

$$\Delta L = L\alpha \Delta T, \quad (18-9)$$

onde  $\alpha$  é o **coeficiente de dilatação linear**. A variação  $\Delta V$  do volume  $V$  de um sólido ou de um líquido é dada por

$$\Delta V = V\beta \Delta T. \quad (18-10)$$

onde  $\beta = 3\alpha$  é o coeficiente de dilatação volumétrica.

**Calor** Calor ( $Q$ ) é a energia transferida de um sistema para o ambiente ou vice-versa em virtude de uma diferença de temperatura. O calor pode ser medido em **joules** (J), **calorias** (cal), **quilocalorias** (Cal ou kcal) ou **British thermal units** (Btu), onde

$$1 \text{ cal} = 3,968 \times 10^{-3} \text{ Btu} = 4,1868 \text{ J}. \quad (18-12)$$

**Capacidade Térmica e Calor Específico** Se uma quantidade de calor  $Q$  é absorvida por um objeto, a variação de temperatura do objeto,  $T_f - T_i$ , está relacionada a  $Q$  através da equação

$$Q = C(T_f - T_i), \quad (18-13)$$

onde  $C$  é a **capacidade térmica** do objeto. Se o objeto tem massa  $m$ ,

$$Q = cm(T_f - T_i), \quad (18-14)$$

onde  $c$  é o **calor específico** do material de que é feito o objeto. O **calor específico molar** de um material é a capacidade térmica por mol. Um mol equivale a  $6,02 \times 10^{23}$  unidades elementares do material.

**Calor de Transformação** O calor absorvido por um material pode mudar o estado físico do material, fazendo-o passar, por exemplo, do estado sólido para o estado líquido ou do estado líquido para o estado gasoso. A quantidade de energia por unidade de massa necessária para mudar o estado (mas não a temperatura) de um material particular é chamada de **calor de transformação** ( $L$ ). Assim,

$$Q = Lm. \quad (18-16)$$

O **calor de vaporização**  $L_v$  é a quantidade de energia por unidade de massa que deve ser fornecida para vaporizar um líquido ou que deve ser removida para condensar um gás. O **calor de fusão**  $L_f$  é a quantidade de energia por unidade de massa que deve ser fornecida para fundir um sólido ou que deve ser removida para solidificar um líquido.

**Trabalho Associado a uma Variação de Volume** Um gás pode trocar energia com o ambiente através do trabalho. O trabalho  $W$  realizado por um gás quando ao se expandir ou se contrair de um volume inicial  $V_i$  para um volume final  $V_f$  é dado por

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p \, dV. \quad (18-25)$$

## PERGUNTAS

- 1 Os materiais  $A$ ,  $B$  e  $C$  são sólidos que estão em seus pontos de fusão. São necessários 200 J para fundir 4 kg do material  $A$ , 300 J para fundir 5 kg do material  $B$  e 300 J para fundir 6 kg do material  $C$ . Ordene os materiais de acordo com seus calores de fusão, em ordem decrescente.

- 2 A Fig. 18-23 mostra três escalas de temperatura lineares, com os pontos de congelamento e ebulação da água indicados. Ordene

A integração é necessária porque a pressão  $p$  pode variar durante a variação de volume.

**Primeira Lei da Termodinâmica** A lei de conservação da energia para os processos termodinâmicos é expressa através da **primeira lei da termodinâmica**, que pode assumir duas formas:

$$\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = Q - W \quad (\text{primeira lei}) \quad (18-26)$$

$$\text{ou} \quad dE_{\text{int}} = dQ - dW \quad (\text{primeira lei}). \quad (18-27)$$

onde  $E_{\text{int}}$  é a energia interna do material, que depende apenas do estado do material (temperatura, pressão e volume),  $Q$  é a energia trocada entre o sistema e o ambiente na forma de calor ( $Q$  é positivo se o sistema absorve calor e negativo se o sistema libera calor) e  $W$  é o trabalho realizado pelo sistema ( $W$  é positivo se o sistema se expande contra uma força externa e negativo se o sistema se contrai sob o efeito de uma força externa).  $Q$  e  $W$  são grandezas dependentes da trajetória;  $\Delta E_{\text{int}}$  é independente da trajetória.

