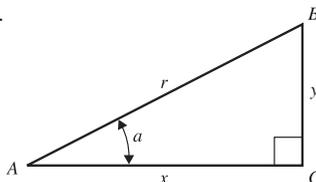
Fórmula cuadrática: If $ax^2 + bx + c = 0$, $x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.

Teorema del binomio

$$(a + b)^n = a^n + na^{n-1}b + \frac{n(n-1)a^{n-2}b^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)a^{n-3}b^3}{3!} + \dots$$

Trigonometría

En el triángulo rectángulo ABC , $x^2 + y^2 = r^2$.



Definiciones de las funciones trigonométricas: $\text{sen } a = y/r$ $\text{cos } a = x/r$ $\text{tan } a = y/x$

Identidades: $\text{sen}^2 a + \text{cos}^2 a = 1$

$$\text{tan } a = \frac{\text{sen } a}{\text{cos } a}$$

$$\text{sen } 2a = 2 \text{sen } a \text{cos } a$$

$$\text{cos } 2a = \text{cos}^2 a - \text{sen}^2 a = 2 \text{cos}^2 a - 1 = 1 - 2 \text{sen}^2 a$$

$$\text{sen} \frac{1}{2} a = \sqrt{\frac{1 - \text{cos } a}{2}}$$

$$\text{cos} \frac{1}{2} a = \sqrt{\frac{1 + \text{cos } a}{2}}$$

$$\text{sen}(-a) = -\text{sen } a$$

$$\text{sen}(a \pm b) = \text{sen } a \text{cos } b \pm \text{cos } a \text{sen } b$$

$$\text{cos}(-a) = \text{cos } a$$

$$\text{cos}(a \pm b) = \text{cos } a \text{cos } b \mp \text{sen } a \text{sen } b$$

$$\text{sen}(a \pm \pi/2) = \pm \text{cos } a$$

$$\text{sen } a + \text{sen } b = 2 \text{sen} \frac{1}{2}(a + b) \text{cos} \frac{1}{2}(a - b)$$

$$\text{cos}(a \pm \pi/2) = \mp \text{sen } a$$

$$\text{cos } a + \text{cos } b = 2 \text{cos} \frac{1}{2}(a + b) \text{cos} \frac{1}{2}(a - b)$$

Geometría

Circunferencia de un círculo de radio r :

$$C = 2\pi r$$

Área de un círculo de radio r :

$$A = \pi r^2$$

Volumen de una esfera de radio r :

$$V = 4\pi r^3/3$$

Área de la superficie de una esfera de radio r :

$$A = 4\pi r^2$$

Volumen de un cilindro de radio r y altura h :

$$V = \pi r^2 h$$

Cálculo

Derivadas:

$$\frac{d}{dx}x^n = nx^{n-1}$$

$$\frac{d}{dx}\text{sen } ax = a \text{sen } ax$$

$$\frac{d}{dx}\text{cos } ax = -a \text{sen } ax$$

$$\frac{d}{dx}e^{ax} = ae^{ax}$$

$$\frac{d}{dx}\ln ax = \frac{1}{x}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{a^2 - x^2}} = \arcsen \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \ln(x + \sqrt{x^2 + a^2})$$

$$\int \frac{dx}{x^2 + a^2} = \frac{1}{a} \arctan \frac{x}{a}$$

$$\int \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{1}{a^2} \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

$$\int \frac{x dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

Series de potencias (convergentes para el intervalo de x que se indica):

$$(1 + x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}x^3 + \dots \quad (|x| < 1)$$

Integrales:

$$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} \quad (n \neq -1)$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x$$

$$\int \text{sen } ax dx = -\frac{1}{a} \text{cos } ax$$

$$\int \text{cos } ax dx = \frac{1}{a}$$

$$\int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax}$$

$$\text{sen } x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \dots \quad (\text{para toda } x)$$

$$\text{cos } x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \dots \quad (\text{para toda } x)$$

$$\tan x = x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \frac{17x^7}{315} + \dots \quad (|x| < \pi/2)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (\text{para toda } x)$$

$$\ln(1 + x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots \quad (|x| < 1)$$

APÉNDICE C

EL ALFABETO GRIEGO

Nombre	Mayúscula	Minúscula	Nombre	Mayúscula	Minúscula
Alfa	A	α	Ny	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Ómicron	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Épsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Dzeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Ypsilon	Y	υ
Iota	I	ι	Fi	Φ	ϕ
Kappa	K	κ	Ji	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
My	M	μ	Omega	Ω	ω

APÉNDICE D

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

Grupo 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18
Periodo

1																	2	
1	H 1.008																	He 4.003
2	Li 6.941	Be 9.012											B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.180
3	Na 22.990	Mg 24.305											Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.065	Cl 35.453	Ar 39.948
4	K 39.098	Ca 40.078	Sc 44.956	Ti 47.867	V 50.942	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.845	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.409	Ga 69.723	Ge 72.64	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.798
5	Rb 85.468	Sr 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.94	Tc (98)	Ru 101.07	Rh 102.906	Pd 106.42	Ag 107.868	Cd 112.411	In 114.818	Sn 118.710	Sb 121.760	Te 127.60	I 126.904	Xe 131.293
6	Cs 132.905	Ba 137.327	Lu 174.967	Hf 178.49	Ta 180.948	W 183.84	Re 186.207	Os 190.23	Ir 192.217	Pt 195.078	Au 196.967	Hg 200.59	Tl 204.383	Pb 207.2	Bi 208.980	Po (209)	At (210)	Rn (222)
7	Fr (223)	Ra (226)	Lr (262)	Rf (261)	Db (262)	Sg (266)	Bh (264)	Hs (269)	Mt (268)	Ds (271)	Rg (272)	Uub (285)	Uut (284)	Uuq (289)	Uup (288)	Uuh (292)	Uus (291)	Uuo (293)

Lantánidos	57 La 138.905	58 Ce 140.116	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.964	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.500	67 Ho 164.930	68 Er 167.259	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actínidos	89 Ac (227)	90 Th (232)	91 Pa (231)	92 U (238)	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)

Para cada elemento, se indica la masa atómica de la mezcla de isótopos que ocurre en la naturaleza. Para los elementos que no tienen isótopo estable, la masa atómica aproximada del isótopo de vida más larga se indica entre paréntesis. Para los elementos cuya existencia se ha predicho pero aún no han sido detectados, no se da la masa atómica. Todas las masas atómicas están expresadas en unidades de masa atómica ($1 \text{ u} = 1.66053886(28) \times 10^{-27} \text{ kg}$), equivalente a gramos por mol (g/mol).

APÉNDICE E

FACTORES DE CONVERSIÓN DE UNIDADES

Longitud

1 m = 100 cm = 1000 mm = $10^6 \mu\text{m}$ = 10^9nm
1 km = 1000 m = 0.6214 mi
1 m = 3.281 ft = 39.37 in
1 cm = 0.3937 in
1 in. = 2.540 cm
1 ft = 30.48 cm
1 yd = 91.44 cm
1 mi = 5280 ft = 1.609 km
1 Å = 10^{-10}m = 10^{-8}cm = 10^{-1}nm
1 milla náutica = 6080 ft
1 año luz = $9.461 \times 10^{15} \text{m}$

Área

1 cm² = 0.155 in²
1 m² = 10^4cm^2 = 10.76 ft²
1 in² = 6.452 cm²
1 ft = 144 in² = 0.0929 m²

Volumen

1 litro = 1000 cm³ = 10^{-3}m^3 = 0.03531 ft³ = 61.02 in³
1 ft³ = 0.02832 m³ = 28.32 litros = 7.477 galones
1 galón = 3.788 litros

Tiempo

1 min = 60 s
1 h = 3600 s
1 día = 86,400 s
1 año = 365.24 d = $3.156 \times 10^7 \text{s}$

Ángulo

1 rad = 57.30° = $180^\circ/\pi$
1° = 0.01745 rad = $\pi/180$ rad
1 revolución = 360° = 2π rad
1 rev/min (rpm) = 0.1047 rad/s

Rapidez

1 m/s = 3.281 ft/s
1 ft/s = 0.3048 m/s
1 mi/min = 60 mi/h = 88 ft/s
1 km/h = 0.2778 m/s = 0.6214 mi/h
1 mi/h = 1.466 ft/s = 0.4470 m/s = 1.609 km/h
1 furlong/14 días = $1.662 \times 10^{-4} \text{m/s}$

Aceleración

1 m/s² = 100 cm/s² = 3.281 ft/s²
1 cm/s² = 0.01 m/s² = 0.03281 ft/s²
1 ft/s² = 0.3048 m/s² = 30.48 cm/s²
1 mi/h · s = 1.467 ft/s²

Masa

1 kg = 10^3g = 0.0685 slug
1 g = $6.85 \times 10^{-5} \text{slug}$
1 slug = 14.59 kg
1 u = $1.661 \times 10^{-27} \text{kg}$
1 kg tiene un peso de 2.205 lb cuando $g = 9.80 \text{m/s}^2$

Fuerza

1 N = 10^5dinas = 0.2248 lb
1 lb = 4.448 N = $4.448 \times 10^5 \text{dinas}$

Presión

1 Pa = 1 N/m² = $1.450 \times 10^{-4} \text{lb/in}^2$ = 0.209 lb/ft²
1 bar = 10^5Pa
1 lb/in² = 6895 Pa
1 lb/ft² = 47.88 Pa
1 atm = $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ = 1.013 bar
= 14.7 lb/in² = 2117 lb/ft²
1 mm Hg = 1 torr = 133.3 Pa

Energía

1 J = 10^7ergs = 0.239 cal
1 cal = 4.186 J (basada en caloría de 15°)
1 ft · lb = 1.356 J
1 Btu = 1055 J = 252 cal = 778 ft · lb
1 eV = $1.602 \times 10^{-19} \text{J}$
1 kWh = $3.600 \times 10^6 \text{J}$

Equivalencia masa-energía

1 kg ↔ $8.988 \times 10^{16} \text{J}$
1 u ↔ 931.5 MeV
1 eV ↔ $1.074 \times 10^{-9} \text{u}$

Potencia

1 W = 1 J/s
1 hp = 746 W = 550 ft · lb/s
1 Btu/h = 0.293 W

APÉNDICE F

CONSTANTES NUMÉRICAS

Constantes físicas fundamentales*

Nombre	Símbolo	Valor
Rapidez de la luz	c	2.99792458×10^8 m/s
Magnitud de la carga eléctrica de un electrón	e	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ C
Constante gravitacional	G	$6.6742(10) \times 10^{-11}$ N · m ² /kg ²
Constante de Planck	h	$6.6260693(11) \times 10^{-34}$ J · s
Constante de Boltzmann	k	$1.3806505(24) \times 10^{-23}$ J/K
Número de Avogadro	N_A	$6.0221415(10) \times 10^{23}$ moléculas/mol
Constante de los gases	R	8.314472(15) J/mol · K
Masa del electrón	m_e	$9.1093826(16) \times 10^{-31}$ kg
Masa del protón	m_p	$1.67262171(29) \times 10^{-27}$ kg
Masa del neutrón	m_n	$1.67492728(29) \times 10^{-27}$ kg
Permeabilidad del espacio libre	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A · m
Permitividad del espacio libre	$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$	$8.854187817 \dots \times 10^{-12}$ C ² /N · m ²
	$1/4\pi\epsilon_0$	$8.987551787 \dots \times 10^9$ N · m ² /C ²

Otras constantes útiles*

Equivalente mecánico del calor		4.186 J/cal (caloría 15°)
Presión atmosférica estándar	1 atm	1.01325×10^5 Pa
Cero absoluto	0 K	-273.15°C
Electrón volt	1 eV	$1.60217653(14) \times 10^{-19}$ J
Unidad de masa atómica	1 u	$1.66053886(28) \times 10^{-27}$ kg
Energía del electrón en reposo	$m_e c^2$	0.510998918(44) MeV
Volumen del gas ideal (0 °C y 1 atm)		22.413996(39) litro/mol
Aceleración debida a la gravedad (estándar)	g	9.80665 m/s ²

*Fuente: National Institute of Standards and Technology (<http://physics.nist.gov/cuu>). Los números entre paréntesis indican la incertidumbre en los dígitos finales del número principal; por ejemplo, el número 1.6454(21) significa 1.6454 ± 0.0021 . Los valores sin incertidumbre son exactos.

Datos astronómicos†

Cuerpo	Masa (kg)	Radio (m)	Radio de la órbita (m)	Periodo de la órbita
Sol	1.99×10^{30}	6.96×10^8	—	—
Luna	7.35×10^{22}	1.74×10^6	3.84×10^8	27.3 d
Mercurio	3.30×10^{23}	2.44×10^6	5.79×10^{10}	88.0 d
Venus	4.87×10^{24}	6.05×10^6	1.08×10^{11}	224.7 d
Tierra	5.97×10^{24}	6.38×10^6	1.50×10^{11}	365.3 d
Marte	6.42×10^{23}	3.40×10^6	2.28×10^{11}	687.0 d
Júpiter	1.90×10^{27}	6.91×10^7	7.78×10^{11}	11.86 y
Saturno	5.68×10^{26}	6.03×10^7	1.43×10^{12}	29.45 y
Urano	8.68×10^{25}	2.56×10^7	2.87×10^{12}	84.02 y
Neptuno	1.02×10^{26}	2.48×10^7	4.50×10^{12}	164.8 y
Plutón‡	1.31×10^{22}	1.15×10^6	5.91×10^{12}	247.9 y

†Fuente: NASA Jet Propulsion Laboratory Solar System Dynamics Group (<http://ssd.jpl.nasa.gov>) y P. Kenneth Seidelmann, ed., *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac* (University Science Books, Mill Valley, CA, 1992), pp. 704-706. Para cada cuerpo, el “radio es el radio en su ecuador, y el “radio de la órbita” es su distancia promedio desde el Sol (para los planetas) o desde la Tierra (para la Luna).

‡En agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional reclasificó a Plutón y otros objetos pequeños que giran en órbita alrededor del Sol como “planetas enanos”.

Prefijos para potencias de 10

Potencia de 10	Prefijo	Abreviatura
10^{-24}	yocto-	y
10^{-21}	zepto-	z
10^{-18}	atto-	a
10^{-15}	femto-	f
10^{-12}	pico-	p
10^{-9}	nano-	n
10^{-6}	micro-	μ
10^{-3}	mili-	m
10^{-2}	centi-	c
10^3	kilo-	k
10^6	mega-	M
10^9	giga-	G
10^{12}	tera-	T
10^{15}	peta-	P
10^{18}	exa-	E
10^{21}	zetta-	Z
10^{24}	yotta-	Y

Ejemplos:

1 femtómetro = 1 fm = 10^{-15} m

1 picosegundo = 1 ps = 10^{-12} s

1 nanocoulomb = 1 nC = 10^{-9} C

1 microkelvin = 1 μ K = 10^{-6} K

1 millivolt = 1 mV = 10^{-3} V

1 kilopascal = 1 kPa = 10^3 Pa

1 megawatt = 1 MW = 10^6 W

1 gigahertz = 1 GHz = 10^9 Hz

RESPUESTAS A LOS PROBLEMAS CON NÚMERO IMPAR

Capítulo 1

- 1.1 a) 1.61 km b) 3.28×10^3 ft
 1.3 1.02 ns
 1.5 5.36 L
 1.7 31.7 y
 1.9 a) 23.4 km/L b) 1.42 tanques
 1.11 9.0 cm
 1.13 a) $1.1 \times 10^{-3}\%$ b) no
 1.15 a) 0.1% b) 0.008% c) 0.03%
 1.17 a) $2.8 \pm 0.3 \text{ cm}^3$ b) 170 ± 20
 1.19 a) no b) no c) no d) no e) no
 1.21 10^6
 1.23 10^9
 1.25 \$70 millones
 1.29 59×10^{10} ; aproximadamente 53×10^6
 1.31 7.8 km, 38° al norte del este
 1.33 144 m, 41° al sur del oeste
 1.35 $A_x = 0$, $A_y = -8.00$ m; $B_x = 7.50$ m, $B_y = 13.0$ m; $C_x = -10.9$ m, $C_y = -5.07$ m; $D_x = -7.99$ m, $D_y = 6.02$ m
 1.37 1190 N; 13.4° en dirección arriba y adelante
 1.39 a) 9.01 m, 33.7° b) 9.01 m, 33.7°
 c) 22.3 m, 250.3° d) 22.3 m, 70.3°
 1.41 5.06 km, 20.2° al norte del oeste
 1.43 a) 2.48 cm, 18.3° b) 4.10 cm, 83.7°
 c) 4.10 cm, 263.7°
 1.45 781 N , 166°
 1.47 $\vec{A} = -(8.00 \text{ m})\hat{j}$; $\vec{B} = (7.50 \text{ m})\hat{i} + (13.0 \text{ m})\hat{j}$;
 $\vec{C} = -(10.9 \text{ m})\hat{i} + (-5.07 \text{ m})\hat{j}$;
 $\vec{D} = (-7.99 \text{ m})\hat{i} + (6.02 \text{ m})\hat{j}$
 1.49 a) $\vec{A} = (1.23 \text{ m})\hat{i} + (3.38 \text{ m})\hat{j}$;
 $\vec{B} = (-2.08 \text{ m})\hat{i} + (-1.20 \text{ m})\hat{j}$
 b) $\vec{C} = (12.01 \text{ m})\hat{i} + (14.94 \text{ m})\hat{j}$
 c) 19.17 m; 51.2°
 1.51 a) no b) no; sí c) ± 0.20
 1.53 a) -104 m^2 b) -148 m^2 c) 40.6 m^2
 1.55 a) 165° b) 28° c) 90°
 1.57 a) 63.9 m^2 ; $-\hat{k}$ b) 63.9 m^2 ; $+\hat{k}$
 1.59 a) 4.61 cm^2 ; $-z$ b) 4.61 cm^2 ; $+z$
 1.61 a) $1.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ b) 2.6 radios terrestres
 1.63 10^{28}
 1.65 a) 2.94 cm b) 1.82 cm
 1.67 a) 10^{50} b) 10^{57} c) 10^{79}
 1.69 149 N; 32.2° al norte del este
 1.71 a) $A_x = 3.03$ cm, $A_y = 8.10$ cm c) 8.65 cm;
 a 69.5° del eje $+x$ hacia el eje $+y$
 1.73 144 m, 41° al sur del oeste
 1.75 a) 46 N, 139°
 1.77 a) (87, 258) b) 136 pixeles, 25° abajo en línea recta hacia la izquierda
 1.79 380 km, 28.8° al sur del este
 1.81 160 N, 13° abajo de la horizontal
 1.83 a) 911 m; 8.9° al oeste del sur
 1.87 b) 90°
 1.89 a) $A = 5.39$, $B = 4.36$
 b) $-5.00\hat{i} + 2.00\hat{j} + 7.00\hat{k}$ c) 8.83; sí
 1.93 a) 54.7° b) 35.3°
 1.95 $C_x = 8.0$, $C_y = 6.1$
 1.97 b) 72.2
 1.99 38.5 yd, 24.6° a la derecha del campo
 1.101 a) 76 ly b) 129°

Capítulo 2

- 2.1 a) 197 m/s b) 169 m/s
 2.3 1 h 10 min
 2.5 a) 17.1 s b) más rápido: 106 m; más lento: 94 m
 2.7 250 km
 2.9 a) 12.0 m/s b) 0 m/s, 15.0 m/s, 12.0 m/s
 c) 13.3 s
 2.11 a) 2.3 m/s, 2.3 m/s b) 2.3 m/s, 0.33 m/s
 2.13 a) no b) (i) 12.8 m/s² (ii) 3.5 m/s²
 (iii) 0.72 m/s²; sí
 2.15 a) 2.00 cm/s, 50.0 cm, -0.125 cm/s^2
 b) 16.0 s c) 32.0 s d) 6.20 s, 1.22 cm/s;
 25.8 s, -1.22 cm/s ; 36.4 s, -2.55 cm/s

- 2.17 a) 3 m/s² b) 10 m/s² c) depende de la dirección de la coordenada positiva
 2.21 a) 5.0 m/s b) 1.43 m/s²
 2.23 a) 675 m/s² b) 0.067 s
 2.25 1.70 m
 2.27 a) (i) 5.59 m/s² (ii) 7.74 m/s²
 b) (i) 179 m (ii) 12,800 m
 2.29 a) $+2.7 \text{ cm/s}$, -1.3 cm/s b) -1.3 cm/s^2
 c) 22.5 cm; 25.5 cm
 2.31 a) 0, 6.3 m/s², -11.2 m/s^2
 b) 100 m, 230 m, 320 m
 2.33 a) $1.80 \times 10^3 \text{ m/s}$ b) 0.957
 c) 6 h 11 min
 2.35 b) 1 s, 3 s d) 2 s e) 3 s f) 1 s
 2.37 a) A: 20.5 m/s²; B: 3.8 m/s²; C: 53 m/s²
 b) 721 km
 2.39 a) 2.94 m/s b) 0.599 s
 2.41 a) $t = \sqrt{2d/g}$ b) 0.190 s
 2.43 a) 646 m b) 16.4 s, 112 m/s
 2.45 a) 25.6 m/s b) 31.6 m c) 15.2 m/s
 2.47 a) 249 m/s² b) 25.4 c) 101 m d) no
 2.49 0.0868 m/s²
 2.51 a) $x(t) = (0.250 \text{ m/s}^3)t^3 - (0.0100 \text{ m/s}^4)t^4$;
 $v_x(t) = (0.750 \text{ m/s}^3)t^2 - (0.0400 \text{ m/s}^4)t^3$
 b) 39.1 m/s
 2.53 a) 30.0 cm/s
 2.55 b) 0.627 s, 1.60 s c) negativa en 0.627 s,
 positiva en 1.60 s d) 1.11 s e) 2.45 m
 f) 2.00 s, 0 s
 2.57 a) 82 km/h b) 31 km/h
 2.59 a) 3.5 m/s² b) 0 c) 1.5 m/s²
 2.61 a) 92.0 m b) 92.0 m
 2.63 a) 464 m/s b) $2.99 \times 10^4 \text{ m/s}$ c) 7.48
 2.65 50.0 m
 2.67 4.6 m/s²
 2.69 a) 6.17 s b) 24.8 m
 c) $v_{\text{carril}} = 13.0 \text{ m/s}$, $v_{\text{auto}} = 21.0 \text{ m/s}$
 2.71 a) 7.85 cm/s b) 5.00 cm/s, horizontal de la posición inicial a la posición final
 2.73 a) 15.9 s b) 393 m c) 29.5 m/s
 2.75 a) -4.00 m/s b) 12.0 m/s
 2.77 a) 2.64H b) 2.64T
 2.79 a) no b) sí; 14.4 m/s; no es físicamente alcanzable
 2.81 a) $6.79 \times 10^4 \text{ g}$ b) 1.45 m/s c) H/4
 2.83 a) 7.59 m/s b) 5.14 m c) 1.60 s
 2.85 a) 7.7 m/s b) 0.78 s c) 0.59 s d) 1.3 m
 2.87 270 m
 2.89 a) 20.5 m/s b) sí
 2.91 a) 947 m b) 393 m
 2.93 a) A b) 2.27 s, 5.73 s c) 1.00 s, 4.33 s
 d) 2.67 s
 2.95 a) 9.55 s, 47.8 m b) 1.62 m/s d) 8.38 m/s
 e) no f) 3.69 m/s, 21.7 s, 80.0 m
 2.97 a) 8.18 m/s b) (i) 0.411 m (ii) 1.15 km
 c) 9.80 m/s d) 4.90 m/s

