

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

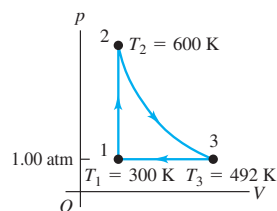
20.37. Usted diseña una máquina de Carnot que opera entre temperaturas de 500 K y 400 K y produce 2000 J de trabajo en cada ciclo. a) Calcule la eficiencia de la máquina. b) Calcule la cantidad de calor cedida durante la compresión isotérmica a 400 K. c) Trace las isotermas de 500 K y 400 K en un diagrama 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?

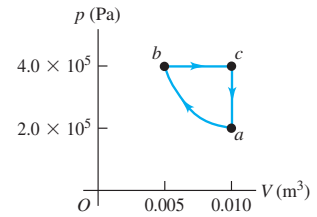
20.40. Una máquina térmica utiliza 0.350 mol de un gas diatómico con comportamiento ideal en el ciclo que se muestra en el diagrama pV de la figura 20.24. El proceso 1 → 2 es a volumen constante, el 2 → 3 es adiabático y el 3 → 1 es a presión constante a 1.00 atm. Para este gas, $\gamma = 1.40$. a) Calcule 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.

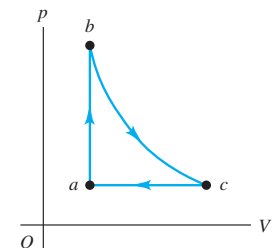
Figura 20.25 Problema 20.41.



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. 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:

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.

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.

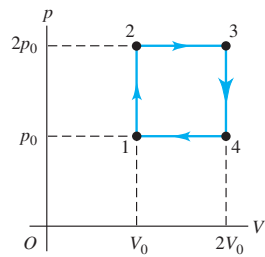
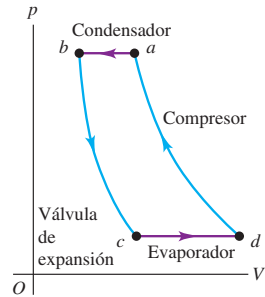
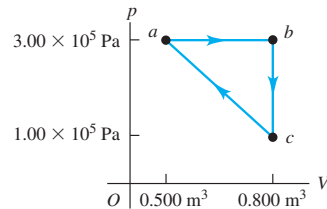


Figura 20.28 Problema 20.48.



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.

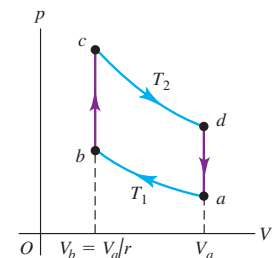
Figura 20.29 Problema 20.49.



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:

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

Figura 20.30 Problema 20.50.



i) Compresión isotérmica a temperatura *T*₁ del estado inicial *a* al estado *b*, con una razón de compresión *r*.
 ii) Calentamiento a volumen constante al estado *c* a temperatura *T*₂.
 iii) Expansión isotérmica a *T*₂ al estado *d*.
 iv) 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 periodo. *d)* Calcule el cambio neto de entropía para el sistema (habitación + aire exterior).

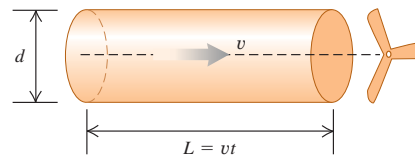
20.55. Energía no disponible. Según el análisis de la entropía y la segunda ley que hicimos después del ejemplo 20.10 (sección 20.7), el aumento de entropía durante un proceso irreversible está asociado con una disminución en la disponibilidad de energía. Considere un ciclo de Carnot que usa una fuente 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 $r = 21.0$.