**Aplicações da Primeira Lei** A primeira lei da termodinâmica pode ser aplicada a vários casos especiais:

$$\text{processos adiabáticos: } Q = 0, \quad \Delta E_{\text{int}} = -W$$

$$\text{processos a volume constante: } W = 0, \quad \Delta E_{\text{int}} = Q$$

$$\text{processos cíclicos: } \Delta E_{\text{int}} = 0, \quad Q = W$$

$$\text{expansões livres: } Q = W = \Delta E_{\text{int}} = 0$$

**Condução, Convecção e Radiação** A taxa  $P_{\text{cond}}$  com a qual a energia é *conduzida* através de uma placa cujas faces são mantidas nas temperaturas  $T_Q$  e  $T_F$  é

$$P_{\text{cond}} = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_Q - T_F}{L}. \quad (18-32)$$

onde  $A$  e  $L$  são a área e a espessura da placa e  $k$  é a condutividade térmica do material.

A *convecção* acontece quando diferenças de temperatura provocam uma transferência de energia associada ao movimento em um fluido. A *radiação* é uma transferência de energia através de ondas eletromagnéticas. A taxa  $P_{\text{rad}}$  com a qual um objeto emite energia por radiação térmica é dada por

$$P_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A T^4, \quad (18-38)$$

onde  $\sigma (= 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície do objeto,  $A$  é a área da superfície e  $T$  é a temperatura de sua superfície (em kelvins). A taxa  $P_{\text{abs}}$  com a qual um objeto absorve energia da radiação térmica do ambiente, quando este se encontra a uma temperatura uniforme  $T_{\text{amb}}$  (em kelvins), é dada por

$$P_{\text{abs}} = \sigma \varepsilon A T_{\text{amb}}^4. \quad (18-39)$$

as três escalas de acordo com o tamanho do grau de cada uma, em ordem decrescente.

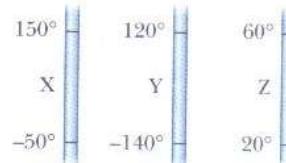


FIG. 18-23 Pergunta 2.

**3** O comprimento inicial  $L$ , a variação de temperatura  $\Delta T$  e a variação de comprimento  $\Delta L$  de quatro barras são mostrados na tabela. Ordene as barras de acordo com os coeficientes de expansão térmica, em ordem decrescente.

Barra	$L$ (m)	$\Delta T$ ( $^{\circ}$ C)	$\Delta L$ (m)
a	2	10	$4 \times 10^{-4}$
b	1	20	$4 \times 10^{-4}$
c	2	10	$8 \times 10^{-4}$
d	4	5	$4 \times 10^{-4}$

**4** A Fig. 18-24 mostra três arranjos diferentes dos materiais 1, 2 e 3 para formar uma parede. As condutividades térmicas são  $k_1 > k_2 > k_3$ . O lado esquerdo da parede está  $20^{\circ}$ C mais quente que o lado direito. Ordene os arranjos de acordo (a) com a taxa de condução de energia através da parede (no regime estacionário) e (b) com a diferença de temperatura entre as duas superfícies do material 1, em ordem decrescente.

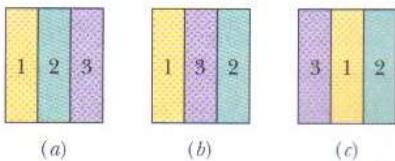


FIG. 18-24 Pergunta 4.

**5** A Fig. 18-25 mostra dois ciclos fechados no diagrama  $p$ - $V$  de um gás. As três partes do ciclo 1 têm o mesmo comprimento e forma que as do ciclo 2. Cada ciclo deve ser percorrido no sentido horário ou anti-horário (a) para que o trabalho líquido  $W$  realizado pelo gás seja positivo e (b) para que a energia líquida transferida pelo gás sob a forma de calor  $Q$  seja positiva?

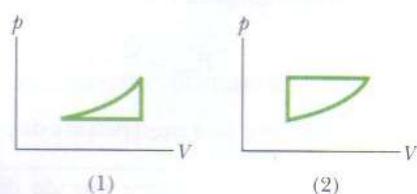


FIG. 18-25 Perguntas 5 e 6.