Capítulo 3

- 3.1 a) $v_{\text{med-}x} = 1.4 \text{ m/s}$, $v_{\text{med-}y} = -1.3 \text{ m/s}$
 b) 1.9 m/s, -43°
 3.3 a) 7.1 cm/s, 45° b) 5.0 cm/s, 90° ; 7.1 cm/s;
 45° ; 11 cm/s, 27°
 3.5 b) $a_{\text{med-}x} = -8.67 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{med-}y} = -2.33 \text{ m/s}^2$
 c) 8.98 m/s², 195°
 3.7 $\vec{v} = a\hat{i} + (-2t)\hat{j}$; $\vec{a} = -2\hat{j}$
 c) $v = 5.4 \text{ m/s}$, -63° ; $a = 2.4 \text{ m/s}^2$, -90°
 d) acelerando y dando vuelta a la derecha
 3.9 a) 0.600 m b) 0.385 m c) $v_x = 1.10 \text{ m/s}$,
 $v_y = -3.43 \text{ m/s}$; $v = 3.60 \text{ m/s}$, 72.2° debajo
 de la horizontal
 3.11 3.32 m
 3.13 a) 30.6 m/s b) 36.3 m/s
 3.15 1.29 m/s²
 3.17 a) 40.0 m/s, 69.3 m/s b) 7.07 s c) 245 m
 d) 565 m e) $a_x = 0$, $a_y = -9.80 \text{ m/s}^2$;
 $v_x = 40.0 \text{ m/s}$, $v_y = 0$

- 3.19 a) 0.682 s, 2.99 s b) 24.0 m/s, 11.3 m/s;
 24.0 m/s, -11.3 m/s c) 30.0 m/s, -36.9°
 3.21 a) 1.5 m b) -0.89 m/s
 3.23 a) 13.6 m b) 34.6 m/s c) 103 m
 3.25 a) 296 m b) 176 m c) 198 m
 (i) horizontal: 15 m/s; vertical: 58.8 m/s
 (ii) horizontal: 15 m/s; vertical: 78.8 m/s
 3.27 795 m
 3.29 a) 0.034 m/s², 0.0034g b) 1.4 h
 3.31 a) 3.07 s b) 1.68 s
 3.33 a) 3.50 m/s², hacia arriba b) 3.50 m/s², hacia
 abajo c) 12.6 s
 3.35 a) 32.9 m/s b) 27.7 m/s² c) 35.5 rpm
 3.37 a) 14 s b) 70 s
 3.39 0.36 m/s, 38° al oeste del sur
 3.41 a) 4.7 m/s, 25° al sur del este b) 190 s
 c) 380 m
 3.43 b) -7.1 m/s , -42 m/s c) 43 m/s, 9.5° al
 oeste del sur
 3.45 a) $A = 0$, $B = 2.00 \text{ m/s}^2$, $C = 50.0 \text{ m}$,
 $D = 0.50 \text{ m/s}^3$ b) $\vec{a} = (4.00 \text{ m/s}^2)\hat{i}$, $v = 0$
 c) $v_x = 40.0 \text{ m/s}$, $v_y = 150 \text{ m/s}$, $v = 155 \text{ m/s}$
 d) $\vec{F} = (200 \text{ m})\hat{i} + (550 \text{ m})\hat{j}$
 3.47 a) 124 m b) 280 m
 3.49 22 m/s
 3.51 40 m/s
 3.53 274 m
 3.55 a) 42.8 m/s b) 42.0 m
 3.57 a) $\sqrt{2gh}$ b) 30.0° c) 6.93h
 3.59 c) menor de 45°
 3.61 b) 15° , 75°
 3.63 a) 17.8 m/s b) en el río, a 28.4 m de la ribera
 cercana
 3.65 a) 81.6 m b) en el carro c) 245 m d) 53.1°
 3.67 a) 49 m/s b) 50 m
 3.69 a) 2000 m b) 2180 m
 3.71 a) 38.5 m/s b) (i) 25.0 m/s, 0
 (ii) 25.0 m/s, 38.5 m/s c) (i) 0°
 (ii) 57.0° d) 499 m
 3.73 $\pm 25.4^\circ$
 3.77 b) $v_x = R\omega(1 - \cos\omega t)$, $v_y = R\omega\sin\omega t$,
 $a_x = R\omega^2\sin\omega t$, $a_y = R\omega^2\cos\omega t$ c) $t = 0$,
 $2\pi/\omega$, $4\pi/\omega$, ...; $x = 0$, $2\pi R$, $4\pi R$, ...;
 $y = 0$; $a = R\omega^2$ en la dirección $+y$ d) no
 3.79 a) 2.50g b) 0.614n
 3.81 a) 44.7 km/h, 26.6° al oeste del sur
 b) 10.5° al norte del oeste
 3.83 a) 0.659 s b) (i) 9.10 m/s (ii) 6.46 m/s
 c) 3.00 m, 2.13 m
 3.85 7.39 m/s, 12.4° al norte del este
 3.87 a) 80 m b) 1.6×10^{-3} c) el efecto general
 es reducir el radio
 3.89 a) $\left(\frac{2v_0^2}{g}\right) [\tan(\theta + \phi) - \tan\theta] \frac{\cos^2(\theta + \phi)}{\cos\theta}$
 b) $\frac{\pi - \theta}{4} - \frac{\theta}{2}$
 3.91 $\Delta t = 0.5$ s; 9.589 m/s², 118.6° ; $\Delta t = 0.1$ s;
 9.983 m/s², 95.73° ; $\Delta t = 0.05$ s; 9.996 m/s²,
 92.86°
 3.93 a) 1.5 km/h b) 3.5 km/h

Capítulo 4

- 4.1 a) 0° b) 90° c) 180°
 4.3 7.1 N a la derecha, 7.1 N hacia abajo
 4.5 494 N, 31.7°
 4.7 2.2 m/s²
 4.9 16.0 kg
 4.11 a) 3.13 m, 3.13 m/s b) 21.9 m, 6.25 m/s
 4.13 a) 45.0 N; $t = 2$ s a 4 s b) 2 s a 4 s
 c) 0, 6 s
 4.15 a) $A = 100 \text{ N}$, $B = 12.5 \text{ N/s}^2$ b) (i) 21.6 N,
 2.70 m/s² (ii) 134 N, 16.8 m/s²
 c) 26.6 m/s²
 4.17 $2.94 \times 10^3 \text{ N}$
 4.19 a) 4.49 kg b) 4.49 kg, 8.13 N
 4.21 825 N, los bloques

A-10 Respuestas a los problemas con número impar

- 4.23 a) la gravedad que ejerce la Tierra sobre la botella; la fuerza del aire sobre la botella
 b) la gravedad que ejerce la botella sobre la Tierra; la fuerza de la botella sobre el aire
 4.25 $7.4 \times 10^{-23} \text{ m/s}^2$
 4.27 b) sí
 4.29 sí, en el inciso a)
 4.31 b) 142 N
 4.33 c) la fuerza que ejerce la tierra sobre el camión
 4.35 1840 N, 135°
 4.37 a) 17 N , 90° en sentido horario a partir de la dirección $+x$ b) 840 N
 4.39 a) 4.8 m/s b) 16 m/s^2 c) 2360 N
 4.41 b) 5.83 m/s^2
 4.43 a) 2.50 m/s^2 b) 10.0 N c) a la derecha; F
 d) 25.0 N
 4.45 a) 2.93 m/s^2 b) 11.1 m/s^2
 4.47 b) 79.6 N
 4.49 a) mg b) mg c) $m(g + |\vec{a}|)$
 d) $m(g - |\vec{a}|)$
 4.51 a) 7.80 m/s b) 50.6 m/s^2
 c) 4532 N , 6.16 mg
 4.53 a) w b) 0 c) $w/2$
 4.55 b) 1390 N
 4.57 b) (i) 3.5 m/s^2 (ii) 8.0 N
 4.59 $-6mBt$

Capítulo 5

- 5.1 a) 25.0 N b) 50.0 N
 5.3 a) 990 N, 735 N b) 926 N
 5.5 48°
 5.7 $4.10 \times 10^3 \text{ N}$
 5.9 a) $A: 0.732w$; $B: 0.897w$; $C: w$ b) $A: 2.73w$;
 $B: 3.35w$; $C: w$
 5.11 a) 337 N b) 343 N
 5.13 a) 470 N b) 163 N
 5.15 b) 1.22 mg c) 0.70 mg
 5.17 a) 4610 m/s^2 , 470 g b) $9.70 \times 10^5 \text{ N}$, 471 w
 c) 18.7 ms
 5.19 b) 2.96 m/s^2 c) 191 N; más que los ladrillos; menos que el contrapeso
 5.21 b) 2.50 m/s^2 c) 1.37 kg d) $T = 0.745 \text{ w}$
 5.23 a) 0.832 m/s^2 b) 17.3 s
 5.25 1.38°
 5.29 a) 22 N b) 3.1 m
 5.31 a) 0.710, 0.472 b) 258 N c) (i) 51.8 N
 (ii) 4.97 m/s^2
 5.33 a) 57.1 N b) 146 N, hacia arriba de la rampa
 5.35 11 veces más lejos
 5.37 a) $\mu_k(m_A + m_B)g$ b) $\mu_k m_A g$
 5.39 3.82 m/s^2
 5.41 a) 0.218 m/s b) 11.7 N
 5.43 a) $\mu_k mg / (\cos\theta - \mu_k \sin\theta)$ b) $1/\tan\theta = \mu_s$
 5.45 b) 8.75 N c) 30.8 N d) 1.54 m/s^2
 5.47 a) 0.44 kg/m b) 42 m/s
 5.49 a) 3.61 m/s b) en la parte inferior c) 3.33 m/s
 5.51 a) 21.0° ; no b) automóvil: $1.18 \times 10^4 \text{ N}$;
 camión: $2.36 \times 10^4 \text{ N}$
 5.53 el cable superior: 1410 N; el cable horizontal:
 8360 N
 5.55 a) 1.49 rev/min b) 0.918 rev/min
 5.57 a) 138 km/h b) 3580 N
 5.59 2.43 m/s
 5.61 a) la cuerda que forma un ángulo de 60°
 b) 6400 N
 5.63 a) $Mg/(2\sin\theta)$ b) $Mg/(2\tan\theta)$ c) $T \rightarrow \infty$
 5.65 a) $m_1(\sin\alpha + \mu_k \cos\alpha)$
 b) $m_1(\sin\alpha - \mu_k \cos\alpha)$
 c) $m_1(\sin\alpha - \mu_k \cos\alpha) < m_2 <$
 $m_1(\sin\alpha + \mu_k \cos\alpha)$
 5.67 a) 1.44 N b) 1.80 N
 5.69 a) $1.3 \times 10^{-4} \text{ N}$; 62.5 w b) $2.9 \times 10^{-4} \text{ N}$ a
 1.2 ms c) 1.2 m/s
 5.71 1040 N
 5.73 a) 11 m/s b) 7.5 m/s
 5.75 0.40
 5.77 a) $g \left(\frac{m_B + m_{\text{cuerda}} d/L}{m_A + m_B + m_{\text{cuerda}}} \right)$; aumenta
 b) 0.63 m
 c) no funcionará para ningún valor de d
 5.79 a) 66 N, hacia el norte b) 59 N, hacia el sur
 5.81 a) 294 N, 152 N, 152 N b) 40.0 N

- 5.83 2.52 N
 5.85 a) 12.9 kg b) 47.2 N en la cuerda de la izquierda, 101 N en la cuerda de la derecha
 5.87 $a_1 = 2m_2g/(4m_1 + m_2)$;
 $a_2 = m_2g/(4m_1 + m_2)$
 5.89 1.46 m por encima del piso
 5.91 g/μ_s
 5.93 b) 0.450
 5.95 0.34
 5.97 a) 170 m b) 18 m/s, 41 mi/h
 c) 25 m/s, 56 mi/h
 5.99 a) se mueven hacia arriba b) permanece constante c) permanece constante d) se detienen
 5.101 a) 6.00 m/s^2 b) 3.80 m/s^2 c) 7.36 m/s
 d) 8.18 m/s e) 7.78 m , 6.29 m/s , 1.38 m/s^2
 f) 3.14 s
 5.103 $1/3$
 5.105 a) $v_x(t) = v_i + (v_0 - v_i)e^{-kt/m}$
 b) $v_x(t) = v_i(\sin\beta - 0.015 \cos\beta)^{1/2}$
 5.107 a) 0.015; $0.36 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$ b) 29 m/s
 c) la razón es $(\sin\beta - 0.015 \cos\beta)^{1/2}$
 5.109 a) 120 N b) 3.79 m/s
 5.111 b) 0.28 c) no
 5.113 a) a la derecha b) 120 m
 5.115 a) 81.1° b) no c) la cuenta recorrerá la parte inferior del aro ($\beta = 0$)
 5.119 $T_{\text{máx}} = 2\pi \sqrt{\frac{h \tan\beta}{g} \left(\frac{\sin\beta + \mu_s \cos\beta}{\cos\beta - \mu_s \sin\beta} \right)}$;
 $T_{\text{mín}} = 2\pi \sqrt{\frac{h \tan\beta}{g} \left(\frac{\sin\beta - \mu_s \cos\beta}{\cos\beta + \mu_s \sin\beta} \right)}$
 5.121 $(M + m)g \tan\alpha$
 5.123 a) $F = \frac{\mu_k w}{\cos\theta + \mu_k \sin\theta}$
 c) $\theta = \tan^{-1}(\mu_k) = 14.0^\circ$
 5.125 a) $a_3 = g \left(\frac{-4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1} \right)$
 b) $a_B = -a_3$
 c) $a_1 = g \left(\frac{4m_1 m_2 - 3m_2 m_3 + m_3 m_1}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1} \right)$
 d) $a_2 = g \left(\frac{4m_1 m_2 + m_2 m_3 - 3m_3 m_1}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1} \right)$
 e) $T_A = \frac{1}{2} T_C$
 f) $T_C = \frac{8gm_1 m_2 m_3}{4m_1 m_2 + m_2 m_3 + m_3 m_1}$
 g) $a_1 = a_2 = a_3 = a_B = 0$, $T_C = 2m_2 g$,
 $T_A = m_2 g$; sí
 5.127 $\cos^2 \beta$

Capítulo 6

- 6.1 a) 3.60 J b) -0.900 J c) 2.07 J
 6.3 a) 74 N b) 330 J c) -330 J d) cero; cero
 e) cero
 6.5 a) -1750 J b) no
 6.7 a) (i) 9.00 J (ii) -9.00 J b) (i) 0
 (ii) 9.00 J (iii) -9.00 J (iv) 0
 c) cero para cada bloque
 6.9 a) (i) cero (ii) cero b) (i) cero
 (ii) -25.1 J
 6.11 a) $1.0 \times 10^{16} \text{ J}$ b) aproximadamente 2 veces mayor
 6.13 a) 42.85V b) 1836K
 6.15 a) 43.2 m/s b) 101 m/s c) 5.80 m
 d) 3.53 m/s e) 7.35 m
 6.17 $(2gh[1 + \mu_k \tan\alpha])^{1/2}$
 6.19 a) 9D b) D/3
 6.21 32.0 N
 6.23 a) 4.48 m/s b) 3.61 m/s
 6.25 a) 4.96 m/s b) $a = 1.43 \text{ m/s}^2$; $v = 4.96 \text{ m/s}$;
 igual
 6.27 a) $v_1^2/2\mu_k g$ b) 1/2 c) 4 d) 2
 6.29 a) 48.0 N, 64.0 N b) 0.360 J, 0.640 J
 6.31 a) 2.8 m/s b) 3.5 m/s
 6.33 8.5 cm
 6.35 a) 1.76 b) 0.67 m/s
 6.37 a) 4.0 J b) cero c) -1.0 J d) 3.0 J
 e) -1.0 J
 6.39 a) 2.83 m/s b) 2.40 m/s
 6.41 a) 5.65 cm b) no; 0.57 J

- 6.43 $3.6 \times 10^5 \text{ J}$; 100 m/s
 6.45 $4.0 \times 10^{13} \text{ P}$
 6.47 743 W, 0.995 hp
 6.49 a) 1.4 b) 0.38
 6.51 a) $5.4 \times 10^9 \text{ J}$ b) 0.72 MW
 6.53 $2.96 \times 10^4 \text{ W}$
 6.55 877 J
 6.57 a) 532 J b) -315 J c) cero d) -203 J
 e) 14.7 J f) 1.21 m/s
 6.59 a) $1/\sin\alpha$ b) $W_{\text{entrada}} = W_{\text{salida}}$
 6.61 a) $2.59 \times 10^{12} \text{ J}$ b) 4800 J
 6.63 b) $k_{\text{ef}} = k_1 + k_2 + \dots + k_N$
 6.65 a) $k \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right)$; negativo b) $k \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right)$;
 positivo c) igual magnitud y signo opuesto,
 ya que el trabajo neto es cero
 6.67 a) 5.11 m b) 0.304 c) 10.3 m
 6.69 a) 0.15 N b) 9.4 N c) 0.44 J
 6.71 a) 2.56 m/s b) 5.28 N c) 19.7 J
 6.73 a) -910 J b) $3.17 \times 10^3 \text{ J}$
 6.75 $1.0 \times 10^5 \text{ N/m}$
 6.77 1.1 m desde donde se libera el resorte
 6.79 a) $1.02 \times 10^4 \text{ N/m}$, 8.16 m
 6.81 a) 0.600 m b) 1.50 m/s
 6.83 0.786
 6.85 1.5 m
 6.87 a) $1.10 \times 10^5 \text{ J}$ b) $1.30 \times 10^5 \text{ J}$
 c) 3.99 kW
 6.89 3.6 h
 6.91 $1.30 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$
 6.93 a) $1.26 \times 10^5 \text{ J}$ b) 1.46 W
 6.95 a) 2.4 MW b) 61 MW c) 6.0 MW
 6.97 a) 513 W b) 355 W c) 52.1 W
 6.99 a) 358 N b) 47.2 hp c) 4.06 hp
 d) 2.03%
 6.101 a) $\frac{1}{6} Mv^2$ b) 6.1 m/s c) 3.9 m/s
 d) $K_{\text{proyectil}} = 0.40 J$, $K_{\text{resorte}} = 0.60 J$
 6.103 a) $2.0 \times 10^5 \text{ J}$ b) $2.8 \times 10^5 \text{ J}$
 c) $2.8 \times 10^5 \text{ J}$ d) 5 km/h

Capítulo 7

- 7.1 a) $6.6 \times 10^5 \text{ J}$ b) $-7.7 \times 10^5 \text{ J}$
 7.3 a) 820 N b) (i) cero (ii) 740 J
 7.5 a) 24.0 m/s b) 24.0 m/s c) en el inciso (b)
 7.7 2.5 m/s
 7.9 a) (i) cero (ii) 0.98 J b) 2.8 m/s
 c) constante: gravedad; no constante: normal,
 fricción d) 5.0 N
 7.11 -5400 J
 7.13 a) 880 J b) -157 J c) 471 J d) 253 J
 e) $a = 3.16 \text{ m/s}^2$; $v = 7.11 \text{ m/s}$; $\Delta K = 253 \text{ J}$;
 igual
 7.15 a) 80.0 J b) 5.00 J
 7.17 a) (i) $4U_0$ (ii) $U_0/4$ b) (i) $x_0 \sqrt{2}$
 (ii) $x_0/\sqrt{2}$
 7.19 a) 6.32 cm b) 12 cm
 7.21 $\pm 0.092 \text{ m}$
 7.23 a) 3.03 m/s; conforme la masa abandona el
 resorte b) 95.9 m/s²; justo después de que la
 masa se libera
 7.25 a) $4.46 \times 10^5 \text{ N/m}$ b) 0.128 m
 7.27 a) -308 J b) -616 J c) no conservativa
 7.29 a) -3.6 J b) -3.6 J c) -7.2 J
 d) no conservativa
 7.31 a) $\frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2)$ b) $-\frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2)$; cero
 c) $-\frac{1}{2} k(x_3^2 - x_1^2)$; $-\frac{1}{2} k(x_2^2 - x_3^2)$;
 $-\frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2)$; igual
 7.33 2.46 N, dirección $+x$
 7.35 c) atrae
 7.37 a) $F(r) = (12a/r^{13}) - (6b/r^7)$
 b) $(2a/b)^{1/6}$; estable c) $b^2/4a$
 d) $a = 6.68 \times 10^{-138} \text{ J} \cdot \text{m}^{12}$,
 $b = 6.41 \times 10^{-78} \text{ J} \cdot \text{m}^6$
 7.39 a) cero, 637 N b) 2.99 m/s
 7.41 a) no b) sí, \$150
 7.43 0.41
 7.45 a) 15.9 J b) 4.0 J c) 3.0 J
 7.47 a) 20.0 m de la orilla izquierda de la sección
 horizontal b) -78.4 J
 7.49 a) 22.2 m/s b) 16.4 m c) no
 7.51 0.602 m
 7.53 15.5 m/s

- 7.55 4.4 m/s
 7.57a) $x_0\sqrt{k/m}$ b) kx_0/m c) $x = 0, x = -x_0$
 d) x_0 e) el sistema oscila y nunca se detiene
 7.59 a) 7.00 m/s b) 2.94 N
 7.61 a) $mg(1 - h/d)$ b) 440 N
 c) $\sqrt{2gh(1 - y/d)}$
 7.63 48.2°
 7.65 a) 0.392 b) -0.832 J
 7.67 a) $U(x) = (30.0 \text{ N/m})x^2 + (6.00 \text{ N/m}^2)x^3$
 b) 7.85 m/s
 7.69 7.01 m/s
 7.71 a) $m(g + a)^2/2gh$ b) $2gh/(g + a)$
 7.73 119 J
 7.75 a) 3.87 m/s b) 0.10 m
 7.77 a) $F_x = -m\omega_0^2 x, F_y = -m\omega_0^2 y,$
 b) $\frac{1}{2}m\omega_0^2(x^2 + y^2)$ c) (i) $\frac{1}{2}m\omega_0^2(x_0^2 + y_0^2)$
 (ii) $\frac{1}{2}m\omega_0^2(x_0^2 + y_0^2)$
 7.79 a) $4.4 \times 10^{12} \text{ J}$ b) $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3; 0.90 \text{ mm}$
 7.81 c) atrae
 7.83 a) -50.6 J b) -67.5 J c) no conservativa
 7.85 a) no b) $x_0 = F/k$ d) no e) $3F/k, -F/k$
 f) $v_{\text{máx}} = 2F/\sqrt{mk}$ a $x = x_0 = F/k$
 7.87 b) $v(x) = \left[\frac{2\alpha}{m\alpha_0^2} \left(\frac{x_0}{x} - \frac{x_0^2}{x^2} \right) \right]^{1/2}$
 c) $x = 2x_0, v = \sqrt{\alpha/2m\alpha_0^2}$ d) cero
 e) $v(x) = \left[\frac{2\alpha}{m\alpha_0^2} \left(\frac{x_0}{x} - \frac{x_0^2}{x^2} - \frac{2}{9} \right) \right]^{1/2}$
 f) primer caso: x_0, ∞ ; segundo caso: $3x_0/2, 3x_0$

Capítulo 8

- 8.1 a) $1.20 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) i) 60.0 m/s
 ii) 26.8 m/s
 8.3 b) la pelota de béisbol, 0.525 c) la mujer, 0.643
 8.5 a) 22.5 kg · m/s, a la izquierda b) 838 J
 8.7 562 N, no
 8.9 a) 10.8 m/s, a la derecha b) 0.75 m/s, a la izquierda
 8.11 a) 500 N/s² b) 5810 kg · m/s c) 2.70 m/s
 8.13 a) 2.50 N · s b) i) +6.25 m/s, a la derecha
 b) ii) 3.75 m/s, a la derecha
 8.15 a) 6.79 m/s b) 55.2 J
 8.17 a) 0.790 m/s b) -0.0023 J
 8.19 0.866 kg · m/s
 8.21 a) 0.0559 m/s b) 0.0313 m/s
 8.23 $3.65 \times 10^5 \text{ m/s}$
 8.25 a) 7.20 m/s b) -680 J
 8.27 3.56 m/s
 8.29 a) 0.846 m/s b) 2.10 J
 8.31 a) $1.4 \times 10^{-6} \text{ km/h}$, que no es apreciable.
 b) $6.7 \times 10^{-8} \text{ km/h}$, que no es apreciable.
 8.33 5.9 m/s a 32° al este del norte
 8.35 a) Ambos vehículos tienen el mismo cambio en momento lineal, pero el vehículo de menor tamaño tiene mayor cambio de velocidad.
 b) $2.5 \Delta v$ c) Los ocupantes del vehículo más pequeño
 8.37 19.5 m/s (auto), 21.9 m/s (camión)
 8.39 a) 2.93 cm b) 866 J c) 1.73 J
 8.41 a) 0.333 m/s, 3.33 J b) -1.33 m/s (A), +0.67 m/s (B)
 8.43 a) -0.100 m/s (A), 0.500 m/s (B)
 b) 0.009 kg · m/s para ambas
 c) $-4.5 \times 10^{-4} \text{ J}$ (A), $4.5 \times 10^{-4} \text{ J}$ (B), magnitudes iguales porque el choque es elástico
 8.45 a) 1/3 b) 1/9 c) 10
 8.47 $x_{\text{cm}} = 0.044 \text{ m}, y_{\text{cm}} = 0.056 \text{ m}$
 8.49 2520 km desde el centro de Plutón
 8.51 0.700 m hacia arriba y 0.700 a la derecha
 8.53 0.47 m/s
 8.55 $F_x = (-1.50 \text{ N/s})t, F_y = 0.25 \text{ N}, F_z = 0$
 8.57 a) 53 g b) 5.22 N
 8.59 2.4 km/s
 8.61 45.1
 8.63 a) 0.47 N · s b) 237 N
 8.65 a) $J_x = -1.14 \text{ N} \cdot \text{s}, J_y = 0.33 \text{ N} \cdot \text{s}$
 b) $v_{2x} = 0.0500 \text{ m/s}, v_{2y} = 1.78 \text{ m/s}$
 8.67 2.67 m/s (convertible), 3.46 m/s (SUV)

- 8.69 a) $v_{Cx} = 1.75 \text{ m/s}, v_{Cy} = 0.26 \text{ m/s}$
 b) -0.092 J
 8.71 15.0 m/s
 8.73 36.4 N
 8.75 a) 2.60 m/s b) 325 m/s
 8.77 a) 5.28 m/s b) 5.7 m
 8.79 68.8°
 8.81 102 N
 8.83 a) 0.222 b) -291 J c) 0.784 J
 8.85 b) $M = m$ c) cero
 8.87 a) 9.35 m/s b) 3.29 m/s
 8.89 b) $\frac{1}{2}Mv_{\text{cm}}^2$
 8.91 a) 3.56 m/s b) 5.22 m/s c) 4.67 m/s
 8.93 0.0544%
 8.95 $1.61 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, a la izquierda
 8.97 A: 13.6 m/s; B: 6.34 m/s, 65.0°
 8.99 a) $(L/2) \cos(\alpha/2)$, a lo largo del eje a partir de la cúspide
 b) $(L/3)$, a lo largo de la bisectriz a partir del lado inferior
 c) $L/\sqrt{8}$ a lo largo de la bisectriz
 d) $L/\sqrt{12}$ desde cada lado
 8.101 0.400 m/s
 8.103 a) 1.40 kg; 14.3 m/s; 0.28 kg; 71.6 m/s
 b) 347 m
 8.105 222 m/s, $1.01 \times 10^3 \text{ m/s}; v_{\text{icr}} = 1.5v_{\text{na}}$
 8.107 a) cero b) 1 d) 0.87 m f) 0.089 m
 8.109 a) sí b) no; la energía cinética disminuye en $4.8 \times 10^3 \text{ J}$
 8.111 a) 1.37v_{ex} b) 1.18v_{ex} c) 2.38v_{ex}
 d) 2.94 km/s
 8.113 b) $2L/3$
 8.115 a) $F\lambda g/32$ b) $l^2 g/32$

Capítulo 9

- 9.1 a) 34.4° b) 6.27 cm c) 1.05 m
 9.3 a) A: rad/s; B: rad/s³ b) (i) 0
 (ii) 15.0 rad/s² c) 9.50 rad
 9.5 a) $\omega_z(t) = (0.400 \text{ rad/s}) + (0.0360 \text{ rad/s}^3)t^2$
 b) 0.400 rad/s c) $\omega_z = 1.30 \text{ rad/s};$
 $\omega_{\text{med-}z} = 0.700 \text{ rad/s}$
 9.7 a) $a = \pi/4 \text{ rad}, b = 2.00 \text{ rad/s},$
 $c = -0.139 \text{ rad/s}^3$ b) cero
 c) 19.5 rad; 9.35 rad/s
 9.9 a) 2.25 rad/s b) 4.69 rad
 9.11 a) 24.0 s b) 68.8 rev
 9.13 10.5 rad/s
 9.15 a) 300 rpm b) 75.0 s; 312 rev
 9.17 9.00 rev
 9.19 a) 540 rad b) 12.3 s c) -8.17 rad/s²
 9.21 a) $1.99 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ b) $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$
 c) $2.99 \times 10^4 \text{ m/s}$ d) 464 m/s
 e) 0.0337 m/s²; cero
 9.23 a) 15.1 m/s² b) 15.1 m/s²
 9.25 a) 0.180 m/s²; 0; 0.180 m/s² b) 0.180 m/s²;
 0.377 m/s²; 0.418 m/s² c) 0.180 m/s²;
 0.754 m/s²; 0.775 m/s²
 9.27 10.7 cm; no
 9.29 a) 0.831 m/s b) 109 m/s²
 9.31 a) 2.29 b) 1.51 c) 15.7 m/s, 108g
 9.33 2.99 cm
 9.35 a) (i) 0.469 kg · m² (ii) 0.117 kg · m²
 (iii) cero b) (i) 0.0433 kg · m²
 (ii) 0.0722 kg · m² c) (i) 0.0288 kg · m²
 (ii) 0.0144 kg · m²
 9.37 a) 0.0640 kg · m² b) 0.0320 kg · m²
 c) 0.0320 kg · m²
 9.39 0.193 kg · m²
 9.41 8.52 kg · m²
 9.43 a) $3.15 \times 10^{23} \text{ J}$ b) 158 y; no
 9.45 0.600 kg · m²
 9.47 $7.35 \times 10^4 \text{ J}$
 9.49 a) 67.3 cm b) 45.5%
 9.51 a) f^5 b) $6.37 \times 10^8 \text{ J}$
 9.53 -88.2 J
 9.55 sobre un eje paralelo al diámetro y $(2\sqrt{15})R$ desde el centro de la esfera
 9.57 $\frac{1}{2}M(a^2 + b^2)$
 9.59 a) $ML^2/12$ b) $ML^2/12$
 9.61 $MR^2/2$

- 9.63 a) $\gamma L^2/2$ b) $ML^2/2$; más grande c) $ML^2/6$;
 un tercio del resultado en b)
 9.65 en 128 d
 9.67 a) 0.600 m/s³ b) $\alpha = (2.40 \text{ rad/s}^3)t$
 c) 3.54 s d) 17.7 rad
 9.69 a) 0.050 rad/s² b) 0.300 rad/s
 c) 5.40 m/s² e) 6.18 m/s²; $7.66 \times 10^3 \text{ N}$
 f) 60.9°
 9.71 a) 1.70 m/s b) 84.8 rad/s
 9.73 b) 2.00 m/s² d) 0.208 kg · m²
 9.77 a) 7.36 m b) 327 m/s²
 9.79 a) $2.14 \times 10^{29} \text{ J}$ b) $2.66 \times 10^{33} \text{ J}$
 9.81 a) $Mb^2/6$ b) 182 J
 9.83 a) -0.784 J b) 5.42 rad/s c) 5.42 m/s
 d) rapidez de la partícula = 4.43 m/s
 9.85 $\sqrt{(2gd)(m_B - \mu_s m_A)} / (m_A + m_B + I/R^2)$
 9.87 $\sqrt{(g/R)(1 - \cos \beta)}$
 9.89 a) $2.25 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ b) 3.40 m/s c) 4.95 m/s
 9.91 7.23 m
 9.93 a) $(247/512)MR^2$ b) $(383/512)MR^2$
 9.95 b) $\frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$
 9.97 a) $\frac{2}{3}MR^2$ b) más grande
 9.99 a) $5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ c) $0.334MR^2$
 9.101 a) $s = r_0\theta + \beta\theta^2/2$
 b) $\theta = (1/\beta)[\sqrt{r_0^2 + 2\beta v - r_0^2} - r_0]$
 c) $\omega_z = \frac{v}{\sqrt{r_0^2 + 2\beta v}}, \alpha_z = \frac{\beta v}{(r_0^2 + 2\beta v)^{3/2}}$;
 no d) $r_0 = 2.50 \text{ cm}, \beta = 0.247 \mu\text{m/rad};$
 $2.13 \times 10^4 \text{ rev}$

Capítulo 10

- 10.1 a) 40.0 N · m, hacia fuera de la página
 b) 34.6 N, hacia fuera de la página
 c) 20.0 N · m, hacia fuera de la página
 d) 17.3 N · m, hacia dentro de la página
 e) cero f) cero
 10.3 2.50 N · m, en sentido antihorario
 10.5 b) hacia la página c) $(-1.05 \text{ N} \cdot \text{m})\hat{k}$
 10.7 13.1 N · m
 10.9 a) 14.8 rad/s² b) 1.52 s
 10.11 7.47 N
 10.13 0.482
 10.15 a) 7.5 N en la parte horizontal, 18.2 N en la parte colgante b) 0.0160 kg · m²
 10.17 a) 2.65 rad/s² b) no c) 3.31 m/s²; no
 10.19 a) 1.80 m/s b) 7.13 J c) (i) 3.60 m/s, a la derecha (ii) 0 (iii) 2.55 m/s, 45° debajo de la horizontal d) (i) 1.80 m/s, a la derecha (ii) 1.80 m/s, a la izquierda (iii) 1.80 m/s, hacia abajo
 10.21 a) 1/3 b) 2/7 c) 2/5 d) 5/13
 10.23 a) 0.613 b) no, requiere $\mu_s = 0.858$
 c) porque no hay deslizamiento
 10.25 11.7 m
 10.27 a) 0.309 rad/s b) 100 J c) 6.67 W
 10.29 a) 0.38 N · m b) 160 rad c) 59 J d) 59 J
 10.31 b) 65.6 N
 10.33 a) 358 N · m b) $1.79 \times 10^3 \text{ N}$ c) 83.8 m/s
 10.35 a) 115 kg · m²/s, hacia la página
 b) 125 kg · m²/s², hacia fuera de la página
 10.37 $4.71 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
 10.39 $4.6 \times 10^3 \text{ rad/s}$
 10.41 1.14 rev/s
 10.43 a) 0.60 rev
 10.45 a) 0.120 rad/s b) $3.20 \times 10^{-4} \text{ J}$; c) trabajo realizado por el insecto
 10.47 a) 5.88 rad/s
 10.49 a) 1.62 N b) $1.80 \times 10^3 \text{ rev/min}$
 10.51 a) se reduce a la mitad b) se duplica
 c) se reduce a la mitad d) se duplica
 e) permanece sin cambio
 10.53 a) 67.6 N b) 62.9 N c) 3.27 s
 10.55 a) 840 rpm b) 75 mph c) 60 mph
 10.57 a) 16.3 rad/s² b) no; disminuye
 c) 5.70 rad/s
 10.59 a) en $x = l$ b) en $x = l$ c) en $x = (l/2)(1 + [2h/l]^2)$ para $l > 2h$; en $x = l$ para $l < 2h$

A-12 Respuestas a los problemas con número impar

- 10.61 a) FR b) FR ; sí c) $\sqrt{4F/MR}$ d) $2F/M$
 e) $4F/M$
 10.63 a) 266 N b) 4.71 rad/s²
 10.65 a) 2.88 m/s² b) 6.13 m/s²; mayor que en el caso b)
 10.67 239 N
 10.69 $a = \frac{2g}{2 + (R/b)^2}$; $\alpha = \frac{2g}{2b + R^2/b}$;
 $T = \frac{2mg}{2(b/R)^2 + 1}$
 10.71 en sentido horario; en sentido horario; en sentido horario
 10.73 a) 1.41 s; 70.5 m/s b) t mayor, v menor
 10.75 29.0 m/s
 10.77 a) 26.0 m/s b) sin cambio
 10.79 a) $\sqrt{20hy/7}$ b) no c) fricción de rodamiento d) $\sqrt{8hy/3}$
 10.81 b) $R =$ radio de la rueda,
 $T =$ periodo de rotación de la rueda
 c) $v_x = \frac{2\pi R}{T} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right]$,
 $v_y = \frac{2\pi R}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$; $a_x = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$,
 $a_y = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$
 d) $t = 0, T, 2T, \dots$; $a_x = 0, a_y = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$
 e) $\frac{4\pi^2 R}{T^2}$, independiente del tiempo
 10.83 g/3
 10.85 1.87 m
 10.87 a) $6v/19L$ b) 3/19
 10.89 a) 5.46 rad/s b) 3.17 cm
 c) 1.01×10^3 m/s
 10.91 a) 2.00 rad/s b) 6.57 rad/s
 10.93 0.30 rad/s, en sentido horario
 10.97 -4.2×10^{-16} rad/s por año; decreciente
 10.101 a) $a = +\mu_{kg}$, $\alpha = -2\mu_{kg}/R$
 b) $\omega_0^2 R^2 / 18\mu_{kg}$ c) $-M\omega_0^2 R^2 / 6$
 10.103 a) $mv_1^2 r_1^2 / r^3$ b) $(mv_1^2 / 2)[(r_1/r_2)^2 - 1]$
 c) igual

Capítulo 11

- 11.1 29.8 cm
 11.3 20.0 kg
 11.5 5450 N
 11.7 a) 1000 N, 1.20 m desde el extremo donde se aplica la fuerza de 400 N b) 800 N, 1.25 m desde el extremo donde se aplica la fuerza de 400 N
 11.9 a) 550 N b) 0.614 m desde A
 11.11 a) 1920 N b) 1140 N
 11.13 a) $T = 2.60w$; $F_{\text{pivote}} = 3.28w$ a 37.6°
 b) $T = 4.10w$; $F_{\text{pivote}} = 5.38w$ a 48.8°
 11.15 140 N para cada bisagra
 11.17 246 N; 0.34 m detrás de las extremidades delanteras
 11.19 $T_{\text{izquierda}} = 270$ N, $T_{\text{derecha}} = 304$ N, $\theta = 40^\circ$
 11.21 a) 0.800 m b) en sentido horario
 c) 0.800 m, en sentido horario
 11.23 1.4 mm
 11.25 2.00×10^{11} Pa
 11.27 a) superior: 3.1×10^{-3} ; inferior: 2.0×10^{-3}
 b) superior: 1.6 mm; inferior: 0.98 mm
 11.29 9.1×10^6 N
 11.31 a) 3.33×10^6 Pa b) 1.33×10^5 Pa
 11.33 a) 4.8×10^9 Pa; 2.1×10^{10} Pa⁻¹
 11.35 b) 6.60×10^2 N c) 1.8 mm
 11.37 3.41×10^7 Pa
 11.39 10.2 m/s²
 11.41 a) 525 N b) 222 N, 328 N c) 1.48
 fuerza del ala: 7300 N hacia arriba; fuerza de la cola: 600 N hacia abajo
 11.45 a) 140 N b) 6 cm a la derecha
 11.47 a) 424 N b) 170 N
 11.49 120 N a la derecha, 160 N hacia arriba
 11.53 b) $(Mg/2) \sin \theta$

- 11.55 a) $V = mg + w, H = T = (w + mg/4) \cot \theta$
 b) 950 N c) 4.00°
 11.57 7600 N
 11.59 a) 2700 N b) 19
 11.61 a) 4.90 m b) 60 N
 11.63 a) $\theta = \arctan(h/d)$; $T = Wd/2\sqrt{h^2 + d^2}$
 b) $\frac{Whd}{2(h^2 + d^2)}$; $W = \frac{2h^2 + d^2}{2(h^2 + d^2)}$
 11.65 a) 1150 N b) 1940 N c) 918 N d) 0.473
 11.67 la persona arriba: 590 N; la persona abajo: 1370 N; arriba
 11.69 a) $w_{\text{máx}} = T_{\text{máx}} h D / (L \sqrt{h^2 + D^2})$
 11.71 a) 7140 N; de paredes altas b) 7900 N
 11.73 a) 268 N b) 232 N c) 366 N
 11.75 a) A: 0.424 N; B: 1.47 N; C: 0.424 N
 b) 0.848 N
 11.77 a) se vuelca a 27°, se desliza a 31°; la paca se vuelca antes de deslizarse b) se vuelca a 27°, se desliza a 22°, la paca se desliza antes de volcarse
 11.79 a) $F_A = 80$ N, $F_B = 870$ N b) 1.92 m
 11.81 a) 3.7 kN, 2.0 kN verticalmente hacia arriba
 11.83 a) 0.012w b) menor c) 25.0°; se inclina
 11.85 a) 5.4 mm b) 4.2 mm
 11.87 a) 0.70 m del alambre A b) 0.45 m del alambre B
 11.89 a) 1.63 m b) latón: 2.00×10^8 Pa; níquel: 4.00×10^8 Pa c) latón: 2.2×10^{-3} ; níquel: 1.9×10^{-3}
 11.91 a) 0.36 mm b) 0.045 mm c) 0.33 mm
 11.93 a) $(F \cos^2 \theta)/A$ b) $(F \sin 2\theta)/2A$ c) 0
 d) 45°
 11.95 a) 600 N b) 13.5 kN
 c) deslizarse: $\mu_s w / (\sin \theta - \mu_s \cos \theta)$; volcarse: $w / [(\frac{1}{3}) \cos \theta + 2 \sin \theta]$; 66°
 11.97 en la menor de $h^2/L + L/2$ y L
 11.99 $[(A^2 x/F) - k_0 V_0] / V_0$
 11.101 a) 0.662 mm b) 2.20×10^{-2} J
 c) 8.33×10^{-3} J d) -3.04×10^{-2} J
 e) 3.04×10^{-2} J

Capítulo 12

- 12.1 2.18
 12.3 0.026 mm
 12.5 a) 2.59×10^8 m b) no
 12.7 a) 2.40×10^{-3} N b) 3.6×10^{-6}
 12.9 a) 6.30×10^{20} N, hacia el Sol
 b) 4.77×10^{20} N, 24.6° hacia la Tierra desde el Sol c) 2.37×10^{20} N, hacia el Sol
 12.11 a) 0.366 m de la masa m b) (i) inestable (ii) estable
 12.13 2.1×10^{-9} m/s², hacia abajo
 12.15 1.38×10^7 m
 12.17 a) 0.37 m/s² b) 1700 kg/m³
 12.19 610 N; 83% de peso en la superficie
 12.21 5.98×10^{24} kg
 12.23 0.83 m/s; sí
 12.25 a) 5.02×10^3 m/s b) 6.06×10^4 m/s
 12.27 a) 7.46×10^3 m/s b) 1.68 h
 12.29 2.01×10^{30} kg
 12.31 a) 4.7 m/s; sí b) 2.2 h
 12.33 a) 8.3×10^4 m/s b) 1.3×10^6 s
 12.35 b) 4.45×10^{12} m, 4.55×10^{12} m c) 248 y
 12.39 a) (i) 5.31×10^{-9} N (ii) 2.67×10^{-9} N
 12.41 a) $-GMm/\sqrt{a^2 + x^2}$
 c) $GMmx/(a^2 + x^2)^{3/2}$ hacia el centro del anillo e) $-GMm/a$, cero
 12.43 a) 53 N b) 52 N
 12.45 1.39×10^{-9}
 12.47 a) 4.3×10^{37} kg, $2.1 \times 10^7 M_{\text{Sol}}$ b) no
 c) 6.3×10^{10} m; sí
 12.49 a) 9.67×10^{12} N, a medio camino entre los ejes x y y b) 3.02×10^{-5} m/s
 12.51 b) 5.39×10^{13} N · m, en sentido horario
 12.53 b) (i) 1.63×10^{-5} m/s, 4.08×10^{-6} m/s (ii) 2.04×10^{-5} m/s c) 31.9 m
 12.55 a) 3.58×10^7 m
 12.57 1.8×10^2 m/s
 12.59 a) 1.39×10^7 m b) 3.59×10^7 m
 12.61 $0.01R_E = 64$ km

- 12.63 0.28%
 12.65 6.06×10^3 km/h
 12.67 $\sqrt{2Gm_E h / (R_E^2 + hR_E)}$
 12.69 a) 13.7 km/s b) 13.3 km/s c) 13.2 km/s
 12.71 a) (i) 2.8 y (ii) 6.1 y b) 4.90×10^8 km
 c) 4.22×10^8 km
 12.73 a) $GM^2/4R^2$ b) $\sqrt{GM/4R}$, $4\pi\sqrt{R^3/GM}$
 c) $GM^2/4R$
 12.75 6.8×10^4 m/s
 12.77 a) 7.91×10^3 s b) 1.53
 c) 8.43×10^3 m/s, 5.51×10^3 m/s
 d) 2.41×10^2 m/s, 3.26×10^2 ; perigeo
 12.79 3.22×10^9 J
 12.81 9.36 m/s²
 12.83 $\frac{GMm}{x(x+L)}$
 12.85 a) $U(r) = \frac{Gm_E m}{2R_E^2} r^2$ b) 7.90×10^3 m/s
 12.87 a) en contra de la dirección del movimiento en todos los casos b) 2.24×10^7 s
 c) 44.1°
 12.89 $F = \frac{2GMm}{a^2} \left[1 - \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} \right]$, hacia el centro del disco

Capítulo 13

- 13.1 a) 4.54×10^{-3} s, 1.38×10^3 rad/s
 b) 2.27×10^{-3} s, 1.76×10^3 rad/s
 13.3 5.53×10^3 rad/s, 1.14×10^{-3} s
 13.5 0.0500 s
 13.7 a) 0.167 s b) 37.7 rad/s
 c) 8.44×10^{-2} kg
 13.9 a) 0.375 s b) 2.66 Hz c) 16.7 rad/s
 13.11 a) 0.98 m b) $\pi/2$ rad
 c) $x(t) = (-0.98 \text{ m}) \sin([12.2 \text{ rad/s}]t)$
 13.13 a) -2.71 m/s²
 b) $x(t) = (1.46 \text{ cm}) \cos([15.7 \text{ rad/s}]t + 0.715 \text{ rad})$,
 $v_x(t) = (-22.9 \text{ cm/s}) \sin([15.7 \text{ rad/s}]t + 0.715 \text{ rad})$,
 $a_x(t) = (-359 \text{ cm/s}^2) \cos([15.7 \text{ rad/s}]t + 0.715 \text{ rad})$
 13.15 120 kg
 13.17 a) 0.253 kg b) 1.22 cm c) 3.05 N
 13.19 a) 1.51 s b) 26.0 N/m c) 0.308 m/s
 d) 1.92 N e) -0.0125 m; 0.303 m/s;
 0.216 m/s²
 13.21 a) 1.48 m/s b) 2.96×10^{-5} J
 13.23 a) 1.20 m/s b) 1.11 m/s c) 36 m/s²
 d) 13.5 m/s² e) 0.36 J
 13.25 $m = 3M$; $\frac{5}{4}$
 13.27 0.240 m
 13.29 a) 0.0778 m b) 1.28 Hz c) 0.624 m/s
 13.31 a) 4.06 cm b) 1.21 m/s c) 29.8 rad/s
 13.33 b) 23.9 cm; 1.45 Hz
 13.35 a) 2.7×10^{-8} kg · m²
 b) 4.3×10^{-6} N · m/rad
 13.37 5.12×10^{-2} kg · m²
 13.41 a) 0.25 s b) 0.25 s
 13.43 0.407 oscilaciones/s
 13.45 2.00 m
 13.47 10.7 m/s²
 13.49 0.129 kg · m²
 13.53 A: $2\pi\sqrt{L/g}$; B: $(4\pi\sqrt{2/3})\sqrt{L/g} = 0.943T_A$;
 péndulo A
 13.55 A: $2\pi\sqrt{L/g}$; B: $2\pi\sqrt{\frac{11L}{10g}} = 1.05T_A$;
 péndulo B
 13.57 a) 0.393 Hz b) 1.73 kg/s
 13.59 a) A b) magnitud = $bA/2m$, en dirección -x;
 pendiente negativa
 c) $a_x(0) = A \left(\frac{b^2}{2m^2} - \frac{k}{m} \right)$; si $b < \sqrt{2mk}$,
 $a(0) < 0$; si $b = \sqrt{2mk}$, $a(0) = 0$; si
 $b > \sqrt{2mk}$, $a(0) > 0$
 13.61 a) kg/s b) (i) $5.0F_{\text{máx}}/k$ (ii) $2.5F_{\text{máx}}/k$