**6** Para que ciclo na Fig. 18-25, percorrido no sentido horário, (a)  $W$  é maior e (b)  $Q$  é maior?

**7** Um objeto quente é jogado em um recipiente termicamente isolado cheio de água, e se espera até que o objeto e a água entrem em equilíbrio térmico. O experimento é repetido com dois outros objetos quentes. Os três objetos têm a mesma massa e a mesma temperatura inicial. A massa e a temperatura inicial da água são iguais nos três experimentos. A Fig. 18-26 mostra os gráficos da temperatura  $T$  do objeto e da água em função do tempo

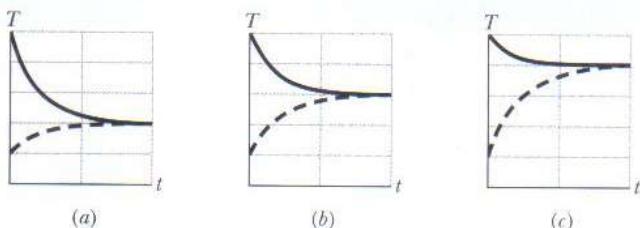


FIG. 18-26 Pergunta 7.

t para os três experimentos. Ordene os gráficos de acordo com o calor específico do objeto, em ordem decrescente.

**8** Uma amostra  $A$  de água e uma amostra  $B$  de gelo, de massas iguais, são colocadas em um recipiente termicamente isolado, e se espera até que entrem em equilíbrio térmico. A Fig. 18-27a é um gráfico da temperatura  $T$  das amostras em função do tempo  $t$ . (a) A temperatura do equilíbrio está acima, abaixo ou no ponto de congelamento da água? (b) Ao atingir o equilíbrio, o líquido congela parcialmente, congela totalmente ou não congela? (c) O gelo derrete parcialmente, derrete totalmente ou não derrete?

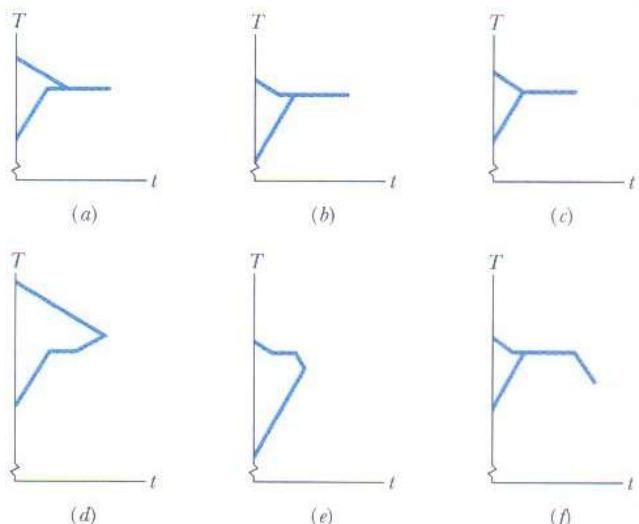


FIG. 18-27 Perguntas 8 e 9.

**9** Continuação da Pergunta 8: A Fig. 18-27 b a f mostram outros gráficos de  $T$  em função de  $t$ , dos quais um ou mais são impossíveis. (a) Quais são os gráficos impossíveis e por quê? (b) Nos gráficos possíveis, a temperatura de equilíbrio está acima, abaixo ou no ponto de congelamento da água? (c) Nas situações possíveis, quando o sistema atinge o equilíbrio, o líquido congela parcialmente, congela totalmente ou não congela? O gelo derrete parcialmente, derrete totalmente ou não derrete?

**10** Um cubo maciço de lado  $r$ , uma esfera maciça de raio  $r$  e um hemisfério maciço de raio  $r$ , todos feitos do mesmo material, são mantidos à temperatura de 300 K em um ambiente cuja temperatura é 350 K. Ordene os objetos de acordo com a taxa líquida com a qual a radiação térmica é trocada com o ambiente, em ordem decrescente.

**11** Três materiais diferentes de massas iguais são colocados, um de cada vez, em um congelador especial que pode extrair energia do material a uma certa taxa constante. Durante o processo de resfriamento cada material começa no estado líquido e termina no estado sólido; a Fig. 18-28 mostra a temperatura  $T$  em função do tempo  $t$ . (a) Para o material 1, o calor específico no estado líquido é maior ou menor que no estado sólido? Ordene os materiais de acordo (b) com a temperatura do ponto de fusão, (c) com o calor específico no estado líquido, (d) com o calor específico no estado sólido e (e) com o calor de fusão, em ordem decrescente.