- 13.63 a) $6.72 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ b) 3.02 kN
 c) 18.3 m/s , 75.6 J d) 17.6 kW e) 12.1 kN ,
 36.7 m/s , 302 J , 141 kW
 13.65 a) todos sin cambio b) se reduce a $1/4$
 c) se reduce a la mitad d) $1/\sqrt{5}$
 del valor e) U : sin cambio; K : $1/5$ de su valor
 13.67 a) 24.4 cm b) 0.220 s c) 1.19 m/s
 13.69 a) 0.318 Hz , 0.500 m , 3.14 s b) 1.57 s
 13.71 $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3\sqrt{2}g}{L}} = 0.921 \left(\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}} \right)$
 13.73 a) 1.49 s b) $-2.12 \times 10^{-9} \text{ s}$ por s; más corto
 c) 0.795 s
 13.75 a) 0.150 m/s b) 0.112 m/s^2 , hacia abajo
 c) 0.700 s d) 4.38 m
 13.77 a) 2.6 m/s b) 0.21 m c) 0.49 s
 13.79 $9.08 \times 10^{24} \text{ kg}$
 13.81 1.17 s
 13.83 a) sí c) $2.40 \times 10^3 \text{ s}$ d) no
 13.87 c) $-7.57 \times 10^{-19} \text{ J}$ e) $8.39 \times 10^{12} \text{ Hz}$
 13.89 0.705 Hz ; 14.5°
 13.91 $2\pi \sqrt{M/3k}$
 13.93 $\frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{3g}{2L}}$
 13.95 c) 0.430 m
 13.97 a) $k_{\text{ef}} = k_1 + k_2$ b) $k_{\text{ef}} = k_1 + k_2$
 c) $k_{\text{ef}} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$ d) $\sqrt{2}$
 13.99 a) $Mv^2/6$ c) $\omega = \sqrt{3k/M}$; $M' = M/3$
 13.101 579 N/m

Capítulo 14

- 14.1 $w = 41.8 \text{ N}$; no
 14.3 $7.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; sí
 14.5 1.6
 14.7 61.7 N
 14.9 a) $1.86 \times 10^6 \text{ Pa}$ b) 184 m
 14.11 0.581
 14.13 a) absoluta:
 $46.7 \text{ lb/in}^2 = 3.22 \times 10^5 \text{ Pa} = 3.18 \text{ atm}$;
 manométrica:
 $32.0 \text{ lb/in}^2 = 2.21 \times 10^5 \text{ Pa} = 2.18 \text{ atm}$
 b) no c) 432 cm^2
 14.15 $6.27 \times 10^6 \text{ Pa} = 61.9 \text{ atm}$
 14.17 $6.0 \times 10^4 \text{ Pa}$
 14.19 $1.41 \times 10^5 \text{ Pa}$; $4.03 \times 10^4 \text{ Pa}$
 14.21 $2.3 \times 10^5 \text{ N}$
 14.23 a) 637 Pa b) (i) 1170 Pa (ii) 1170 Pa
 14.25 $1.66 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.64 \text{ atm}$
 14.27 $6.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $2.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 14.29 a) $\rho < \rho_{\text{fluido}}$ c) sumergida: $\rho/\rho_{\text{fluido}}$; arriba:
 $(\rho_{\text{fluido}} - \rho)/\rho_{\text{fluido}}$ d) 32%
 14.31 a) 116 Pa b) 921 Pa c) 0.822 kg ,
 822 kg/m^3
 14.33 $1.91 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
 14.35 9.6 m/s
 14.37 a) 17.0 m/s b) 0.317 m
 14.39 28.4 m/s
 14.41 $1.47 \times 10^5 \text{ Pa}$
 14.43 $12,600 \text{ N}$
 14.45 $2.03 \times 10^4 \text{ Pa}$
 14.47 a) $(p_0 - p)\pi D^2/4$ b) 776 N
 14.49 a) $5.9 \times 10^5 \text{ N}$ b) $1.76 \times 10^5 \text{ N}$
 14.51 c) independiente del área de la superficie
 14.53 $(p - p_0)VR^2/Gmd$
 14.55 a) $12,700 \text{ kg/m}^3$, 3140 kg/m^3
 14.57 a) 1470 Pa b) 13.9 cm
 14.59 $9.8 \times 10^6 \text{ kg}$; sí
 14.61 a) 30% b) 70%
 14.63 $4.66 \times 10^{-4} \text{ m}^3$; 5.27 kg
 14.65 a) $1.10 \times 10^4 \text{ m}^3$ b) 112 kN
 14.67 a) 0.107 m b) 2.42 s
 14.69 a) $H/2$ b) H
 14.71 0.0958 kg
 14.73 33.5 N
 14.75 b) 12.2 N c) 11.8 N
 14.77 b) $2.52 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, 0.124
 14.79 más arriba por $5.57 \times 10^{-4} \text{ m}$
 14.81 a) $1 - \rho_B/\rho_L$ b) $(\rho_L - \rho_B)L/(\rho_L - \rho_W)$
 c) 4.60 cm

- 14.83 a) la/g b) $\omega^2 r^2/2g$
 14.87 a) $2\sqrt{h(H-h)}$ b) h
 14.89 a) $0.200 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $6.97 \times 10^4 \text{ Pa}$
 14.91 $3h_1$
 14.93 a) $r = r_0(1 + 2gy/v_0^2)^{-1/4}$ b) 1.10 m
 14.95 a) 80.4 N
 14.97 a) $\sqrt{2gh}$ b) $(p_a/\rho g) - h$

Capítulo 15

- 15.1 a) 0.439 m ; 1.28 ms b) 0.219 m
 15.3 $220 \text{ m/s} = 800 \text{ km/h}$
 15.5 a) $4.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$ a $7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$;
 $1.3 \times 10^{-15} \text{ s}$ a $2.3 \times 10^{-15} \text{ s}$ b) no
 15.7 a) $f = 25.0 \text{ Hz}$, $T = 0.0400 \text{ s}$, $k = 19.6 \text{ rad/m}$
 b) $y(x, t) = (0.0700 \text{ m}) \cos 2\pi \left(\frac{x}{0.320 \text{ m}} + \frac{t}{0.0400 \text{ s}} \right)$ c) $+0.0495 \text{ m}$ d) 0.0050 s
 15.9 c) dirección $-x$ para ambos
 d) $v_y(x, t) = \omega A \cos(kx + \omega t)$,
 $a_y(x, t) = -\omega^2 A \sin(kx + \omega t)$
 15.11 a) 4.0 mm b) 0.040 s c) 0.14 m , 3.6 m/s
 d) 0.24 m , 6.0 m/s e) no
 15.13 b) dirección $+x$
 15.15 a) 16.3 m/s b) 0.136 m c) ambas se
 incrementan en un factor de $\sqrt{2}$
 15.17 a) 0.390 s
 15.19 a) 10.0 m/s b) 0.250 m
 c) $y(x, t) = (3.00 \text{ cm}) \cos[(8.00\pi \text{ rad/m})x - (80.0\pi \text{ rad/s})t]$ d) 1890 m/s^2 e) sí
 15.21 a) 95 km b) $2.5 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$
 c) $1.1 \times 10^8 \text{ W}$
 15.23 a) 0.050 W/m^2 b) $2.2 \times 10^4 \text{ J}$
 15.25 707 W
 15.33 a) $(1.33 \text{ m})n$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
 b) $(1.33 \text{ m})(n + \frac{1}{2})$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$
 15.39 a) 96.0 m/s b) 461 N c) 1.13 m/s ,
 426 m/s^2
 15.41 b) 2.80 cm c) 277 cm d) 185 cm ,
 0.126 s , 1470 cm/s e) 280 cm/s
 f) $y(x, t) = (5.60 \text{ cm}) \sin[(0.0907 \text{ rad/cm})x]$
 $\sin[(113 \text{ rad/s})t]$
 15.43 a) $y(x, t) = (4.60 \text{ mm}) \sin[(6.98 \text{ rad/m})x]$
 $\sin[(742 \text{ rad/s})t]$ b) 3^{m} c) 39.4 Hz
 15.45 a) 45.0 cm b) no
 15.47 a) 311 m/s b) 246 Hz c) 245 Hz , 1.40 m
 15.49 a) 20.0 Hz , 126 rad/s , 3.49 rad/m
 b) $y(x, t) = (2.50 \text{ mm}) \cos[(3.49 \text{ rad/m})x - (126 \text{ rad/s})t]$
 c) $y(t) = (2.50 \text{ mm}) \cos[(126 \text{ rad/s})t]$
 d) $y(t) = (2.50 \text{ mm}) \cos[3\pi/2 - (126 \text{ rad/s})t]$ e) 0.314 m/s
 f) -2.50 mm , 0
 15.51 a) $(7L/2)\sqrt{\mu_1/F}$ b) no
 15.53 a) $(2\pi A/\lambda)\sqrt{FL/M}$ b) aumentar en un
 factor de 4
 15.55 a) $4\pi^2 F \Delta x / \lambda^2$
 15.57 a) $1, 0, 2, +, 3, -, 4, 0, 5, -, 6, +$ b) $1, -, 2, +, 3, -, 4, +, 5, -, 6, 0$ c) (a): se invierte el signo de las respuestas; (b): sin cambio
 15.61 c) C/B
 15.63 b) k disminuye en un factor de $2\sqrt{2}$;
 ω disminuye en un factor de $\sqrt{2}$
 15.65 a) 7.07 cm b) 400.0 W
 15.67 $\alpha = (v_1^2 - v_2^2)\rho Y \Delta T$
 15.69 $n(0.800 \text{ Hz})$, $n = 1, 2, 3, \dots$
 15.71 b) sí
 15.73 c) $2A, 2A\omega, 2A\omega^2$
 15.75 230 N
 15.77 a) $0, L$ b) $0, L/2, L$ d) no
 15.79 a) 148 N b) 26%
 15.81 b) $\frac{1}{2}\mu\omega^2 A^2 \sin^2(kx - \omega t)$
 c) $\frac{1}{2}FK A^2 \sin^2(kx - \omega t)$
 15.83 $\pi/\omega\sqrt{2}$
 15.85 a) 99.4 N c) -4.25 Hz , disminuye

Capítulo 16

- 16.1 a) 0.344 m b) $1.2 \times 10^{-5} \text{ m}$
 c) 6.9 m , 50 Hz
 16.3 a) 7.78 Pa b) 77.8 Pa c) 778 Pa
 16.5 a) $1.33 \times 10^{10} \text{ Pa}$ b) $9.47 \times 10^{10} \text{ Pa}$
 16.7 90.8 m
 16.9 81.5°C
 16.11 0.208 s
 16.13 $Y/900$
 16.15 a) $9.44 \times 10^{-11} \text{ m}$; 0.434 m
 b) $5.66 \times 10^{-9} \text{ m}$; 0.101 m
 c) aire; $A_{\text{aire}}/A_{\text{agua}} = 60.0$
 16.17 a) 1.94 Pa b) $4.58 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$
 c) 96.6 dB
 16.19 a) $4.4 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ b) 6.39 dB
 c) $5.8 \times 10^{-11} \text{ m}$
 16.21 14.0 dB
 16.23 a) 20.0
 16.25 a) *fundamental*: nodo de desplazamiento en 0.60 m , nodos de presión en 0 y 1.20 m ; *primer sobretono*: nodos de desplazamiento en 0.30 m y 0.90 m , nodos de presión en 0 , 0.60 m y 1.20 m ; *segundo sobretono*: nodos de desplazamiento en 0.20 m , 0.60 m y 1.00 m , nodos de presión en 0 , 0.40 m , 0.80 m y 1.20 m b) *fundamental*: nodo de desplazamiento en 0 , nodo de presión en 1.20 m ; *primer sobretono*: nodos de desplazamiento en 0 y 0.80 m , nodos de presión en 0.40 m y 1.20 m ; *segundo sobretono*: nodos de desplazamiento en 0 , 0.48 m y 0.96 m , nodos de presión en 0.24 m , 0.72 m , 1.20 m
 16.27 506 Hz , 1520 Hz , 2530 Hz
 16.29 a) 267 Hz b) no
 16.31 a) 614 Hz b) 1.23 kHz
 16.33 a) 172 Hz b) 86 Hz
 16.35 0.125 m
 16.37 destructiva
 16.39 1.3 Hz
 16.41 780 m/s
 16.43 a) 375 Hz b) 371 Hz c) 4 Hz
 16.45 a) 0.25 m/s b) 0.91 m
 16.47 19.8 m/s
 16.49 26.8 Hz
 16.51 $0.095c$; hacia nosotros
 16.53 a) 36.0° b) 2.23 s
 16.55 a) 1.00 b) 8.00 c) 47.3 mm
 16.57 $3f_0$ c) $v = 4Lf_0$
 16.59 armónico de la flauta $3N(N = 1, 3, \dots)$ resuena con el armónico de la cuerda $4N$
 16.61 a) cerrado b) $n = 7, n = 9$ c) 43.9 cm
 16.63 a) $v/(2L)$, v/L , $3v/(2L)$
 16.65 a) 375 m/s b) 1.39 c) 0.8 cm
 16.67 a) $n(77.3 \text{ Hz})$, $n = 1, 2, 3, \dots$
 16.69 1.27
 16.71 a) 548 Hz b) 652 Hz
 16.73 a) $I = 2\pi^2 \sqrt{\rho B f^2} (\Delta R)^2$
 b) $P = 8\pi^3 \sqrt{\rho B f^2 R^2} (\Delta R)^2$
 c) $A = (R/d)\Delta R$, $p_{\text{máx}} = 2\pi \sqrt{\rho B} (R/d)\Delta R$,
 $I = 2\pi^2 \sqrt{\rho B} (R/d)^2 (\Delta R)^2$
 16.75 a) 6.74 cm b) 147 Hz
 16.77 b) 2.0 m/s
 16.79 a) $1.2 \times 10^6 \text{ m/s}$ b) $3.6 \times 10^{16} \text{ m} = 3.8 \text{ ly}$
 c) $5.2 \times 10^3 \text{ ly}$; 4100 BCE
 16.81 a) $f_0 \left(\frac{2v_w}{v - v_w} \right)$ b) $f_0 \left(\frac{2v_w}{v + v_w} \right)$
 16.83 d) 9.69 cm/s ; $6.67 \times 10^2 \text{ m/s}^2$

Capítulo 17

- 17.1 -81.0°F b) 134.1°F c) 88.0°F
 17.3 38 F°
 17.5 a) -18.0 F° b) -10.0 C°
 17.7 a) 104.4°F ; sí b) 54°F
 17.9 a) 216.5 K b) 325.9 K c) 205.4 K
 17.11 a) -210°C b) 63 K
 17.13 0.964 atm
 17.15 a) -282°C b) no, $4.76 \times 10^4 \text{ Pa}$
 17.17 0.39 m
 17.19 1.9014 cm , 1.8964 cm
 17.21 $2.3 \times 10^{-5} (\text{C}^\circ)^{-1}$
 17.23 11 L

- 17.25 $1.7 \times 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$
 17.27 a) 1.431 cm^2 b) 1.437 cm^2
 17.29 0.261 mm
 17.31 a) $3.2 \times 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$ b) $2.5 \times 10^9 \text{ Pa}$
 17.33 $5.79 \times 10^5 \text{ J}$
 17.35 $240 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
 17.37 $1.4 \times 10^3 \text{ s}$
 17.39 a) $1.21 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$
 17.41 $45.1 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.43 a) $114 \text{ }^\circ\text{C}$ b) $6.35 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.45 a) $215 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ b) agua c) demasiado pequeño
 17.47 8 min
 17.49 $3.64 \times 10^4 \text{ J} = 8.69 \times 10^3 \text{ cal} = 34.5 \text{ Btu}$
 17.51 $2.39 \times 10^4 \text{ Btu/h} = 7.01 \times 10^3 \text{ W}$
 17.53 357 m/s
 17.55 3.45 L
 17.57 $5.50 \times 10^5 \text{ J}$
 17.59 0.0940 kg
 17.61 2.10 kg
 17.63 190 g
 17.65 a) 222 K/m b) 10.7 W c) $73.3 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.67 a) $-5.8 \text{ }^\circ\text{C}$ b) 11 W/m^2
 17.69 $7.1 \times 10^2 \text{ Btu} = 7.5 \times 10^5 \text{ J}$
 17.71 $105.5 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.73 a) 21.3 kW b) 6.44 kW
 17.75 167 W
 17.77 2.1 cm^2
 17.79 a) $35.2 \text{ }^\circ\text{M}$ b) $39.6 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.81 b) $5.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^3$, -23 kg/m^3
 17.83 $37.5 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.85 $35.0 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.87 23.0 cm , 7.0 cm
 17.89 b) $1.9 \times 10^8 \text{ Pa}$
 17.91 a) $87 \text{ }^\circ\text{C}$ b) $-80 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.93 $20.2 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.95 a) 54.3
 17.97 a) 83.6 J b) $1.86 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
 c) $5.60 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
 17.99 a) $2.7 \times 10^7 \text{ J}$ b) 6.89 K c) 19.3 K
 17.101 2.53 cm
 17.103 a) $86.1 \text{ }^\circ\text{C}$ b) sin hielo, 0.130 kg de agua líquida, sin vapor
 17.105 a) $100 \text{ }^\circ\text{C}$ b) 0.0214 kg de vapor, 0.219 kg de agua líquida
 17.107 1.743 kg
 17.109 a) 94 W b) 1.3
 17.111 2.9
 17.113 c) $6.0 \times 10^5 \text{ s}$ (aprox. 170 h) d) $1.5 \times 10^{10} \text{ s}$ (aprox. 500 y); no
 17.115 $0.106 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
 17.117 $5.82 \times 10^{-3} \text{ kg}$
 17.119 a) $69.6 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.121 $1.76 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.123 a) $103 \text{ }^\circ\text{C}$ b) 27 W
 17.125 a) lo contrario b) 1.2×10^{-4} c) 5.2 s
 d) dentro de $1.93 \text{ }^\circ\text{C}$
 17.127 a) (i) 280 W (ii) 0.248 W
 (iii) $2.10 \times 10^3 \text{ W}$ (iv) 116 W ; radiación proveniente del Sol b) 3.72 L/h c) 1.4 L/h

Capítulo 18

- 18.1 a) 56.2 mol b) $6.81 \times 10^6 \text{ Pa} = 67.2 \text{ atm}$
 18.3 0.959 atm
 18.5 a) 3×10^{27} moléculas
 b) 3×10^{19} moléculas/cm³
 18.7 $503.0 \text{ }^\circ\text{C}$
 18.9 $3.36 \times 10^5 \text{ Pa}$
 18.11 0.159 L
 18.13 1.05 atm
 18.15 a) $70.2 \text{ }^\circ\text{C}$ b) sí
 18.17 850 m
 18.19 la densidad en el nivel del mar es 1.2% mayor
 18.21 $2.28 \times 10^4 \text{ Pa}$
 18.23 a) 58720 Pa b) 3.88 cm
 18.25 a) $8.2 \times 10^{-17} \text{ atm}$ b) no
 18.27 55.6 mol , 3.35×10^{25} moléculas
 18.29 a) $9.00 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ b) $3.10 \times 10^{-10} \text{ m}$
 c) aproximadamente igual
 18.31 b) 1.004
 18.33 a) podría ser cierto b) podría ser cierto
 c) no es cierto d) debe ser cierto e) podría ser cierto
 18.35 a) $1.9 \times 10^6 \text{ m/s}$; no, 0.64% de c
 b) $7.3 \times 10^{10} \text{ K}$

- 18.37 a) $6.21 \times 10^{-21} \text{ J}$ b) $2.34 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}^2$
 c) 484 m/s d) $2.57 \times 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
 e) $1.24 \times 10^{19} \text{ N}$ f) $1.24 \times 10^{-17} \text{ Pa}$
 g) 8.15×10^{21} moléculas
 h) 2.45×10^{22} moléculas
 18.39 $3800 \text{ }^\circ\text{C}$
 18.41 a) 1560 J b) 935 J
 18.43 a) $741 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ b) 5.65 kg ; 4850 L
 18.45 a) $924 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ b) la tabla 17.3 da $910 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
 18.49 a) 337 m/s b) 380 m/s c) 412 m/s
 18.51 a) 610 Pa ; sólido \rightarrow vapor
 b) $2.21 \times 10^7 \text{ Pa}$; sólido \rightarrow líquido \rightarrow vapor
 18.53 no; no
 18.55 0.213 kg
 18.57 a) $-178 \text{ }^\circ\text{C}$ b) 1.17×10^{26} moléculas/m³
 c) la de Titán es 4.7 veces mayor que la de la Tierra
 18.59 1.92 atm
 18.61 a) 31 b) $8.41 \times 10^3 \text{ N}$ c) $7.8 \times 10^3 \text{ N}$
 18.63 a) 26.2 m/s b) 16.1 m/s , 5.44 m/s
 c) 1.74 m
 18.65 5.0×10^{27}
 18.67 a) igual energía cinética traslacional; A tiene mayor rapidez rms b) B
 c) $4250 \text{ }^\circ\text{C}$ d) B
 18.69 b) 303 mol/m^3 c) van der Waals
 18.71 a) $4.65 \times 10^{-26} \text{ kg}$ b) $6.11 \times 10^{-21} \text{ J}$
 c) 2.04×10^{23} moléculas d) $1.24 \times 10^4 \text{ J}$
 18.73 b) r_2 c) $r_1 = R_0/2^{1/6}$, $r_2 = R_0$, $r_1/r_2 = 2^{-1/6}$
 d) U_0
 18.75 a) 517 m/s b) 299 m/s
 18.77 b) $1.40 \times 10^3 \text{ K}$, $1.01 \times 10^4 \text{ K}$
 c) $6.37 \times 10^3 \text{ K}$, $4.59 \times 10^2 \text{ K}$
 18.79 a) $1.24 \times 10^{14} \text{ kg}$ b) 4.16×10^{11}
 c) $2.95 \times 10^{-16} \text{ m}$, no
 18.81 a) $2R = 16.6 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ b) menor
 18.83 CO_2 : $20.79 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, 0.270 ; SO_2 : $24.94 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, 0.205 ; H_2S : $24.94 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$, 0.039
 18.87 b) $0.0420N$ c) $(2.94 \times 10^{-21})N$
 d) $0.0297N$, $(2.08 \times 10^{-21})N$ e) $0.0595N$, $(4.15 \times 10^{-21})N$
 18.89 42.6%
 18.91 a) $4.5 \times 10^{11} \text{ m}$ b) 703 m/s , $6.4 \times 10^8 \text{ s}$ (aprox. 20 años), no c) $1.4 \times 10^{-14} \text{ Pa}$
 d) aprox. 650 m/s ; evaporarse
 f) $2 \times 10^5 \text{ K}$; no
 18.93 d) $T_c = 8a/27Rb$, $(V/n)_c = 3b$
 e) $p_c = a/27b^2$ f) $8/3$ g) 3.28 , 3.44 , 4.35