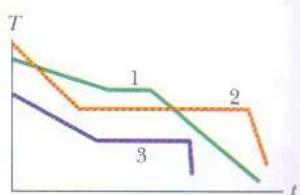


FIG. 18-28 Pergunta 11.

## PROBLEMAS

• - •• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

 Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

### seção 18-4 Medindo a Temperatura

- 1 Um termômetro de gás é constituído por dois bulbos com gás imersos em recipientes com água, como mostra a Fig. 18-29. A diferença de pressão entre os dois bulbos é medida por um manômetro de mercúrio. Reservatórios apropriados, que não aparecem na figura, mantêm constantes os volumes de gás nos dois bulbos. Não há diferença de pressão quando os dois recipientes estão no ponto triplo da água. A diferença de pressão é 120 torr quando um recipiente está no ponto triplo e o outro está no ponto de ebulição da água, e é 90,0 torr quando um recipiente está no ponto triplo da água e o outro em uma temperatura desconhecida a ser medida. Qual é a temperatura desconhecida?

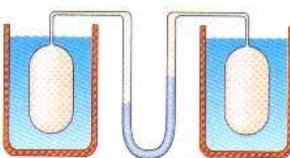


FIG. 18-29 Problema 1.

- 2 Dois termômetros de gás a volume constante são construídos, um com nitrogênio e o outro com hidrogênio. Ambos contêm gás suficiente para que  $p_3 = 80 \text{ kPa}$ . (a) Qual é a diferença de pressão entre os dois termômetros se os dois bulbos estão imersos em água fervente? (Sugestão: Veja a Fig. 18-6.) (b) Qual dos dois gases está a uma pressão mais alta?

- 3 A temperatura de um gás é 373,15 K quando está no ponto de ebulição da água. Qual é o valor-limite da razão entre a pressão do gás no ponto de ebulição e a pressão no ponto triplo da água? (Suponha que o volume do gás é o mesmo nas duas temperaturas.)

### seção 18-5 As Escalas Celsius e Fahrenheit

- 4 (a) Em 1964, a temperatura da aldeia de Oymyakon, na Sibéria, chegou a  $-71^\circ\text{C}$ . Qual é o valor desta temperatura na escala Fahrenheit? (b) A maior temperatura registrada oficialmente nos Estados Unidos foi  $134^\circ\text{F}$ , no vale da Morte, Califórnia. Qual é o valor desta temperatura na escala Celsius?

- 5 Em que temperatura a leitura na escala Fahrenheit é igual (a) a duas vezes a leitura na escala Celsius e (b) a metade da leitura na escala Celsius?

- 6 Em uma escala linear de temperatura X, a água congela a  $-125,0^\circ\text{X}$  e evapora a  $375,0^\circ\text{X}$ . Em uma escala linear de temperatura Y, a água congela a  $-70,00^\circ\text{Y}$  e evapora a  $-30,00^\circ\text{Y}$ . Uma temperatura de  $50,00^\circ\text{Y}$  corresponde a que temperatura na escala X?

- 7 Em uma escala linear de temperatura X, a água evapora a  $-53,5^\circ\text{X}$  e congela a  $-170^\circ\text{X}$ . Quanto vale a temperatura de 340 K na escala X? (Aproxime o ponto de ebulição da água para 373 K.)

### seção 18-6 Dilatação Térmica

- 8 Um mastro de alumínio tem 33 m de altura. De quanto seu comprimento aumenta quando a temperatura aumenta de  $15^\circ\text{C}$ ?

- 9 Determine a variação de volume de uma esfera de alumínio com um raio inicial de 10 cm quando a esfera é aquecida de  $0,0^\circ\text{C}$  para  $100^\circ\text{C}$ .

- 10 Uma barra feita de uma liga de alumínio tem um comprimento de 10,000 cm a  $20,000^\circ\text{C}$  e um comprimento de 10,015 cm no ponto de ebulição da água. (a) Qual é o comprimento da barra no ponto de congelamento da água? (b) Qual é a temperatura para a qual o comprimento da barra é 10,009 cm?

- 11 Um furo circular em uma placa de alumínio tem 2,725 cm de diâmetro a  $0,000^\circ\text{C}$ . Qual é o diâmetro do furo quando a temperatura da placa é aumentada para  $100,0^\circ\text{C}$ ?