Capítulo 19

- 19.1 b) 1330 J
 19.3 b) -6540 J
 19.5 a) 0.88 atm
 19.7 a) $(p_1 - p_2)(V_2 - V_1)$ b) el negativo del trabajo realizado en dirección contraria
 19.9 a) $3.78 \times 10^4 \text{ J}$ b) $7.72 \times 10^4 \text{ J}$ c) no
 19.11 a) 410 J b) se eleva
 19.13 a) 16.4 min b) $139 \text{ m/s} = 501 \text{ km/h}$
 19.15 a) cero b) $T_b = 2T_a$ c) $U_b = U_a + 400 \text{ J}$
 19.17 a) positivo b) I: positivo; II: negativo
 c) entra d) I: entra; II: sale
 19.19 a) $1.67 \times 10^5 \text{ J}$ b) $2.03 \times 10^6 \text{ J}$
 19.21 b) 208 J c) en el pistón d) 712 J
 e) 920 J f) 208 J
 19.23 a) 948 K b) 900 K
 19.25 $2/5$
 19.27 a) $25.0 \text{ }^\circ\text{C}$ b) $17.9 \text{ }^\circ\text{C}$ c) a
 19.29 a) -605 J b) 0 c) sí, 605 J , libera
 19.31 a) 747 J b) 1.30
 19.33 a) $4.76 \times 10^5 \text{ Pa}$ b) $-1.06 \times 10^4 \text{ J}$
 c) 1.59 ; se calienta
 19.35 $5.1 \times 10^3 \text{ J}$; aumenta; aumenta
 19.37 b) 224 J c) $Q = 0$ d) -224 J
 19.39 $11.6 \text{ }^\circ\text{C}$
 19.41 a) aumenta b) 4800 J
 19.43 a) 45.0 J b) libera 65.0 J
 c) $Q_{ad} = 23.0 \text{ J}$, $Q_{ab} = 22.0 \text{ J}$
 19.45 a) igual b) absorbe 4000 J
 c) absorbe 8000 J
 19.47 b) -2460 J
 19.49 a) 1173 K b) $1.22 \times 10^4 \text{ J}$

- c) $4.26 \times 10^4 \text{ J}$ d) $4.57 \times 10^4 \text{ J}$
 19.51 -0.226 m^3
 19.53 a) $4.32 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ b) 648 J
 c) $7.15 \times 10^2 \text{ J}$ d) $7.14 \times 10^5 \text{ J}$
 e) no hay diferencia sustancial
 19.55 $3.4 \times 10^3 \text{ J/kg}$
 19.57 b) $11.9 \text{ }^\circ\text{C}$
 19.59 a) 0.173 m b) $206 \text{ }^\circ\text{C}$ c) $7.46 \times 10^4 \text{ J}$
 19.61 a) $Q = 300 \text{ J}$, $\Delta U = 0$ b) $Q = 0$, $\Delta U = -300 \text{ J}$ c) $Q = 750 \text{ J}$, $\Delta U = 450 \text{ J}$
 19.63 a) $W = 738 \text{ J}$, $Q = 2588 \text{ J}$, $\Delta U = 1850 \text{ J}$
 b) $W = 0$, $Q = -1850 \text{ J}$, $\Delta U = -1850 \text{ J}$
 c) 0
 19.65 a) $W = -187 \text{ J}$, $Q = -654 \text{ J}$, $\Delta U = -467 \text{ J}$
 b) $W = 113 \text{ J}$, $Q = 0$, $\Delta U = -113 \text{ J}$
 c) $W = 0$, $Q = 580 \text{ J}$, $\Delta U = 580 \text{ J}$
 19.67 a) 360 K , $2.67 \times 10^2 \text{ Pa}$ b) 1.14 L

Capítulo 20

- 20.1 a) 6500 J b) 34%
 20.3 a) 23% b) $12,400 \text{ J}$ c) 0.350 g
 d) $222 \text{ kW} = 298 \text{ hp}$
 20.5 a) 25% b) 970 MW
 20.7 13.8
 20.9 a) $1.62 \times 10^4 \text{ J}$ b) $5.02 \times 10^4 \text{ J}$
 20.11 a) 767 W b) 7.27
 20.13 a) 215 J b) 378 K c) 39.1%
 20.15 a) $4.2 \times 10^4 \text{ J}$ b) 715 K
 20.17 a) 492 J b) 212 W c) 5.4
 20.19 a) 400 W b) 10.7 c) 36.9 kg
 20.21 4500 J
 20.23 37.1 hp
 20.25 a) 428 J/K b) -392 J/K c) 36 J/K
 20.27 a) irreversible b) $+1.25 \times 10^4 \text{ J/K}$; congruente
 20.29 6.31 J/K
 20.31 a) $6.05 \times 10^3 \text{ J/K}$ b) cinco veces mayor en el caso de vaporización
 20.33 galio: $+6.63 \text{ J/K}$; mano: -6.48 J/K ; mayor para el galio
 20.35 a) no b) 18.3 J/K c) 18.3 J/K
 20.37 a) 0.200 b) 8000 J
 20.39 a) 27.8 K b) 15.3 K
 20.41 b) absorbido: bc ; despedido: ab, ca
 c) $T_a = T_b = 241 \text{ K}$, $T_c = 481 \text{ K}$
 d) $Q_{\text{neto}} = W_{\text{neto}} = 610 \text{ J}$ e) 8.7%
 20.43 a) entra: $2.10 \times 10^4 \text{ J}$; sale: $1.66 \times 10^4 \text{ J}$
 b) $4.4 \times 10^3 \text{ J}$; 21% c) la máxima es $e = 67\%$
 20.45 a) 7.0% b) $3.0 \times 10^6 \text{ J/s}$; $2.8 \times 10^6 \text{ J/s}$
 c) $6 \times 10^5 \text{ kg/h} = 6 \times 10^5 \text{ L/h}$
 20.47 a) $p_1 = 2.00 \text{ atm}$, $V_1 = 4.00 \text{ L}$; $p_2 = 2.00 \text{ atm}$, $V_2 = 6.00 \text{ L}$; $p_3 = 1.11 \text{ atm}$, $V_3 = 6.00 \text{ L}$; $p_4 = 1.67 \text{ atm}$, $V_4 = 4.00 \text{ L}$
 b) (i) $Q = 1422 \text{ J}$, $W = 405 \text{ J}$
 (ii) $Q = -1355 \text{ J}$, $W = 0$
 (iii) $Q = W = -274 \text{ J}$ (iv) $Q = 339 \text{ J}$, $W = 0$ c) 131 J d) 7.5% ; $e_{\text{Carnot}} = 44\%$
 20.49 a) $a \rightarrow b$: $Q = 2.25 \times 10^3 \text{ J}$, $W = 0.90 \times 10^3 \text{ J}$, $\Delta U = 1.35 \times 10^3 \text{ J}$; $b \rightarrow c$: $Q = -2.40 \times 10^3 \text{ J}$, $W = 0$, $\Delta U = -2.40 \times 10^3 \text{ J}$; $c \rightarrow a$: $Q = 0.45 \times 10^3 \text{ J}$, $W = -0.60 \times 10^3 \text{ J}$, $\Delta U = 1.05 \times 10^3 \text{ J}$ b) $Q = W = 0.30 \times 10^3 \text{ J}$, $\Delta U = 0$ c) 11.1%
 20.51 $\left(\frac{T_H - T'}{T_H}\right)\left(\frac{T' - T_C}{T'}\right)$; menor
 20.53 a) 122 J , 78 J b) $5.10 \times 10^{-4} \text{ m}^3$
 c) $p_b = 2.32 \times 10^6 \text{ Pa}$, $V_b = 4.81 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $T_b = 771 \text{ K}$; $p_c = 4.00 \times 10^6 \text{ Pa}$, $V_c = 4.81 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $T_c = 1333 \text{ K}$; $p_d = 1.47 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_d = 5.10 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $T_d = 518 \text{ K}$ d) $e = 61.1\%$; $e_{\text{Carnot}} = 77.5\%$
 20.55 b) $6.20 \times 10^4 \text{ J}$ c) $3.42 \times 10^4 \text{ J}$
 d) antes: $6.20 \times 10^4 \text{ J}$; después: $3.42 \times 10^4 \text{ J}$
 20.57 a) 88.5 J b) 17.7 J
 20.59 a) $b \rightarrow c$: $nC_V \ln(T_c/T_b)$; $d \rightarrow a$: $nC_V \ln(T_a/T_d)$
 b) $nC_V \ln\left(\frac{T_c T_a}{T_b T_d}\right)$
 20.61 a) -143 J/K b) $+196 \text{ J/K}$ c) cero
 d) $+53 \text{ J/K}$

CRÉDITOS DE FOTOGRAFÍAS

Acerca del autor Hugh D. Young; John P. Surey

Capítulo 1 Foto inicial: NASA; 1.1a: G. Ross/Photo Researchers, Inc.; 1.1b: NASA; 1.4: National Institute of Standards and Technology (NIST); 1.5a: R. Williams (STScI), equipo HDF-S y NASA; 1.5b: SOHO (ESA & NASA); 1.5c: Cortesía de NASA/JPL/Caltech; 1.5d: Photodisc Green/Getty Images; 1.5e: Chad Baker/PhotoDisc/Getty Imagen, 15f: Purdue University. Veeco Instruments, Inc.; 1.5g: SPL/Photo Researchers; 1.6: Pearson Addison Wesley, San Francisco, California; 1.7: ND-Violet/Roger Violet/Liaison Agency, Inc.

Capítulo 2 Foto inicial: Mike Hewitt/Getty Images; 2.4: Pete Saloutos/Corbis; 2.5: DiMaggio/Kalish/Corbis; 2.22: Richard Megna/Fundamental Photographs; 2.26: Corbis

Capítulo 3 Foto inicial: Schlegelmilch/Corbis; 3.8: PhotoAlto/Getty Images; 3.16: Richard Megna/Fundamental Photographs; 3.19a: Richard Megna/Fundamental Photographs; 3.19b: Stuart Westmorland/Getty Images; 3.31: AFP/Getty Images

Capítulo 4 Foto inicial: Balfour Studios/Alamy; 4.12: Wayne Eastep/Getty Images; 4.17: AFP/Getty Images; 4.20: James H. Robinson/Animals Animals; 4.29: E. Klaswiter/Corbis

Capítulo 5 Foto inicial: Kevin Schafer/Peter Arnold; 5.11: NASA/Photo Researchers; 5.16: AFP/Getty Images; 5.26b: Jump Run Productions/Getty Images; 5.38b: Helen Hansma, University of California, Santa Bárbara; 5.38d: David Malin, Anglo-Australian Observatory

Capítulo 6 Foto inicial: Stephen Dalton/Photo Researchers; 6.1: Christina Hoehn/Getty Images; 6.13: Corbis; 6.26: Hulton Archive/Getty Images; 6.27a: Jeffrey H. Whitesell, Airliners of America; 6.27b: Jeffrey H. Whitesell, Airliners of America

Capítulo 7 Foto inicial: Mark A. Johnson/Corbis; 7.1: Purestock/Alamy; 7.3a: Dennis O'Clair/Getty Images; 7.5: Joe McBride/Corbis; 7.12: Phil Mislinski/ Omni-Photo Communications; 7.15: Arco Images/Alamy; 7.21: The Picture House/Alamy

Capítulo 8 Foto inicial: Getty Images; 8.2: David Woods/Corbis; 8.4: Jim Cummins/Getty Images; 8.6a: Andrew Davidhazy; 8.16: Getty Images; 8.21: David Leah/Getty Images; 8.29: Richard Megna/Fundamental Photographs; 8.33: NASA

Capítulo 9 Foto inicial: George Hall/Corbis; 9.19: José Azel/Aurora Photos; 9.38: NASA

Capítulo 10 Foto inicial: Reuters/Corbis; 10.7: Corbis; 10.14: picturesbyrob/Alamy; 10.17: Pete Saloutos/Corbis; 10.22: Lester Lefkowitz/Getty Images; 10.28: Gerard Lacz/Natural History Photographic Agency

Capítulo 11 Foto inicial: Ruth Tomlinson/Getty Images; 11.3: Jeremy Woodhouse/Getty Images; 11.12a: Walter Bibikow/Getty Images; 11.126: Jonathan Blair/Corbis; 11.12c: Photodisc Green/Getty Images

Capítulo 12 Foto inicial: NASA/JPL/Space Science Institute; 12.3: NASA/JPL/Caltech; 12.6: NASA; 12.7: George Hall/Corbis; 12.13: NASA; 12.16: NASA; 12.17a: NASA; 12.17b: NASA; 12.18: NASA; 12.21: Smithsonian Astrophysical Observatory; 12.27: NASA/Johnson Space Center; 12.28: NASA; 12.29: NASA; 12.30: Keck/UCLA Galactic Center Group

Capítulo 13 Foto inicial: Mark Antman/The Image Works; 13.7: American Diagnostic Corporation; 13.21a: Frank Herholdt/Getty Images; 13.25: Christopher Griffin/Alamy; 13.29a: AP/Wide World Photos; 13.29b: AP/Wide World Photos

Capítulo 14 Foto inicial: Digital Vision/AGE Fotostock; 14.2: Nicholas Pinturas/Getty Images; 14.7: Cenco Physics; 14.10b: Photodisc Green/Getty Images; 14.15: Robert B. Suter, Vassar College; 14.20: Pearson Addison

Wesley; 14.21: Cordelia Molloy/Photo Researchers; 14.28: Digital Vision/AGE Fotostock; 14.30a: Photodisc Green/Getty Imagen; 14.30b: Colin Barker/ Getty Images, 14.31f: The Harold E. Edgerton 1992 Trust, Palm Presa, Inc.

Capítulo 15 Foto inicial: David Hume Kennerly/Getty Imagen; 15.2: Tony Arruza/Corbis; 15.12: R. Dolan/Camerique/H. Armstrong Roberts; 15.18: Reproducida de *PSSC Physics*, 2a. ed. (1965), D.C. Heath & Company with Educational Development Center, Inc., Newton Massachusetts; 15.25: Photodisc Green/Getty Images; 15.27: National Optical Astronomy Observatories

Capítulo 16 Foto inicial: John Powell/The Image Works; 16.5a: Lisa Pines/Getty Images; 16.5c: David Young-Wolff/PhotoEdit Inc.; 16.6: Dorling Kindersley; 16.9: Bernard Benoit/Photo Researchers; 16.10: Eastcott-Momatiuk/The Image Works; 16.20: Martin Bough/Fundamental Photographs; 16.25: David Young-Wolff/PhotoEdit Inc.; 16.28: Mark Reinstein/The Image Works; 16.36: NASA/Robert A. Hoover, Dryden Flight Research Center

Capítulo 17 Foto inicial: Cameramann/The Image Works; 17.4: Exergen Corporation; 17.11: NASA/Jim Ross, Dryden Flight Research Center; 17.13: Marshall Henrichs; 17.18: Paul Seheult/Corbis; 17.19: Adam Hart-Davis/Photo Researchers; 17.20: Richard Megna/Fundamental Photographs; 17.22: John Giustina/Getty Images; 17.24: Russ Underwood, Lockheed Martin Missiles & Space Company, Inc.; 17.28: Nancy Rogers; 17.29: Dr. Arthur Tucker/Photo Researchers

Capítulo 18 Foto inicial: James Marshall/The Image Works; 18.2: John Powell/ The Image Works; 18.10: Park Scientific Instruments; 18.13: Stone/Getty Images; 18.14: Tatsuyuki Tayama/The Image Works; 18.16: David Grossman/ The Image Works; 18.25: PhotoDisc/Getty Images; 18.28: Royal Observatory, Edinburgh/Anglo-Australian Observatory; 18.30: David Malin, AngloAustralian Observatory

Capítulo 19 Foto inicial: Richard A. Cooke III/Getty Images; 19.1: John P. Surey; 19.2a: PhotoDisc/StockTrek/Getty Images; 19.2b: Lawrence Migdale/Photo Researchers; 19.10: John Kelly/Getty Images; 19.14: Toro Branch/Photo Researchers; 19.15: Patrick Watson/The Image Works; 19.32: Thomas Eisner and Daniel Aneshansley

Capítulo 20 Foto inicial: Stock Food/Getty Images; 20.2: Bruno Pousse/AGE Fotostock; 20.12: Bill Bachman/Photo Researchers; 20.16: Mark Wagner/Getty Images; 20.17: Erich Schrepp/Photo Researchers; 20.21: Paul Silverman/Fundamental Photographs; Summary: Paul Silverman/Fundamental Photographs

Capítulo 21 Foto inicial: Ilija C. Hendel/The Image Works; 21.5: Journal-Courier/The Image Works; 21.8a: Richard Megna/Fundamental Photographs; 21.30a: Reproducida de *PSSC Physics*, 2a. ed. (1965), D.C. Heath & Company with Education Development Center, Inc., Newton, Massachusetts; 21.316: Tony Craddock/Photo Researchers

Capítulo 22 Foto inicial: Department of Energy/Photo Researchers; 22.10: AKG London Ltd.; 22.28b: Russ Kinne/Comstock

Capítulo 23 Foto inicial: Ted Kurihara/Getty Images; 23.9: NASA/JPL/Caltech; 23.11: © Lester V. Berman/Corbis; 23/13: Fermilab Visual Media Services; 23.18: Hulton Archive/Keystone/Getty Images; 23.23: U.S. Geological Survey, Denver

Capítulo 24 Foto inicial: Digital Vision/Agfotostock; 24.3: Design Pies/ Indexstock; 24.4: Andrew Lambert/Photo Researchers; 24.7: Paul Silverman/ Fundamental Photographs; 24.11: Sandia National Laboratories; 24.17: Stanford Linear Accelerator/Science Photo Library/Photo Researchers

Capítulo 25 Foto inicial: David Sacks/Getty Images; 25.4: Fundamental Photographs; 25.5: PhotoDisc/Getty Images; 25.8: Mitch Wojnarowicz/The Image Works; 25.13: Doug Scott/Agfotostock

Capítulo 26 Foto inicial: Maximilian Stock/Photo Researchers; 26.2: Corbis; 26.5: John P. Surey; 26.13: John P. Surey; 26.18: Richard Megna/Fundamental Photographs; 26.20: Mehau Kulyk/Photo Researchers; 26.26a: Banana Stock/Alamy; 26.26b: Wikipedia

Capítulo 27 Foto inicial: Simon Fraser/Photo Researchers; 27.2b: Bill Aron/PhotoEdit Inc.; 27.20: Cenco; 27.20b: Paul McCormick/Getty Images; 27.21: Lawrence Berkeley National Laboratory; 27.40: Jeremy Burgess/Photo Researchers

Capítulo 28 Foto inicial: David Parker/Photo Researchers; 28.8: Definitive Stock; 28.11: Jeremy Walker/Photo Researchers; Test Your Understanding, page 976: Mark Antman/The Image Works

Capítulo 29 Foto inicial: James Leynse/Corbis; 29.9: Maximilian Stock Ltd./Photo Researchers; 29.18a: Photodisc Red/Getty Images; 29.18b: Toyota/AP Wide World; 29.18c: CIRRUS Design Corporation; 29.20b: NASA/JPL/Caltech; 29.26: Ken Gatherum, Boeing Computer Services

Capítulo 30 Foto inicial: Martin Barraud/Getty Images; 30.7: Photodisc/Getty Images; 30.10: John Walsh/Photo Researchers

Capítulo 31 Foto inicial: John P. Surey & Caroline J. Robillard; 31.5: Rubberball/Getty Images; 31.14: Lawrence Migdale/Photo Researchers; 31.22: John P. Surey; 31.23: Roger A. Freedman

Capítulo 32 Foto inicial: David Davis Photoproductions; 32. L Bettmann/Corbis; 32.2a: Peter Barrett/Masterfile; 32.2b: Malcolm Fife/Getty Images; 32.16: The Image Bank/Getty Images; 32.18: Volker Steger/Photo Researchers; 32.20: NASA/JPL-Caltech/E.Churchwell (Universidad de Wisconsin-Madison); 32.23: Michael Porsche/Corbis

Capítulo 33 Foto inicial: Peter Aprahamian/Photo Researchers; 33.1: Michael Newman/PhotoEdit; 33.2: National Institutes of Health/Photo Researchers; 33.9: Roger A. Freedman; 33.10a: NASA/John E Kennedy Space Center; 33.10b: Spencer Grant/PhotoEdit; 33.13b: Susan Schwartzberg, The Exploratorium; 33.16: Barry S. Blanchard; 33.17: Matthias Kulka/Masterfile; 33.20a: Randy O' Rourke/Corbis; 33.22a: Dougal Walters/Getty Images; 33.22b: Pictal/AGE Fotostock; 33.26: Diane Hirsch/Fundamental Photographs; 33.31 Sepp Seitz/Woodfin Camp & Associates; 33.33: Dennis Frates/Alamy; 33.37a: K. Nomachi/Photo Researchers

Capítulo 34 Foto inicial: Tek Image/Photo Researchers; 34.8: Marshall Henrichs; 34.12a: NASA; 34.12b-c: Oficina Central NASA; 34.23: PhotoLink/Getty Images; 34.27: Richard Megna/Fundamental Photographs; 34.34: PhotoDisc/Getty Images; 34.41a-c: Marshall Henrichs; 34.43c: THK Photo Products, Inc.; 34.44: Omikron/Photo Researchers; 34.52c: Jan Hinsch/Photo Researchers; 34.54d: National Optical Astronomy Observatories

Capítulo 35 Foto inicial: Paul A. Souder/Corbis; 35.11: Peter Aprahamian/Photo Researchers; 35.17b: Bausch & Lomb Incorporated; 35.18: Bausch & Lomb Incorporated

Capítulo 36 Foto inicial: Digital Vision/Getty Images; 36.2a-b: Tomadas de Sears, Zemansky y Young, *College Physics*, 7a. ed., ©1991, Pearson Addison Wesley; 36.6: Pearson Addison Wesley; 36.9b: Richard Megna/Fundamental Photographs; 36.11: Dane Homsleth; 36.12b: Pearson Addison Wesley; 36.17: Tom Boyden Photography; 36.18: Photodisc Green/Getty Images; 36.19a: NSO/AURA/NSF; 36.19b: Physics Dept., Imperial College/Photo Researchers; 36.21b: Estate of Bertram Eugene Warren; 36.25: Science Photo

Library/Photo Researchers; 36.27: Tomada de Sears, Zemansky y Young, *College Physics*, 7a. ed., ©1991, Pearson Addison Wesley; 36.28a-c: Tomadas de Sears, Zemansky y Young, *College Physics*, 7a. ed., ©1991, Pearson Addison Wesley; 36.29a: National Radio Astronomy Observatory/Associated Universities, Inc./National Science Foundation; 36.29b: European Southern Observatory; 36.32: Paul Silverman/Fundamental Photographs

Capítulo 37 Foto inicial: Brookhaven National Laboratory/Corbis; 37.4: Güven Güner/Alamy; 37.7: NASA/John F. Kennedy Space Center; 37.11: Jack Fields/Photo Researchers; 37.18: Adam Hart-Davis/Photo Researchers; 37.19: NASA y el equipo del proyecto Hubble Heritage (STScI/AURA); 37.22: Digital Vision/Getty Images; 37.26: Mauro Fermariello/Photo Researchers

Capítulo 38 Foto inicial: NOAO/AURA/NSF; 38.2a: SPL/Photo Researchers; 38.2b: ITT Industries Night Vision; 38.10b: Andrew Lambert/Photo Researchers; 38.12: N. A. Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF; 38.14: American Institute of Physics/Emilio Segré Visual Archives; 38.29: Michael Donne/Photo Researchers; 38.30: Royal Swedish Academy of Sciences; 38.33: Tomada de Huggins, *Physics I*, ©1968, por W.A. Benjamin, Inc. Pearson Addison Wesley

Capítulo 39 Foto inicial: Steve Gschmeissner/Photo Researchers; 39.1: AIP Meggers Gallery of Nobel Laureates; 39.5: Reproducida de *PSSC Physics*, 2a ed. (1965), D.C. Heath & Company with Educational Development Center, Inc., Newton Massachusetts; 39.9b: Tomada de Huggins, *Physics I*, © 1968, W.A. Benjamin, Inc. Pearson Addison Wesley; 39. 10b: Steve Gschmeissner/Photo Researchers; 39.11: JGI/Agfotostock; 39.12: American Institute of Physics/Emilio Segré Visual Archives; 39.13: UPI/Corbis

Capítulo 40 Foto inicial: Dr. Dmitry Talapin; 40.10: Almaden Research Center/Research Division; 40.14b: Veeco Instruments, Inc.

Capítulo 41 Foto inicial (a): Andrew Lambert/Photo Researchers; Foto inicial (b): Simon Fraser/Photo Researchers; 41.3: NASA; 41.7a-b: National Optical Astronomy Observatories; 41.15: National Radio Astronomy Observatory/Associated Universities, Inc./National Science Foundation; 41.16: American Institute of Physics/Emilio Segré Visual Archives; 41.18: Warren Bolster/Getty Images

Capítulo 42 Foto inicial: NASA; 42.9: Roger A. Freedman; 42. 10b: Cortesía de The Met Office (<http://www.met-office.gov.uk>); 42.15: Definitive Stock; 42.29: Stanford University, cortesía de AIP Emilio Segré Visual Archives; 42.38: PhotoDisc/Getty Images; 42.39: NASA

Capítulo 43 Foto inicial: MEXECRI, Inc.; 43.1b: Science Photo Library/Photo Researchers; 43.7: Lloyd Cluff/Corbis; 43.11: Department of Nuclear Medicine, Charing Cross Hospital/Photo Researchers; 43.18: David Malin, Royal Observatory Edinburgh & Anglo-Australian Observatory; 43.19: LLNL/Photo Researchers; Summary: Department of Nuclear Medicine, Charing Cross Hospital/Photo Researchers

Capítulo 44 Foto inicial: NASA; 44.1: Lawrence Berkeley National Laboratory; 44.3: Ernest Orlando, Lawrence Berkeley National Laboratory; 44.7: Fermilab Visual Media Services; 44.8: Brookhaven National Laboratory; 44.9: Mark R. Lowenstine; 44.14: Instituto para la Investigación de Rayos Cósmicos, Universidad de Tokyo; 44.18: European Southern Observatory; 44.20: N.A. Sharp, programa REU NOAO/AURA/NSF; 44.21: NASA/WMAP/Science Team; Resumen (colisiones de partículas): Brookhaven National Laboratory; Resumen (nebulosa): N.A. Sharp, programa REU NOAO/AURA/NSF

ÍNDICE

Nota: Las páginas en **negritas** indican figuras, y las páginas en *cursivas* señalan tablas.

A

absorción, radiación y, 597
Academia Francesa de Ciencias, 4
aceites lubricantes, 150
aceleración
 al viajar en un vehículo, **114**
angular
 cálculo de la, 289-290
 constante, 290-292
 de un cuerpo rígido, 319-322
 definición de, 289, 316
 instantánea, 289
 media, 289
 rotación con, 290-292
cambiante, 58-59
centrípeta
 definición de, 158
 fuerza neta y, 404
 máxima, 161
 panorama de la, 89-90
 satélites y, 394
componentes de la
 paralelas, 77-78
 perpendiculares, 77-78
 tangenciales, 293-294
constante, 47-53, 59, 290-292
de un cohete, 272
de un esquiador, **79, 82**
de un yo-yo, **327**
de una esfera rodante, 327-328
debida a la gravedad
 centro de gravedad y la, 355-357
 cuerpos en caída libre, 54
 en una espira, 90
 gravitación y la, 384, 388
 lanzamiento de un disco, 295
 masa, peso y la, 120-122, 138
 mono que cae, **87**
 presión en un fluido, 459
 trayectoria de proyectiles, 79
definición de, 43
dos cuerpos con la misma, 147-148
 magnitud de, 148-149
en el movimiento
 armónico simple, 425-428, 430-431
 de proyectiles y la, 80
 en caída libre y la, 54, 56
en ondas senoidales, 496-497
en una gráfica
 v_x-t , 45-47
 $x-t$, 45-47
fuerza y, 118-120
hacia abajo de una colina, 145-147
instantánea
 angular, 289
 cálculo de la, 76-77
 definición de la, 75
 movimiento circular uniforme y, 88-89
 panorama de la, 44-45
lateral, 161
lineal, 293-296
media (promedio)
 angular, 289
 cálculo de la, 76-77
 definición de, 75
 en x , 43
 panorama de la, 43-44
paralela, 77-78
perpendicular, 77-78
peso aparente en los elevadores, 145
primera ley de Newton del movimiento y la, 111

radial, 90, 158-159
segunda ley de Newton del movimiento y la, 115-123
transversal, 497, 510-511
velocidad y, 43
acondicionadores de aire, 647, 681, **682**
acróbata, 316
acuoducto, **354**
adelantar, 419, 434
adiabático, 646, 656-672
adiciones
 cifras significativas, 9
 de vectores, 13-15
afelio, 397
agua
 calor específico del, 583, 585
 cambios de fase del, **586**
 de mar
 densidad del, 457, 464, 641
 ebullición del, 656
 escala Kelvin y el, 575
 evaporación del, **589**
 expansión térmica del, 580
 mezclar tinta con, **696**
 superenfriada, 588
agujero(s)
 al centro de la Tierra, 384-385, 402-403
 negros, 405-409
 supermasivos, 408
aire
 amplitud de una onda sonora en el, 530
 conductividad térmica del, 592-593
 densidad del, 457-458
 efecto Doppler y el, 556
 en tanques de buceo, 614
 fuerza del, 459
 intensidad de una onda sonora en el, 538
 rapidez del sonido en el, 536
aislante(s)
 aire tranquilo como, 593
 definición de, 571
 ideal, 571
aleatoriedad, 674
alerón, 472
almacenamientos de calor, 675-676
altavoces **546, 548-549, 550**
alunizaje, 65
Amaltea (luna), **385**
amortiguamiento
 crítico, 441
 definición de, 440
 sobreamortiguamiento, 441
amplitud
 campos magnéticos y la, 933
 de los péndulos, 437
 de oscilaciones amortiguadas, 440
 forzadas, 442
 definición de, 42
 desplazamiento de, 528, 537-539
 en el movimiento armónico simple, 424
 latidos y la, 551
 longitud de onda y, 490
 presión y, 529-531, 537-539
 vibraciones de las moléculas y, 435
análisis de Fourier, 531-532
ángulo(s)
 de fase, 426
 de vectores, 16
 letras griegas para los, 73
 producto escalar y, 23-24
antineutrino, 281
antinodo(s), 507-509, 541-542, 544
 de presión, 542-544
 del desplazamiento, 541-542, 544
argón, 436, 564, 592

Aristóteles, 53
armónicos, 512
arrastre del aire (resistencia del aire)
 definición del, 149
 fuerza de retroceso y el, 113
 fuerzas de fricción y el, 157, 225
 movimiento de un proyectil y el, 79-82
 panorama del, 155-156
 pelota de béisbol en vuelo y el, **3**
aspas de turbinas, 333
asteroide Palas, 399
astronomía, 557
átomo(s)
 de cesio, 4
Atwood, máquina de, 169, 180
automóviles. *Véase también* Motores de combustión interna
 a lo largo de trayectorias circulares, **88**
 centro de gravedad y los, **357**
 colisiones y los, **248, 259, 260, 261**
 combustión de la gasolina en los, **231**
 compresión adiabática en los, **664**
 de la gasolina, **614**
 desplazamiento y los, **182**
 distribución del peso para los, 359-360
 hidrógeno como combustible para los, **622**
 interenfriadores en los, 671
 movimiento armónico simple en los, 433
 turbocargadores en los, 671
aves
 cantos en la pradera, **540, 541**
 centro de gravedad y, 358
avión(es)
 calentamiento de motores en los, 675
 dar vuelta en un, **162**
 elevación en las alas de los, **472**
 empuje de los, **200**
 estallidos sónicos y los, 558-559, **560**
 hélices y los, **295, 552**
 peso y los, **388**
 velocidad relativa y los, **91**
 vuelo en vientos cruzados y los, **94-95**
B
bailarinas, 334-335
balance de un resorte, 109
balanceo de llantas, 333
balanza
 de brazos iguales, **123**
 de resorte, **194**
 de torsión de Cavendish, **385**
"bamboleo" de las estrellas, 400
barómetro de mercurio, **461, 462**
barra(s), **303, 304**
 caminata en la, **358**
barrera del sonido, 174, 558-560
béisbol
 altura de la conservación de la energía y el, **216, 217**
 rango y, 84-85
 arrastre del aire y el, 157
 energía cinética en el, **250**
 lanzamiento, **218, 219**
 más rápido medido, 64
 modelo idealizado, **3**
 resistencia del aire y el, 82
Bell, Alexander Graham, 539
Bernoulli, ecuación de, 468-469
bicicletas
 aceleración angular de las, 289
 centro de masa de las, **326**
 engranes de, velocidad angular, **296**
 movimiento rotacional de las, 329
 velocidad relativa de las, 91
boca, del tubo de un órgano, 543

- bocinas. Véase Altavoces
- bolas
- curvas, 474-475
 - de billar, **191, 262**
 - de boliche, **263, 327, 328**
 - que giran, 474, **475**
- Boltzmann, constante de, 622, 627
- bomba de calor, 682
- bombillas
- potencia y, 199
 - del sonido y, 538
 - temperatura de operación de las, 605
- botellas de vacío ("Thermos"), 597
- Brahe, Tycho, 107, 397
- brazo
- de palanca (brazo de momento), 317
- brechas de Kirkwood, 416
- Buckmaster, H. A., 105
- Burroughs, Edgar Rice, 403
- C**
- caballo de potencia, **199**
- cables
- de elevador, 144-145
 - que se desenrollan, 299-301, 321-322
- caída libre
- definición de, 53
 - panorama de la, 53-57
 - segunda ley de Newton del movimiento y la, 121
- "cálculos en la servilleta", 11
- calidad, 532
- calor. Véase también Temperatura
- calorimetría y, 586-591
 - cantidad de, 582-586
 - conversión a trabajo y, 683
 - de combustión, 589
 - de fusión, 586
 - de sublimación, 588
 - de vaporización, 587
 - definición de, 582
 - desperdicio de, 675
 - específico
 - definición de, 583-584
 - del agua, 583, 585
 - molar, 584, 585-586
 - razón de, 661
 - latente de fusión, 586
 - temperatura *versus*, 582
 - termodinámica y el, 647, 650-651
- caloría, 582
- calorimetría, 586-591
- cambio de fase
- calorimetría y, 586-591
 - combustión y, 591
 - de frecuencia, 552, 557
 - de temperatura y, 590
 - definición de, 586
 - diagramas de fase pT y, **632**
 - permanente, 540
 - transferencia de calor en el, 586
- caminar
- rapidez común al, 8
 - ritmo natural al, 439
 - sobre una tabla, **358**
 - tercera ley de Newton y el acto de, **127**
- campos gravitacionales, 232, 387
- cantidad(es)
- de calor, 582-586
- escalares
- definición de, 11
 - esfuerzo de tensión como, 364
 - panorama de las, 11-14
 - potencia y, 199
 - presión como, 364
 - productos de vectores y las, 21-22
 - trabajo como, 183, 185
- física y las, 4
- vectoriales
- aceleración como, 43, 75
 - cantidad de movimiento como, 248, 254, 257, 331
 - definición de las, 11
 - fuerza como, 108
 - impulso como, 249
 - torca como, 318
 - velocidad media y las, 37, 40
- capa de frontera, 473
- capacidad(es)
- calorífica molar
 - a presión constante, 659
 - a volumen constante, 65
 - de los gases, 626, 660
 - panorama de la, 584, 585-586
 - de calor
 - de los gases, 626-628, 660
 - de los sólidos, 628-629
 - definición de, 585
- carga eléctrica
- agujeros negros y, 407
 - átomos y, 164
 - fuerzas magnéticas y, 164
 - moléculas y, 631
 - pasar un peine por el pelo y la, 164
 - repulsión y, 233, 617
- Carlyle, Roy "Dizzy", 102
- carros. Véase Automóviles
- Cavendish, Henry, 385
- balanza de torsión de, 385
- CEE (calificación de eficiencia de energía), 681-682
- centro
- de gravedad, 355-358
 - de masa
 - movimiento planetario y el, 400
 - panorama del, 266-269
 - torca y el, 320
 - traslación y rotación combinadas y el, 324
 - de precesión, 352
 - geométrico, 267, 324, 357-358
- cero absoluto, 576, 690,
- chelo, **514**
- chinche de agua, **465, 675**
- chinoos* (un tipo de viento), 671
- ciclo; 420
- de Carnot
 - definición del, 684
 - entropía y el, 694-695
 - etapas del, **685, 686-689**
 - refrigeradores y el, 688-689
 - segunda ley de la termodinámica y el, 689
 - temperatura Kelvin y el, 686, 690
 - de Otto, **678-679**
 - Diesel, **664, 679, 680**
- cicloide, 104
- cifras significativas, 9-10
- cilindro(s)
- cálculos del momento de inercia y, 304
 - centro de gravedad y, 357
 - del motor, 707
 - huecos, **304**
- cinemática, 36, 107, 293-296
- angular, 293-296
 - lineal, 293-296
- cinturón de asteroides, 416
- circuitos $R-L$
- círculo(s)
- de referencia, 423, 453
 - verticales, 162, **163, 220-221**
 - clarinete, 419, 531, **532, 546**
 - Clausius, enunciado de, 683
- cobalto, 57-60
- cocción
- cálculos de calor de, 590-591
 - como proceso isobárico, **657**
- coeficiente
- de arrastre, 157-158, 210
 - de expansión lineal, 576, 577-578
 - volumétrica, 578, 579-580, 611
 - de fricción cinética, 150
 - en rodamiento, 155
 - estática, 155
 - de rendimiento, 680
- de restitución, 282-283
 - de temperatura de la expansión volumétrica, 611
- colisión(es)
- angulares, 336
 - automóviles y, **248, 259, 260, 261**
 - cantidad de movimiento y, 257-262
 - completamente inelásticas, 258-261
 - de una pelota de ping-pong, **263**
 - elásticas, 258, 261-266
 - en un plano horizontal, 257
 - entre moléculas, 624-625
 - inelásticas, 258-261
 - presión de un gas y las, 620
 - rotacionales, 335-336
- columpio gigante, 172
- combustión, 589-591
- cometa
- Halley, **399, 400**
 - Hyakutake, 417
- Comité Internacional de Pesas y Medidas, 583
- componente(s)
- centrípeta de la aceleración, 294
 - del cálculo del producto escalar, 22-23
 - del producto vectorial, 25
 - de vectores, 15-20
 - definición de, 109
 - paralelas y perpendiculares de la aceleración, 77-78
 - tangenciales
 - de la aceleración, 293-294
 - de la fuerza neta, 436
 - torca y, 317-319
- comportamiento elástico, 364, 369
- compresibilidad, 367
- compresión
- cambios de volumen y, 649
 - de la gasolina en motores de automóvil, 614
 - definición de, 364
 - densidad y, 490
 - ley de Hooke y la, 194
 - libre, 699
 - procesos adiabáticos para un gas ideal y la, 662-663
- concauidad de las gráficas $x-t$, 47
- condensadores, 681-682
- condiciones
- de frontera, 505-507
 - para el equilibrio, 355
- conducción, panorama de la, 592-595
- conductividad térmica, 592
- conductores
- interacciones térmicas y, 571
- conjunto permanente, 364
- conservación
- de la energía
 - mecánica, 215
 - principio de, 181, 213, 215-219, 231-232
 - del momento angular, 333-337
 - centro de masa y la, 266-269
 - colisiones y la, 257-262, 264
 - panorama de la, 253-257
- consistencia dimensional, 7
- consonancia, 552
- constante(s)
- de Boltzmann, 622, 627
 - de fuerza efectiva, 433, 454
 - de los gases, 536, 612
 - ideales, 612
 - de proporcionalidad
 - conducción de, 592
 - ecuación de los gases ideales y la, 612
 - expansión lineal y la, 576
 - módulo de elasticidad y la, 363
 - resistencia de un fluido y la, 155
 - de Stefan-Boltzmann, 596
 - de torsión, 433
 - gravitacional, 241, 384-387
 - universales, 384
- contenido armónico, 513, 531-532

- convección, 592, 595-596
 forzada, 595
 libre, **595**
 natural, 595
- conversiones
 de las unidades de velocidad, 7-8
 de volumen, 8
- coordenada horizontal de un proyectil, 86
- Copernicus, Nicolaus, 107, 396
- corazón, potencia del, 210
- corno francés, **533**
- corriente, 466
 de calor, 592
- corrimiento al rojo
 definición del, 557
 gravitacional, 408
- crestas, 489-490
- cristales
 capacidades caloríficas de los, **628, 629**
- cuerda
 modos normales de una, 511-515
 movimiento ondulatorio de la, **488**
 ondas en una
 estacionarias, 487, **507-508, 509-515**
 senoidales, 489
 transversales, 489
 pulso ondulatorio sobre una, 489
 rapidez de onda sobre una, 498-502
 resonancia y una, 547
- cuerpo(s)
 con simetría esférica, 384-385
 extendidos, 301, 355
 humano
 como sistema termodinámico, **653**
 masa molar del, 642
 radiación del, 597
 temperatura y el, 575, 595, 603
 negro, 597
 rígidos
 aceleración angular de los, 285-290, 319-322
 cálculos del momento de inercia de los, 303-305
 cinemática lineal y angular de los, 293-296
 definición de los, 285
 energía en el movimiento rotacional de los, 296-301
 problemas de equilibrio de los, 358-363
 torca para los, 319-322
 rodantes
 aceleración de los, 327-328
 rotación con aceleración angular constante de los, 290-292
 sin resbalar, 324-326
 teorema del eje paralelo de los, 301-303
 velocidad angular de los, 285-290
 simétricos, 384-385
- curva(s)
 aceleración y, 75
 de resonancia, 547
 energía potencial gravitacional y las, 219-222
 isotermas y, **616**
 peraltada, dar vuelta en una, 161-162
 plana, rodear una, 160-161
 resonancia de las, 547
 segunda ley de Newton del movimiento y las, 116
 teorema del trabajo y la energía y las, 196-198
 vuelo de un avión y las, **162**
- curvatura
 de gráficas $x-t$, 47
 de la Tierra, 79, 393
 de una cuerda, 496
 ondas senoidales y la, 496
- D**
- decaimiento del tono, 532
- decibeles, 539, 540, 541
 definición operativa, 4
- deformación
 esfuerzo y, 363
 fricción en rodamiento y, 328
 plástica, 364
 presión y, 366
- delfines, 535
- densidad
 compresión y, 490
 de masa lineal, 498
 definición de, 389, 456
 media, 457, 464
 panorama de la, 456-458
versus presión, 612
- derivadas, 40
 parciales
 definición de las, 234, 496
 notación para las, 234
 rapidez de las ondas y las, 500, 510-511
- desaceleración, 46
- descenso en rapel, 375
- deslizador, **195, 235, 256, 258, 322**
- deslizamiento (fricción cinética), 152
- desorden, 674-675, 691-692
- desplazamiento
 angular, 286, 329
 definición de, 11, 182, 420
 en el movimiento armónico simple, 425-428
 gravitacional al rojo, 408
 movimiento armónico simple y el, 421-422
 rectilíneo y, 37-39
- destornilladores, **320**
- detonación, 679
- Dewar, James, 597
- día solar medio; 4
- diagrama(s)
 de cuerpo libre
 de una pelota lanzada, **218**
 definición de los, 127
 dinámica de partículas y los, **142**
 panorama de los, 126-127, **128**
 para cables desenrollados, **321-322**
 para columpios, **197**
 para cuerpos que caen, **142**
 para el levantamiento de pesas, **362**
 para el movimiento circular uniforme, **159, 163**
 para patinaje, **220-221**
 para tubos flojos, **319**
 para un automóvil, **140, 160-161**
 para un bloque, **152-153**
 para un carrito, **141**
 para un cartón de leche, **147**
 para un deslizador aéreo, **196**
 para un deslizador para hielo, **143, 191**
 para un elevador, **145**
 para un gimnasta, **138-139**
 para un motor, **139**
 para un péndulo cónico, **160**
 para un segmento de cuerda, **500**
 para un tobogán, **146, 154**
 para un trineo, **147, 159, 185**
 para un yo-yo, **327**
 para una cabeza de martillo que desciende, **190**
 para una caída con arrastre de aire, **157**
 para una charola de comida, **147**
 para una curva peraltada, **161**
 para una escalera, **461**
 para una estatua sumergida, **464**
 para una roca en agua, **156**
- de energía, 235-236
- de fase, 632
- de flujo de energía, **676, 677-678, 680, 684**
- de movimiento, 42-43
- pV
 ciclo de Otto y el, 679
 ciclo Diesel y el, **680**
 motor de gasolina y el, 678
 panorama del, 616-617
- TE (temperatura-entropía), 708
- diapasones, **424**
- diferencia
 de fase, 492
 de tono, 552
- difusión gaseosa, 639
- dilatación del tiempo, 408
- dina, 120
- dinámica
 de fluidos, 456
 de partículas, 142-149
 definición de, 36, 107
 del movimiento circular, 158-163
 rotacional, 316-353
 traslación y rotación combinadas, 326-328
- dióxido de carbono
 calor de sublimación y, 588
 ecuación del gas ideal y, 616
 máquinas de calor y, 675
 presión en el punto triple, 632
- dirección
 de los vectores, 11, 16-17, 36
 de movimiento, 77-78, 81
 negativa del eje x , 15, 38, 40
 positiva del eje x , 38
- disco
 de acreción, 408
 lanzamiento de, 294, **295**
- disociación, 241
- disonancia, 552
- disparar, **181**
- distancia
 desplazamiento y, 12
 fuerza gravitacional y la, 387
- distribución(es)
 de Maxwell-Boltzmann, 630-631
 esféricas de masa, 400-403
- división, 7, 9, 498-499
- dolor, umbral del, 520, 538
- Doppler, Christian, 552
 efecto Doppler, 552-557
- Drepez y Trouton, regla de, 704
- Dulong y Petit, regla de, 585, 628-629
- E**
- eco, 505, 518, 534-535
- ecuación(es)
 cuadrática, 56
 de Bernoulli, 468-474
 de continuidad, 466-468
 de estado, 611-617
 de la consistencia dimensional, 7
 de la velocidad relativa vectorial, 95
 de los gases ideales, 611-615
 de onda
 definición de la, 497
 interferencia de las ondas y las, 505-507
 movimiento ondulatorio y las, 500
 de SHM, 422-424
 de una parábola, 81
 de van der Waals, 615-616, 638
 vectorial de velocidad relativa, 95
- edificio de la Torre Sears (Chicago), **200**
- efecto Doppler
 definición del, 552
 panorama del, 552-557
 para las ondas electromagnéticas, 556-557
- eficiencia, 676-678
 térmica, 676
- Einstein, Albert, 406. *Véase también* Teoría de la relatividad
- eje
 de rotación
 aceleración angular del, 290
 cambios en la dirección del, 288, 294
 centro de masa y el, **302**
 fijo, 290, 333
 momento de inercia para el, **297**
 para cuerpos rígidos, 323-329
 torca y el, 319-320
 de simetría, 332-333, 357
 mayor, 397
 móvil, 323-329
 semimayor, 397
- elasticidad
 equilibrio y, 354-382
 propiedades moleculares de la materia y la, 617, 628