- 12 A  $20^\circ\text{C}$ , um cubo de bronze tem 30 cm de aresta. Qual é o aumento da área superficial do cubo quando ele é aquecido de  $20^\circ\text{C}$  para  $75^\circ\text{C}$ ?

- 13 Qual é o volume de uma bola de chumbo a  $30,00^\circ\text{C}$  se o volume da bola é  $50,00 \text{ cm}^3$  a  $60,00^\circ\text{C}$ ?

- 14 Quando a temperatura de um cilindro de metal é aumentada de  $0,0^\circ\text{C}$  para  $100^\circ\text{C}$ , seu comprimento aumenta de 0,23%. (a) Determine a variação percentual da massa específica. (b) De que metal é feito o cilindro? Consulte a Tabela 18-2.

- 15 Uma xícara de alumínio com um volume de  $100 \text{ cm}^3$  está cheia de glicerina a  $22^\circ\text{C}$ . Que volume de glicerina é derramado se a temperatura da glicerina e da xícara aumenta para  $28^\circ\text{C}$ ? (O coeficiente de dilatação volumétrica da glicerina é  $5,1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ .)

- 16 A  $20^\circ\text{C}$ , uma barra tem exatamente 20,05 cm de comprimento, de acordo com uma régua de aço. Quando a barra e a régua são colocadas em um forno a  $270^\circ\text{C}$ , a barra passa a medir 20,11 cm de acordo com a mesma régua. Qual é o coeficiente de expansão linear do material de que é feita a barra?

- 17 Uma barra de aço tem 3,000 cm de diâmetro a  $25,00^\circ\text{C}$ . Um anel de latão tem um diâmetro interno de 2,992 cm a  $25,00^\circ\text{C}$ . Se os dois objetos são mantidos em equilíbrio térmico, a que temperatura a barra se ajusta perfeitamente ao furo?

- 18 Quando a temperatura de uma moeda de cobre é aumentada de  $100^\circ\text{C}$  o diâmetro aumenta de 0,18%. Com precisão de dois algarismos significativos, determine o aumento percentual (a) da área, (b) da espessura, (c) do volume e (d) da massa específica da moeda. (e) Calcule o coeficiente de dilatação linear da moeda.

- 19 Um tubo de vidro vertical de comprimento  $L = 1,280\,000 \text{ m}$  está cheio até a metade com um líquido a  $20,000\,000^\circ\text{C}$ . De quanto a altura do líquido no tubo varia quando o tubo é aquecido para  $30,000\,000^\circ\text{C}$ ? Suponha que  $\alpha_{\text{vídeo}} = 1,000\,000 \times 10^{-5}/\text{K}$  e  $\beta_{\text{líquido}} = 4,000\,000 \times 10^{-5}/\text{K}$ .

- 20 Em um certo experimento, uma pequena fonte radioativa deve se mover com velocidades selecionadas, extremamente baixas. Este movimento é conseguido prendendo a fonte a uma das extremidades de uma barra de alumínio e aquecendo a região central da barra de forma controlada. Se a parte aquecida da barra da Fig. 18-30 tem um comprimento  $d = 2,00 \text{ cm}$ , a que taxa constante a temperatura da barra deve variar para que a fonte se move com uma velocidade constante de  $100 \text{ nm/s}$ ?

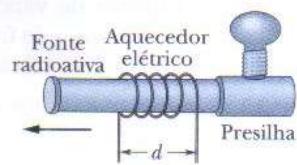


FIG. 18-30 Problema 20.

- 21** Como resultado de um aumento de temperatura de  $32^{\circ}\text{C}$ , uma barra com uma rachadura no centro dobra para cima (Fig. 18-31). Se a distância fixa  $L_0$  é 3,77 m e o coeficiente de dilatação linear da barra é  $25 \times 10^{-6}/\text{C}^{\circ}$ , determine a altura  $x$  do centro da barra.

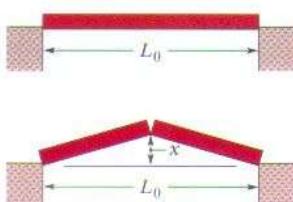


FIG. 18-31 Problema 21.