- electrones
energía y, 230, 631
libres, 592
masa y, 117
- electrónica, sobrecalentamiento, 584
- elevación, 162, 211, **472**
centro de gravedad y la, 357
ecuación de Bernoulli y, 468-469
hidráulica, **460**
peso del aire y la, 457-458
presión atmosférica y, 458-460, 587, 615
- elevator(es)
caída libre y, 394
fricción en los, **227**
mecánica de fluidos de los, 460
peso aparente en los, 145
tensión en un cable de los, 144-145
- embrague, disco del **335**, 336
- emisividad, 596
- En el núcleo de la Tierra* (Burroughs), 403
- energía
azúcar y, **583**
cinética
almacenamiento de la, 228
colisiones y la, 258
con fuerzas variables, 192-198
definición de, 181, 187
en sistemas compuestos, 191-192
molecular, 621, 623
momento lineal y, 250-253
rotacional, 297-301, 627
teorema del trabajo y, 186-192
trabajo y, 182-189
traslación y rotación combinadas, 323-324
traslacional, 627
conservación de la, 181, 213, 215-219, 231-232
de activación, 631
de enlace, 283
definición de, 181
electrones y, 230, 631
en el movimiento armónico simple, 428-432
de proyectiles, 219
en el movimiento ondulatorio, 489, 502-505
en el movimiento rotacional, 296-301
en oscilaciones amortiguadas, 441-442
equipartición de, 627
interna
de un gas ideal, 658
de sistemas aislados, 653-656
definición de, 231, 651
diagramas pV , 617
primera ley de la termodinámica y, 651-656
- mecánica
conservación de la, 215-219
oscilaciones amortiguadas y la, 441
total, 213, 215-218, 395
vehículos y, 675
- potencial
definición de, 214
diagramas de energía y, 235-236
elástica, 213, 222-228
fuerza y, 232-235
fuerza eléctrica y la, 233
Lennard-Jones, 642
pozo de, 617
trabajo y, 192-198
traslación y rotación combinadas y la, 323-324
- enfriamiento por evaporación, 588, **589**, 631
- enlaces covalentes, 455
- entropía
cambio en la fusión y, 691-692
ciclo de Carnot y, 694-695
definición de, 691
desorden y, 691-692
en los procesos cíclicos, 694-695
en procesos
irreversibles, 692, 695-696
reversibles, 692-694
expansión libre y, 693-694
interpretación microscópica de la, 697-699
- panorama de la, 690-691
segunda ley de la termodinámica y la, 696-697
- enunciado
de Clausius, 683
de Kelvin-Planck, 682
- equilibrio
bidimensional, 139-140
centro de gravedad y, 355, 358
condiciones para el, 355
de fase, 587, 616, 632
definición de, 33, 112, 136, 355
en la fase líquido-vapor, 616, 633
estable, 23
estático, 355
inestable, 235
levantamiento de pesas y, 361, **362**
neutro, 239
ondas y, 488
oscilación y, 420
partículas en, 136-142
primera condición para el, 355
problemas de cuerpo rígido y el, 358-363
procesos de casi equilibrio, 674
térmico, 571-572
termodinámico, 674
torca y, 357, 359
unidimensional, 138-139
- equipartición de la energía, 627
- error (incertidumbre)
cifras significativas y, 9-10
en las unidades de medida, 8-9
fraccional, 8
porcentual, 8
- erupción volcánica, **81-82**, 479
- escala(s)
centígrada. *Véase* Escala de temperatura Celsius
dBA, 540
de temperatura
Celsius, 536, 572-574
Fahrenheit, 573
Kelvin, 574-576, 686, 690
panorama de la, 572-573
- escaleras, **361**
- escuchar, 518, 521
escucha en movimiento, 552-557
- esfera(s)
cálculos del momento de inercia y las, **305**
distribuciones de masa y las, 400-403
gravitación y las, 384-385
hueca, **299**
- esfigmomanómetro, 462
- esfuerzo
conjunto, 366-367
cortante, 367-368
de compresión, 364-365
de tensión, 364-365
de volumen, 366-367
definición de, 363
en la espinita, 381
panorama del, 363-368
térmico, 580-582
- espín superior, en el tenis, 474
- esquiadores
aceleración de los, 79, **82**
- Estación Espacial Internacional, **395**
- estado(s). *Véase también* Energía cinética
cambios de, 656
de la materia, 586
ecuaciones de, 611-617
energía interna y los, 652-653
macroscópicos, 697
microscópicos, 697-699
termodinámicos, 650-651
"estampidos sónicos", 558-559, **560**
estándares, 4-5
estática de fluidos, 456
estimaciones, 10-11
de los órdenes de magnitud, 10-11
estiramiento, 363-368
- estrellas binarias
agujeros negros y las, **408**
de neutrones, 315, 347, 352
efecto Doppler y las, 557
masas diferentes de las, 417
iguales, 417
- evaporadores, en refrigeradores, 681-682
- exactitud, 8, 10-11
- excentricidad, 397
- expansión
del espacio, 557
isotérmica, 649
libre, 651, **693**, 694
lineal, 576, 577-578
coeficiente de, 576, 577-578
ondas de sonido y, 542
térmica, 576-582
volumétrica, 578, 579-580
- F**
- factor de congelación, 596
- fase
definición de, 494-586
de la materia, 631-634
fuera de, 548-550
- fasores, 423
- fenómeno de los limpiaparabrisas, 152
- Fermi, Enrico, 11
- feto, imagen tridimensional del, **535**
- fiebre, 584
- física, 2-4
- fiisión, definición de, 282
- flauta, 546
- flechas
disparo de, **76**
vector de, **109**
- flotación, 463-465
- fluido(s)
cambio de fase de los, 586-591
ideal, 466
presión en los, 458-463
rapidez del sonido en los, 533, 534
supercaleados, 588
- flujo de calor (transferencia de calor)
cero, 662
ciclo Carnot y el, 684
definición del, 582
de la sangre, 473-474
de lava, **473**
de melaza, 482
en cambio de fase, 586
estable, 466
laminar, 466, 473
mecanismos del, 591-597
procesos adiabáticos y el, 657
procesos isotérmicos y el, 685
segunda ley de la termodinámica y el, 682-683
turbulento, 466
- Fourier, análisis de, 531-532
- forma de determinante para el producto vectorial, 25
- fractura, 369
- frecuencia(s)
angular
definición de, 420-421
movimiento armónico simple y la, 423-425
natural, 443
de las ondas sonoras, 527-528, 531-532
de los latidos, 551
de modo normal, 487
definición de, 420-421
efecto Doppler y la, 555
fundamental, 512-515, 531-532, 543-548
impulsora, 546
modo normal de la, 487
movimiento armónico simple y la, 424-425
ondas de sonido en el aire y la, 539
unidad del SI para la, 420
velocidad de propagación y la, 490
- fricción
cinética y estática, 149-154

- círculo vertical con, 221
 de rodamiento, 155, 326, 328-329
 definición de, 111
 del aire, **577**
 descenso en tobogán con, 152-154
 en el movimiento horizontal, 152
 movimiento rectilíneo con, 144
 plano inclinado con, 221-222
 tensión y, 141-142
 trabajo y, 229-232
 viscosidad y, 466, 472-473
 fuegos pirotécnicos, **269**
 fuerza(s)
 aceleración y, 118-120
 aerodinámica y, 376, 444
 antimortiguamiento de la, 444
 central, 398
 centrífuga, 159
 conservativa
 cantidad de movimiento como, 254-255
 colisiones elásticas y la, 262
 definición de la, 228
 energía potencial y la, 232-233, 235-236
 panorama de la, 228-232
 constante, 143-144, 183
 definición de la, 193
 energía potencial eléctrica y, 222-223, 225, 227
 movimiento armónico simple y, 421, 423-427, 432-433
 panorama de la, 93-95
 péndulo simple y, 437
 de amplio rango, 108
 de contacto
 definición de, 108
 fricción en rodamiento y la, 238
 fuerzas de fricción y la, 149
 de flotación, 464
 de fricción
 cinética, 149-154
 como fuerza conservativa, 229
 definición de la, **108**, 149
 estática, 149-154
 leyes de Newton del movimiento y la, 149-158
 movimiento con, 227
 primera ley de Newton y la, 111
 resistencia del aire y la, 157, 225
 de largo alcance, 108
 de marea, 408
 de martillo, 189-190
 de restauración, 420-421
 de tensión, **108**
 definición de, 11, 108
 del aire, 459
 del tendón, 361
 disipativa, 229
 energía potencial y, 232-235
 estiramiento y, 363
 externas
 colisiones y las, 258
 definición de, 253
 equilibrio y, 355
 momento lineal y, 253-254
 movimiento del centro de masa y las, 268-269
 segunda ley del movimiento de Newton y las, 118
 tercera ley del movimiento de Newton y las, **127**
 torca y, 320, 332
 fundamentales de la naturaleza, 163-164
 gravitacional
 aceleración debida a la, 386
 cálculo de la, 386
 como fuerza conservativa, 228
 conservación de la energía mecánica y la, 215-219
 entre distribuciones esféricas de masa, 402
 importancia de la, 387
 par acción-reacción de la, 123
 peso y, 120, 388
 superposición de la, 386-387
versus energía potencial gravitacional, 391
 hacia fuera, 159
 horizontal
 energía cinética y la, 192
 fricción y, 152-153, 155
 leyes de Newton del movimiento y la, 111-112, 115-119
 movimiento periódico y la, 419
 impulsora, 442-443, 489, 546
 internas
 definición de, 253
 momento lineal y, 253-254
 torca y, 320, 332
 intermolecular, 617-618
 la mecánica y, 36
 leyes de Newton del movimiento y la, 107-126
 magnética, 164
 carga eléctrica y las, 164
 movimiento rectilíneo y, 195-196
 neta
 aceleración y la, 121
 aceleración centrípeta y la, 404
 cero, 111-115
 definición de la, 11
 igual a cero, 111-115
 movimiento del centro de masa y la, 268-269
 oscilaciones amortiguadas y la, 440
 teorema del impulso-momento y la, **249**
 torca y, 319, 331
 no conservativa, 228-232
 normal, 108
 nuclear fuerte, 164
 potencia y, 200
 presión y, 459
 propiedades de la, **108**
 radial hacia dentro, 158
 restauración de la, 420-421
 sistema inglés de unidades y la, 6
 sobre la cabeza de un martillo, 189-190
 tangencial, 329
versus presión, 366
 función(es)
 coseno, 487
 de distribución, 629-630
 de onda
 definición de, 491
 graficación, 493-494
 para ondas longitudinales, 497
 propiedad aditiva de las, 506
 seno, 487
 fusión, cambio de entropía en la, 691-692
 fútbol soccer, **252**, 253
- G**
 Galileo Galilei, 2, 4, 53, 107
 Galio, **587**
 garganta (de un tubo), 471
 gas(es)
 cambio de fase de los, 586-591
 capacidades caloríficas de los, 626-628, 660
 compresión en motores de automóvil y los, **614**
 ideal(es)
 capacidades caloríficas de un, 659-661
 ciclo de Carnot y un, **685**
 definición de, 612
 ecuación de los, 611-615
 energía interna de un, 658
 expansión isotérmica de un, 649
 modelo cinético molecular de un, 619-625
 proceso adiabático para un, 662-664
 velocidades moleculares y un, **631**
 monoatómicos, 626
 velocidad del sonido en los, **534**, 535-536
 volumen a TPE de los, 613
 gatos, momento angular de los, **334**
 giro de regreso, en el golf, **474**, **475**
 de un patinador artístico, 347
 giroscopios, 337-340
 googol, 32
 gotas de lluvia
 arco iris y las, 490
 masa variable de las, 284
 tensión superficial de las, 465
 GPS (Sistema de Posicionamiento Global), 57
 gradiente
 definición de, 234
 temperatura de, 592
 grados, 572
 de libertad, 627
 gráfica(s)
a-t (aceleración-tiempo), 47-48
 definición de, 38-39
 de tiempo (*a-t*), 47-48
 velocidad en una, 42-43
 graficar ondas, 493-494, **529**
 gramo, 5
 gravedad
 aceleración debida a la. *Véase* Aceleración debida a la gravedad
 centro de, 355-358
 cero, **253**
 en Marte, 389-390
 específica, 457
 fuerza de largo alcance y la, 108
 hipergravedad, 100
 gravitación
 agujeros negros y, 405-409
 cuerpos simétricamente esféricos y la, 384-385
 distribuciones esféricas de masa y la, 400-403
 energía potencial gravitacional, 390-393
 ley de la, universal, 383
 ley de Newton de la, 383-387, 397, 400
 movimiento de satélites y la, 393-396
 peso aparente, rotación de la Tierra y la, 403-405
 peso y, 388-390
 Griffith, Darrell, 134
 guitarra(s)
 dueto órgano-, 548
 ondas mecánicas y, 510-514
 oscilación y, 441, 546
- H**
 helicópteros, **285**
 hélice, diseño de, 295-296
 helio
 conductividad térmica del, 592
 líquido, **534**
 moléculas en el, 618
 punto de fusión del, 587
 hidrógeno
 cambio de entropía en la fusión, **692**
 como combustible de automóviles, **622**
 en el Sol, 643
 máser, 32
 movimiento vibratorio y el, 627
 hidrómetro, **464**
 hielera, **594**
 hipérbolas, 397
 hipergravedad, 100
 histéresis, 369
 elástica, 364
 hockey de mesa (juego), **111-112**, 115-116
 Hooke, Robert, 193, 363
 ley de, 194
 horizonte de eventos, 406-407
 hormigas, 522
 humedad relativa, 643
- I**
 iluminación, 498
 imágenes de ultrasonido, 535
 impulso
 definición de, 249
 momento lineal e, 247-253
 teorema del impulso-momento lineal, 248-250
 transversal, 499
 velocidad de la onda y el, 499
 incertidumbre (error), 8-10
 inercia
 definición de, 112
 momento de, **296**, **299**, 303-305

- primera ley de Newton del movimiento y la, 113-115
rotacional, 297
- ingravidez
aparente, **394**, 405
verdadera, 394
- instante, 39
- instrumentos musicales, **532**, 546
de viento, 543-546
ondas de sonido e, 533
ondas estacionarias e, 513-515
tubos de órgano, **543-544**, 545-546
- integración, 57-59
- intensidad
amplitud de la presión y la, 537-539
del desplazamiento y la, 537
de las ondas sonoras en el aire, 538
de onda, 504-505, 537
definición de, 504-505
- interacción(es)
conservación del momento lineal y las, 253
de van der Waals, 616
débil, 164
electrodébil, 164
electromagnéticas, 164
fuerte, 164
gravitacional, 163-164
leyes de Newton del movimiento y la, 108-111
- interenfriadores, 671
- interferencia
constructiva, 509, 548-550
definición de la, 509
panorama de la, 548-550
de ondas, 505-507, 548-550
definición de la, 487, 505
destruictiva, 509, 548-550
definición de, 509
ondas e, 548-550
- isobárica, 658
isocórica, 658
isoterma(s), **616**, 658
- J**
Joule, James Prescott, 182, 582
joule, definición de, 182
Júpiter, **385**
- K**
Kelvin, Lord, 574
Kelvin-Planck, enunciado de, 682
Kepler, Johannes, 107, 397
kilocalorías, 582-583
kilogramo, 5, 6, 116
kilowatt, 5, 199
hora, 199
Kirkwood, Daniel, 416
- L**
Lapidus, I. R., 105
latón, 368, 369
levantador de pesas, **184-185**
- ley
cero de la termodinámica, 571-572
conmutativa para vectores, 13
de conservación de la energía, 181, 213, 215-219, 231-232
de Coulomb, definición de la, 617
de Hooke, 193-194, 363-369, 422
de Kepler del movimiento planetario, 396-400, **409**
de la gravitación, 383-387, 397, 400
de Newton de la gravitación, 383-387, 397, 400
de Pascal, 459-460
de Stefan-Boltzmann, 596
del inverso cuadrado, 504
primera ley de la termodinámica
capacidades caloríficas de los gases ideales y la, 659-661
clases de procesos y la, 656-658
definición de la, 652
energía interna de los gases ideales y la, 658
procesos adiabáticos para gases ideales, 662-664
procesos cíclicos y la, 653-656
sistemas termodinámicos y la, 646-647
trabajo realizado durante los cambios de volumen y la, 647-649
trayectorias entre estados y la, 650-651
primera ley de Newton del movimiento, 107, 111-115, 136-142
segunda ley de la termodinámica
ciclo de Carnot y la, 684-690
direcciones de los procesos termodinámicos y la, 673-675
entropía y la, 690-697
motores de combustión interna y la, 678-680
panorama de la, 682-683, **684**
refrigeradores y la, 680-682
segunda ley de Newton del movimiento
dinámica de partículas y la, 142-149
momento lineal y la, 247-248, 254
órbitas circulares y la, 394
oscilaciones amortiguadas y la, 440
panorama de la, 107, 115-120
velocidad de una onda y la, 500
T3 de Debye, 606
tercera ley de la termodinámica, 690
tercera ley de Newton del movimiento
definición de la, 107
disparos y la, **181**
panorama de la, 123-127
libra (libra-fuerza), 120
límite elástico, 369
proporcional, 369
línea de acción, 317
de flujo, 466
líquidos. *Véase* Fluidos
líquido sobrecalentado, 588
litotrisia (tipo de cirugía) extracorpórea por onda de choque, 559
- longitud
cambio de temperatura y, 579
como unidad de medida, 5
de onda
de las ondas de sonar, 534-535
definición de, 490
efecto Doppler y la, 555
prefijos de unidades y la, 5-6
sistema inglés de unidades y la, 6
Luna, 388, **392**, **395**
- luz
como ondas electromagnéticas, 487
efecto Doppler y la, 556-557
horizonte de eventos y la, 407
- M**
magnetar (estrella de neutrones magnética), 207
magnitud de vectores, 11-13, 16-17
manómetro, 461
máquina(s)
de Atwood, 169, 180
simples, 208
térmicas
análisis de las, 677
de combustión interna, 675-680
definición de, 675
depósitos caliente y frío, 676
diagramas de flujo de energía y, **676**, 677-678
- marcos de referencia
definición de los, 91
inerciales, 113-115, 118, 355
Marte, 389-390, 481
- masa
atómica, 619
centro de. *Véase* Centro de masa
como unidad de medida, 5
constante, 612
crítica, 29
definición de, 116
densidad lineal de, 498
distribuciones esféricas y, 400-403
gravitacional, 122
inercial, 122
leyes de Newton del movimiento y, 120-123
medición de la, 122-123
molar
definición de la, 536, 584, 611
del cuerpo humano, 642
del oxígeno, 640
molecular, 619
prefijos de unidades y la, 6
propiedad aditiva de la, 117
puntual, 401-403
reducida, 453, 814
tensión y, 138-139
total, 267, 301, 611
- materia
estados de la, 586
fases de la, 631-634
la mecánica y la, 36
movimiento ondulatorio y la, 489
propiedades moleculares de la, 617-619
térmicas, 610-645
- materiales
dúctiles, 364
quebradizos, 364
matraz Dewar, 597
Maxwell-Boltzmann, distribución de, 630-631
- mecánica
celeste, 383
clásica (newtoniana), 107
de fluidos
densidad de la, 456-458
ecuación de Bernoulli y la, 468-472
flotabilidad y, 463-465
movimiento de fluidos y, 466-468
presión en un fluido y, 458-463
viscosidad y turbulencia de la, 472-475
definición de, 36
sistema inglés de unidades y la, 6
media ponderada por la masa, 266
- medición
de la masa y el peso, 122-123
estándares en la, 10-11
incertidumbre y, 8-9
unidades de, 4-8
- medidor(es)
Bourdon de presión, **462**
de presión, 461-463
de Venturi, **471**
medio, 487-489
interestelar (MIS), 644
mercurio, 461-562
metro, **4**, 5, 6
micrófono(s), 528, 548-550
MIS (medio interestelar), 644
Mitchell, John, 406
- modelos
definición de los, 3
idealizado(s), 3-4, 456, 466
moleculares, 619-625
moderadores, 265, 278,
modo normal
definición del, 512
ondas sonoras estacionarias y el, 543-546
tubos de órgano y el, 54
- módulo
de corte, 365, 368
de elasticidad, 354, 363
de volumen, 365, 366-367
de Young, 364, 365
- moléculas
colisiones entre, 624-625
de agua, 266-267
definición de, 617
diatómicas, 626-627
fuerzas intermoleculares y las, 617-618
poliatómicas, 626-628
tensión superficial y las, 465
versus moles, 620
vibraciones de las, 434-436, 618, 621

- moles
 definición de, 618
 moléculas *versus*, 620
 panorama de los, 584-586, 618-619
- momento
 angular
 conservación del, 333-337
 definición del, 331
 del cuerpo rígido, 332-333
 en una acción poliaica, 336-337
 equilibrio y el, 355
 panorama del, 331-333
 segunda ley de Kepler y el, 398
 torca y, 331, 333
 de inercia, 296-298, **299**, **308-305**
- lineal
 angular. *Véase* Momento angular
 choques y, 257-262
 conservación del. *Véase* Conservación del momento lineal
 en el movimiento armónico simple, 431-432
 energía cinética y, 250-253
 impulso y, 247-253
 propulsión de cohetes y, 270-272
 rapidez de las ondas y, 499
 teorema del impulso-momento y el, 248-250
 total, 253, 258, 267
 transversal, 499
- monte Everest, 460
- motocicletas, **117**
- motores
 a reacción
 calor y, 647, 675, **689**
 impulso de los, **200**
 momento de inercia para los, 333
 de combustión interna, 678-680
 de gasolina, 647-648, 675, 677-680
 eléctricos, 675, 681
- movimiento
 armónico simple (MAS)
 angular, 433-434
 vertical, 432-433
 browniano, 640
 causas del, 107
 centro de masa y el, 267-269
 circular
 no uniforme, 90-91
 con energía potencial elástica, 225-227
 gravitacional, 227
 con fuerza de fricción, 227
 conexión y el, 592, 595-596
 de fluidos, 466-468
 incompresibles, 467-468
 de partículas, 490
 de proyectiles
 energía en el, 219
 movimiento circular uniforme *versus*, 89
 panorama del, 79-87
 satélites y el, **393**
 de satélites, 393-396
 de ondas periódicas, 489-491
 de una partícula *versus* movimiento de una onda, 490
 dirección del, 77-78, 81
 en dos o tres dimensiones
 de proyectiles, 79-87
 en círculo, 87-91
 vector de aceleración, 74-79
 velocidad relativa y el, 91-95
 energía en el, ondulatorio, 502-505
 energía en el, rotacional, 296-301
 la mecánica y el, 36
- leyes
 de Kepler del, planetario, 396-400, **409**
 de Newton del. *Véase* Leyes de Newton del movimiento
 marco de referencia inercial y, 118
 teorema del trabajo y la energía, 196-198
- traslacional
 definición del, 316, **627**
 equilibrio y el, 355
- energía cinética molecular y el, 621
 rotación y el, 323-329
 con fuerza variable, 195-196
 vibratorio, **627**, 628
 ondulatorio, 488-492, 500-502, 533
 oscilaciones amortiguadas y el, 440-442
 forzadas y resonancia y el, 442-444
 panorama del, 419-421
 péndulo físico y el, 438-440
 simple y el, 436-438
- periódico
 aplicaciones del MAS y el, 432-436
 definición del, 419
 energía en el MAS y el, 428-432
 planetario, 400
- rectilíneo
 aceleración media e instantánea y el, 43-47
 colisiones elásticas y el, 264
 con aceleración cambiante, 58-59
 con aceleración constante, 47-53
 con fricción, 144
 con fuerza constante, 143-144
 cuerpos en caída libre y el, 53-57
 desplazamiento, tiempo y velocidad media, 37-39
 trabajo realizado por una fuerza variable y el, 192-196
 velocidad instantánea y el, 39-43
 velocidad y posición por integración y el, 57-59
- rotacional
 aceleración angular para cuerpos rígidos y el, 319-322
 definición del, **627**
 giroscopios y el, 337-340
 precesión y el, 337-340
 rotación de un cuerpo rígido alrededor de un eje
 en movimiento y el, 323-329
 trabajo y potencia en el, 329-331
 torca y, 316-319
- traslacional
 definición de, 316, 627
 energía cinética molecular y el, 621
 equilibrio y, 355
 rotación y el, 323-329
 vibratorio, **627**, 628
- multiplicación
 cifras significativas en la, 9-10
 utilizando componentes de vectores, 17-18
- N**
 naturaleza, fuerzas fundamentales de la, 163-164
 navegación interplanetaria, 418
- nebulosa(s)
 de la Laguna, 639
 del Cangrejo, 314-315, 413, 569
 oscuras, 644
 negativo de un vector, 12
- neutrones, decaimiento de los, 281
- Newton, Isaac, 107, 164, 383, 397
- newton, 6, 116
- newton-metro, 317
- nitrógeno, 536, 612, 622, 664
- nodo(s)
 definición de los, 508, 887
 desplazamiento de los, 541-542, 544
 presión de los, 542, 544
 ondas senoidales y, 509
- notación
 arc tan, 17
 (científica) de potencias de 10, 9-10
- nubes moleculares, 619
- número
 de Avogadro, 618-621
 de Mach, 558-559
 de onda, 493
- O**
 Oficina Internacional de Pesas y Medidas, 5
- oído humano
 amplitud de las ondas sonoras y el, **530**, 531
 canal auditivo en el, 568
 sonidos audibles para el, 519, 527
- onda(s)
 “al hacer la ola”, **489**
 de choque, 558-560
 de radio
 como ondas electromagnéticas, 487
 efecto Doppler para, 557
 descripción matemática de las, **492**, 493-497
 electromagnéticas
 definición de, 487
 efecto Doppler para, 556-557
 transferencia de energía en las, 503
 en dos dimensiones, 523
 en un tendadero, 495-496
 energía en el movimiento de las, 502-505
 estacionarias, en una cuerda, 487, 507-511
 longitudinales, 567
 graficación de, 493-494, **529**
 infrasónicas, 528
 interferencia de las, 505-507, 548-550
 longitudinales
 definición de, 488
 estacionarias, 567
 función de onda y las, 497
 periódicas, 490-491
 senoidales, 491, **528**
 velocidad de las, 535
- mecánicas
 condiciones de frontera de las, 505-507
 definición de, 488
 descripción matemática de las, **492**, 493-497
 energía en el movimiento ondulatorio y las, 502-505
 interferencia de las, 505-507
 modos normales de una cuerda, 511-515
 superposición de, 505-507
 tipos de, 488-489
 velocidad de las ondas transversales y, 498-502
- modos normales de una cuerda, 511-515
- P, 62
 periódicas, 489-491
 potencia en las, 503-504
 radio y las, 487, 556-557
 reflejadas, 505
- S, 62
 senoidales
 aceleración en las, 496-497
 amplitud de presión de las, 531
 definición de las, 487, 489
 función de onda para las, 491-496
 velocidad de partículas en las, 496-497
- sísmicas, 487
- sonoras
 como fluctuaciones de la presión, 528-532
 direccionamiento de las, **538**
 el oído humano y las, 519, 527
 estacionarias, 541-546
 frecuencia de las, 531-532
 gráficas de las, **529**
 intensidad en el aire de las, 538
 interferencia de las, 548-550
 panorama de las, 527-528
 percepciones de las, 531-532
 pulsos y las, 550-552
 “sonido del océano” en los caracoles marinos
 y las, 547
 velocidad de las, 532-556
- sonar y las, 534-535
- transversales
 definición de, 488
 panorama de las 488-490
 periódicas, 489-490
 velocidad de las, 498-502
- ultrasónicas, 528
- viajeras, 508, 548-549
- órbita(s)
 abiertas, 394
 cerradas, 394
 circulares, 394-396
 de transferencia de Hohmann, 418
 elípticas, 397-398
 geosincrónica, 415

- orden de corto alcance, 618
oro, **457**
oscilación(es). *Véase también* Movimiento periódico
amortiguada, 440-443
amplitud de, 547
autoexcitada, 444
definición de, 419
del Sol, **513**
dirigida, 442-443
forzada, 442-444, 546
impulsada, 442-443
modos normales de, 546
ondas senoidales y, 509
panorama de la, 419-421
osciladores armónicos
amortiguamiento y, 440
definición de los, 422
oxígeno, 640
- P**
Palas, asteroide 399
parábolas, **81**, 397
paracaidistas, 157-158, **217**
partículas
definición de las, 3, 37
dinámica de las, 142-149
en equilibrio, 136-142
gravitación y las, **384**
momento angular de las, 331-332
trabajo y energía cinética de las, 191-192
velocidad media con respecto al eje x y las, 38
Pascal, Blaise 460
pascal, 364, 458
patinador artístico, giros, 347
en hielo, **191**, **254**, 347
pelota de tenis, **252**, **475**
péndulo(s)
balfístico, 260
cónico, 160
de Foucault, 605
físico, 438-440
simple, 436-439
percusión, centro de, 352
perihelio, 397-400
periodo
definición del, 89, 420-421
en el movimiento armónico simple, 424-425
peso
aparente, 145-149
definición del, 145, 403
en la Tierra, 388
en un elevador que acelera, 145
panorama del, 145-149
rotación de la Tierra y, 403-405
del aire en una habitación, 457-458
gravitación y, 163, 388-390, 403-405
leyes de Newton del movimiento y el, 120-123
medición del, 122-123
molecular, 548-611
verdadero, 403, **404**
Philosophiae Naturalis Principia Mathematica
(Newton), 107
piano, 491, 511, 513-514
pistones, 488, 490, **491**, **648**
planetas, 396-400. *Véase también* Tierra
plano
colisiones en un, 257
definición de, 71
horizontal, colisión en un, 257
inclinado, 140-141, 221-222
movimiento de un proyectil en un, 80
plasticidad, 368-369
Plutón, **395**
posición
energía potencial y la, 213
inicial, 48
por integración, 57-59
potencia
cálculo a partir de la torca, 330-331
definición de, 181, 199
eléctrica
para acondicionadores de aire, 681
para una bombilla de tamaño medio, 538
turbinas de vapor y, 675, 689
en el movimiento rotacional, 329-331
en ondas, 503-504
instantánea, 199
media, 199
trabajo y, 199-201
potencial Lennard-Jones, 642
precesión, 337-340, 352
precisión, 10
prefijos, 5-6
preignición, 679
presión
absoluta, 460-461, 528
atmosférica, 458-460, 587, 615, **632**
colisiones y, 620
constante, 659-660, 680
de vapor, 643
definición de, 366-367, 458
del agua, 470
en los hogares, **470**
ecuación de los gases ideales y, 611
en fluidos, 458-463
fuerza y, 459
gas y, 620
manométrica, 460-461, 528
medida de, 460-461, 528
ondas sonoras y, 527-531
panorama de la, 459-460
recíproca, 367
versus
densidad, 612
fuerza, 366
volumen de un gas y, 613
principio
de Arquímedes, **463**
de conservación del momento lineal.
Véase Conservación del momento lineal
de la relatividad. *Véase* Teoría de la relatividad
de superposición
de fuerzas, 109-111, 385, 402
lineal, 506-507
ondas estacionarias y el, 508
ondas mecánicas y el, 505-507
para fuerzas gravitacionales, 386-387
diferencial, 250
integral, 250
problema (s)
de la puerta en la cerca, 379
de los monos y los humanos, 177
del cohete de etapas múltiples, 283
resolución de un, 3-4
técnicos, 352
proceso(s)
a presión constante, 659-660, 680
a temperatura constante, 657
a volumen constante
capacidad calorífica molecular en los, 659
capacidades caloríficas de los gases y los,
626
el ciclo Diesel y los, **680**
procesos isocóricos y los, 657
adiabático
ciclo de Carnot y el, **685**
definición del, 657
motor diesel y el, **66**
para un gas ideal, 662-664
razón de las capacidades caloríficas y el, 661
reversible, 693
trabajo realizado en un, 664
cerca del equilibrio, 674
cíclicos
definición de los, 675
entropía en los, 694-695
máquinas térmicas y los, 675
primera ley de la termodinámica y los,
653-656
refrigeradores y, 680
irreversibles
ciclo Carnot y los, 684
conversión de trabajo y calor y los, 683
definición de los, 673-674
entropía en los, 692, 695-696
isobárico, 656-657
isocórico, 656-657
isotérmicos
ciclo de Carnot y los, 685
definición de, 656-658
expansión de un gas ideal y los, 649
transferencia de calor y los, 685
reversibles
adiabáticos, 693
definición de, 674
entropía en los, 692-694
termodinámicos
desorden y los, 674-675
calor agregado en los, 650-651
como procesos irreversibles, 673-674
clases de, 656-658
trabajo realizado en los, 650
producto
cruz (vectorial), 21, 24-26, 318
escalar, 21-24
vectorial, 21, 24-26, 318
profundidad, 459-460
propagación
de las ondas, 491-492, 496, 503
definición de, 487
velocidad de, 489-490
propiedad(es)
aditiva
de la función de onda, 506
de la masa, 117
moleculares de la materia, 617-619
térmicas de la materia
capacidades caloríficas y las, 626-629
ecuaciones de estado y las, 611-617
fases de la materia y las, 631-634
modelo cinético-molecular de los gases ideales
y las, 619-625
panorama de las, 610
velocidades moleculares y, 629, 630-631
propulsión de cohetes, 270-272
protones
decaimiento del neutrón y los, 281
proyectiles, 79, 86
prueba sencilla de tiempo de reacción, 65
puente(s)
esfuerzo de tensión y, **363**
Tacoma Narrows, **443**
unión de expansión, **581**
pulso(s), 550-552
de ondas, 489-490, **505-507**
incidente, 505
reflejado, 505
punto(s)
crítico, **632**, 633
de inflexión, 239
de referencia, 423
de rocío, 644
de ruptura, 364
triple, 575, 632
- R**
rad, 88, 158, 286
radar, 557
radiación
definición de, 592, 596
estrellas y, 605
infrarroja, 487, **573**
panorama de la, **596**, 597
ultravioleta, 487
radianes, 286, 423
radio
de curvatura, 89
de Schwarzschild, 406-407
rango
audible, 527

- de validez, 2
 horizontal, 84
 lineal, 293
- rapidez
 a lo largo de un círculo vertical, 220
 angular, 293, 339
 cálculo mediante trabajo y energía, 189
 componentes paralelas de la aceleración y, 77-78
 constante, 88
 conversión de unidades de, 7-8
 de escape, 392, 405-6
 de la caminata, 8
 de la luz, 5
 de ondas, 489, 498-502
 longitudinales, 535
 transversales, 498-502
 de salida, 470-71
 de un cohete, 272
 de un yo-yo, **325**
 definición de, 40
 del sonido
 en el aire, 536
 en gases, 534, 535-536
 en sólidos, 534, 535
 en un fluido, 533, 534
 lineal, 293
 media, 40, 624
 molecular, 621-624, 629, 630-631
 movimiento armónico simple y, 423
 movimiento circular y, 87-88
 orbital, 398
 radio en el movimiento circular y, 89
 rms, 622-624
 terminal, 155-158, 813
 vectores y, 11
 velocidad inicial, 69
versus velocidad, 293
- rayos x
 como ondas electromagnéticas, 487
- razón
 de capacidades caloríficas (calores específicos), 535-536, 661
 de compresión, 678
 reactores nucleares, 264-265
 redondeo, 9
 reflexión
 de las ondas mecánicas, 504-507
 sonoras, 542-543
 eliminación de la, 550
- refrigeradores
 ciclo de Carnot y, 688-689
 definición de, 680
 diagrama de flujo de energía y, **680**
 panorama de los, 680-682
 sin trabajo, 682
- regeneración, 707
- regla
 de Drezep y Trouton, 704
 de Dulong y Petit, 585, 628-629
 de la mano derecha
 definición de la, 24
 giroscopio, 339
 para el momento angular, 331, **332**
 torca y la, **318**
 velocidad angular y la, **288**
- reloj atómico, 5
- reservorios de frío, 675-676
- resistencia
 a la tensión, 369
 del fluido, 155-158
 mecánica, 546
 reactiva, 155
 térmica, 593
- resolución de un problema, 3-4
- resonancia
 definición de, 546
 oscilaciones forzadas y, 443-444
 sonido y, 546-548
- resortes
 deslizador sobre, **195, 235, 258**
- energía potencial elástica y, **222**
 fuerza de estiramiento y, 363
 fuerza estática y, 228
 modelo del movimiento periódico y, **420**
 movimiento armónico simple y, **425, 433-434, 489**
- resultante (suma de vectores), 13, 18
- rifle
 de resorte, 351
 retroceso de un, **255, 256**
- rotación
 cálculos del momento de inercia y, 303-305
 cinemática lineal y angular y la, 293-296
 con aceleración angular constante, 290-292
 de la Tierra, 403-405
 eje fijo de, 285, 291-292, 333
 energía cinética y la, 627
 energía en la, 296-301
 equilibrio y, 355
 moléculas diatómicas y la, 627
 teorema del eje paralelo y la, 301-303
 traslación y, 323-329
 velocidad y aceleración angulares y la, 285-290
- Rothschild, M., 174
- ruido blanco, 532
- ## S
- salto
 de altura, salto de Fosbury, **301**
 en *bungee*, **224**
- satélites
 efecto Doppler y, 557
 gravitación y los, 383
 momento de inercia y los, **303**
 movimiento de los, 393-396
 circular uniforme, 88
 permanencia en órbita de los, 163
- Saturno, **383**
- Schwarzschild, Karl, 406
- segundo, 4-6, 29
- semiconductores
 para dispositivos electrónicos, 619
- semieje mayor, 397
- sentido común, 108
- serie armónica, 512
- sifón, 485-486
- silencio, sonido del, 543
- silicio, **618, 629**
- SIN (Sistema de Navegación Inercial), 57
- síntesis newtoniana, 400
- sistema(s)
 aislados, 253, 653-656
 compuestos, 191-192
 de coordenadas cartesianas, 15, 72
 de gas en un cilindro, 647
 de mano derecha, 25
 de navegación inercial (SNI), 57
 de Posicionamiento Global (GPS), 57
 inglés de unidades, 6, 188
 métrico, 5-6, 120
 cgs, 120
 solar, 34, **387**
 termodinámicos, 646-647, **653**
- slug, **120**
- sobretonos, 512
- Sol
 fuerza gravitacional del, **164, 383-384, 387**
 leyes de Kepler, y el 396-400
 oscilación en el, **513**
 transferencia de energía del, 207
- “soldadura fría”, 150
- sólidos
 agujeros en los, 577
 cambio de fase de los, 586-591
 capacidades caloríficas de los, 628-629
 rapidez del sonido en los, 534, 535
- sonido
 audible para el oído humano, 519, 527
 canto de un pájaro en la pradera, **540, 541**
 definición de, 527
 del silencio, 543
- efecto Doppler y el, 552-557
 longitud de onda de los sonidos musicales, 491
 ondas de choque y, 557-560
- rapidez del
 en el aire, 536
 en fluidos, 533-534
 en gases, 535-536
 en sólidos, 534-535
 resonancia y, 546-548
- sordera temporal, 540
- sobreamortiguamiento, 441
- Stefan-Boltzmann, constante de, 596
- sublimación, 588, 632
- suma de vectores (resultante), 13, 18
 con componentes, 18-19
 panorama de la, 13-15
- superficies, *pVT*, 633, **634**
- supersónico, 558
- substancia de trabajo
 ciclo de Carnot y una, 689
 definición de, 676
 en los refrigeradores, 681
- sustracción
 cifras significativas en la, 9
 de vectores, 14
- ## T
- tanque de buceo autónomo, **614**
- tasa(s)
 de enfriamiento con aire seco, 669
 de flujo, 467
 metabólica basal (TMB), 603, 608
- TOE (teoría de todo), 164
- Telescopio Espacial Hubble (TEH), **2, 393**
- temperatura
 calorimetría y cambios de fase, 586-591
 cambio de fase y, 590
 cantidad de calor y, 582-586
 combustión y, 591
 crítica, 617
 definición de, 571
 del cuerpo, 575
 el cuerpo humano y la, 575, 595, 603
 energía interna de un gas ideal y la, 688
 entropía y, 693
 equilibrio térmico y, 571-572
 escala Kelvin y, 574-576
 expansión térmica y, 576-582
 termómetros, 572-573
 transferencia de calor y, 591-597
versus calor, 582
 volumen de un gas y la, 613
 y presión estándar (TPS), 613
- tendedoro, 495-496
- tendón de Aquiles, **222**
- tensión
 compresión y, 364-365
 de corte, **363, 367-368**
 definición de, 126, 364
 en el cable de un elevador, 144-145
 esfuerzo de, **363, 364-365**
 masa y, 138-139
 panorama de la, 363-368
 polea sin fricción y, 141-142
 rapidez de las ondas y, 498
 ruptura y, 364, 369
 superficial, 465
- teorema
 de Pitágoras, 15, 549-550
 de Torricelli, 471
 del binomio, 435
 del eje paralelo, 301-303
 del eje perpendicular, 314
 del impulso-momento lineal, 248-250
 del trabajo y la energía
 definición del, 187-188
 movimiento a lo largo de una curva y el, 196-198
 movimiento rectilíneo y el, 195-196
 panorama del, 186-192

- teoría(s), 2
de la gran unificación (TGU), 164
de la relatividad
 corrimiento Doppler para la luz y la, 557
 primera ley de la termodinámica y la, 652
 relación de la suma de velocidades y la, 94
 Schwarzschild y la, 406
especial de la relatividad. *Véase* Teoría de la relatividad físicas, 2
- termodinámica
definición de, 231, 570
ley cero de la, 571-572
primera ley de la. *Véase* Ley, primera ley de la termodinámica
segunda ley de la. *Véase* Ley, segunda ley de la termodinámica
sistema inglés de unidades y la, 6
tercera ley de la, 690
- termómetro(s)
de arteria temporal, 573
de gas, 574, 575-576
de oído, 573
de resistencia, 573
definición de, 571
escalas de temperatura y los, 572-573
terremotos y los, 487
tira bimetalica, 573
tiburones, 486
- tiempo
como unidad de medida, 4-5
de entrada, 678
de escape, 678
de relajamiento, 608
movimiento rectilíneo y el, 37-39
prefijos de unidades y el, 6
sistema inglés de unidades y el, 6
- Tierra
gravitación y la, 384-385, 387, 392
perforación al centro de la, 384-385, 402-403
peso aparente en la, 388, 389
rotación de la, 403-405
satélites de la, 395
viaje al centro de la, 402-403
- tijeras, 363
timbre, 532
- tono
del color, 532
diferencia de, 552
- torre(s)
inclinada de Pisa, 2, 54, 121
Petronas (Malasia), 357
- TPE (temperatura y presión estándar), 613
- trabajo
cero, 183-185
conversión en calor y, 683
definición de, 182
en el movimiento rotacional, 329-331
en sistemas compuestos, 191-192
en un proceso adiabático, 664
energía cinética y, 182-189
fricción y, 229-232
fuerza y, 185-186, 192-198
 constante y el, 183
igual a cero, 183-185
negativo, 183-185
panorama del, 182-186
positivo, 183-185
potencia y, 199-201
realizado durante los cambios de volumen, 647-649
teorema del trabajo y la energía, 186-192
termodinámica y, 647, 650
- transferencia
cero de calor, 662
de energía
 calor y, 570, 582, 586, 591, 597
 en ondas mecánicas, 502-503, 510
 gases y la, 626
 termodinámica y, 646-647, 652
transformaciones de la velocidad galileana, 23
- transición de fase, 587
trapezio, 103
traslación, 323-329
 y rotación combinadas, 323-329
trayectoria(s), 650-653
 de proyectiles, 79
 libre media, 625
trompeta, 547
tropósfera, 644
tubo
 abierto, 543, 545, 546
 cerrado, 544-545
 de flujo, 466
 de Kundt, 541, 542
 de órgano, 543-544, 545-546
turbina(s)
 de vapor, 675, 689
 de viento o eólica, 330
 giratoria, 330
turbocargadores, 671
turbulencia, 472-475
Tyrannosaurus rex, 439, 440
- U**
ultrasonido, 519, 535
unidad(es)
 atm (atmósfera), 336, 366, 575, 612
 de medida
 cifras significativas y, 9-10
 consistencia en las, 6-7
 conversiones de las, 7-8
 definición de, 4
 estimaciones del orden de magnitud y las, 10-11
 incertidumbre en las, 8-9
 prefijos para las, 5-6
 sistema inglés y, 6
 sistema métrico cgs y, 120
 tipos de, 4-5
 del SI (Sistema Internacional)
 definición de, 4
 para aceleración, 120
 para amplitud, 420
 para densidad, 457
 para energía cinética, 188
 para entropía, 691
 para frecuencia, 420
 para fuerza, 6, 108, 120
 para fuerzas gravitacionales, 385
 para impulso, 249
 para la escala Kelvin, 575
 para masa, 116, 120
 para momento de inercia, 297
 para momento lineal, 248
 para periodo, 420
 para potencia, 199
 para presión, 458
 para tensión, 364
 para torca, 317
 para trabajo, 182, 188
 prefijos de unidades de las, 5
 sistema inglés de unidades de las, 6
 tétrica británica (Btu), 583
 uranio, 264-265, 639
- V**
valles (de una onda), 489-490
Van der Waals, J. D., 616
ecuación de, 615-616, 638
vaporización, 587
variable(s)
 de estado, 611
 objetivo, 3
vector(es)
 aceleración de, 43, 74-79
 ángulos de los, 16
 antiparalelos, 12
 cero, 25
 componentes de los, 15-20, 109
 de posición, 35, 72-74
 de velocidad, 72-74
 definición de, 36
 dirección de los, 11, 16-17, 36
 ecuación de la velocidad relativa de los, 95
 ley conmutativa de los, 13
 magnitud de los, 11-13, 16-17
 momento lineal como, 251-252
 negativo de los, 12
 panorama de los, 11-13
 paralelos, 12
 productos de los, 21-26
 torca como, 318-319
 unitarios, 20-21
 velocidad angular como, 288-289
velocidad(es), 72-74
 a lo largo de un círculo vertical, 220
 aceleración y, 43
 angular
 aceleración y, 285-290
 cálculo de la, 287-288
 como vector, 288-289
 instantánea, 286-287
 media, 286
 de caminata, 8
 de partículas, 496-497, 537
 de sector, 397-398
 de onda, 537
 ecuación de la velocidad relativa vectorial, 95
 flujo de un fluido y la, 466
 gráficas x-t, 42-43
 instantánea, 39-43, 72-74
 cálculo de la, 73-74
 definición de la, 40, 72
 panorama de la, 39-43
 lineal, 287
 magnitudes comunes y la, 39
 media, 37-41, 72-74
 cálculo de la, 73-74
 definición de la, 37, 72
 movimiento rectilíneo y, 37-39
 rapidez media y la, 40
 velocidad instantánea y, 40-41
 movimiento
 armónico simple y, 423
 circular simple y, 87-88
 de un proyectil y, 79-87
 en caída libre y, 56
 rapidez *versus*, 293
 relativa, 91-95, 263
 vectores y la, 11
 versus rapidez, 293
 y posición por integración, 57-59
velocímetro, 285, 348
Verne, Julio, 392
Vía Láctea, 408
vibración
 de moléculas, 434-436, 618, 621
 expansión térmica y la, 577
 movimiento periódico y la, 420-422
 ondas mecánicas y la, 512-513
 sonoras y la, 536, 542-545, 547
 puentes y la, 443
viola, 514
violín, 512, 514
violonchelo, 514
viscosidad, 466, 472-475
visualización ultrasónica, 535
volumen
 cambio de fase y el, 580
 constante. *Véase* Procesos de volumen constante de un gas, 613
 trabajo realizado durante los cambios de, 647-649
 unidades de conversión y el, 8
 vuelta a una curva plana, 160-162
- W**
Watt, James, 199
- Y**
Yeager, Chuck, 559
yo-yo, 325, 327, 350