### seção 18-8 A Absorção de Calor por Sólidos e Líquidos

- 22** Uma certa substância tem uma massa por mol de  $50,0\text{ g/mol}$ . Quando  $314\text{ J}$  são adicionados em forma de calor a uma amostra de  $30,0\text{ g}$ , a temperatura da amostra sobe de  $25,0^{\circ}\text{C}$  para  $45,0^{\circ}\text{C}$ . Quais são (a) o calor específico e (b) o calor específico molar da substância? (c) Quantos mols estão presentes na amostra?

- 23** Um certo nutricionista aconselha as pessoas que querem perder peso a beber água gelada. Sua teoria é a de que o corpo deve queimar gordura suficiente para aumentar a temperatura da água de  $0,00^{\circ}\text{C}$  para a temperatura do corpo de  $37,0^{\circ}\text{C}$ . Quantos litros de água gelada uma pessoa precisa beber para queimar  $454\text{ g}$  de gordura, supondo que para queimar esta quantidade de gordura  $3500\text{ Cal}$  devem ser transferidas para a água? Por que não é recomendável seguir o conselho do nutricionista? (Um litro =  $10^3\text{ cm}^3$ . A massa específica da água é  $1,00\text{ g/cm}^3$ .)

- 24** Que massa de água permanece no estado líquido depois que  $50,2\text{ kJ}$  são transferidos na forma de calor a partir de  $260\text{ g}$  de água inicialmente no ponto de congelamento?

- 25** Calcule a menor quantidade de energia, em joules, necessária para fundir  $130\text{ g}$  de prata inicialmente a  $15,0^{\circ}\text{C}$ .

- 26** Uma forma de evitar que os objetos que se encontram no interior de uma garagem congelem em uma noite fria de inverno, em que a temperatura cai abaixo do ponto de congelamento da água, é colocar uma banheira velha com água na garagem. Se a massa da água é  $125\text{ kg}$  e a temperatura inicial é  $20^{\circ}\text{C}$ , (a) que energia a água deve transferir para o ambiente para congelar totalmente e (b) qual é a menor temperatura possível da água e do ambiente até que isso aconteça?

- 27** Um pequeno aquecedor elétrico de imersão é usado para esquentar  $100\text{ g}$  de água, com o objetivo de preparar uma xícara de café solúvel. Trata-se de um aquecedor de "200 watts" (esta é a taxa de conversão de energia elétrica em energia térmica). Calcule o tempo necessário para aquecer a água de  $23,0^{\circ}\text{C}$  para  $100^{\circ}\text{C}$ , desprezando as perdas de calor.

- 28** Que massa de manteiga, que possui um valor calórico de  $6,0\text{ Cal/g}$  ( $= 6000\text{ cal/g}$ ), equivale à variação de energia potencial gravitacional de um homem de  $73,0\text{ kg}$  que sobe do nível do mar para o alto do monte Everest, a  $8,84\text{ km}$  de altura? Suponha que o valor médio de g durante a escalada é  $9,80\text{ m/s}^2$ .

- 29** Que massa de vapor a  $100^{\circ}\text{C}$  deve ser misturada com  $150\text{ g}$  de gelo no ponto de fusão, em um recipiente isolado termicamente, para produzir água a  $50^{\circ}\text{C}$ ?

- 30** Um tacho de cobre de  $150\text{ g}$  contém  $220\text{ g}$  de água, e ambos estão a  $20,0^{\circ}\text{C}$ . Um cilindro de cobre de  $300\text{ g}$ , muito quente, é jogado na água, fazendo a água ferver e transformando  $5,0\text{ g}$  da água em vapor. A temperatura final do sistema é de  $100^{\circ}\text{C}$ . Despreze a transferência de energia para o ambiente. (a) Qual é a energia (em calorias) transferida para a água em forma de calor? (b) Qual é a energia transferida para o tacho? (c) Qual é a temperatura inicial do cilindro?

- 31** *Versão não-métrica:* (a) Quanto tempo um aquecedor de água de  $2,0 \times 10^5\text{ Btu/h}$  leva para elevar a temperatura de 40 galões de água de  $70^{\circ}\text{F}$  para  $100^{\circ}\text{F}$ ? *Versão métrica:* (b) Quanto tempo um aquecedor de água de  $59\text{ kW}$  leva para elevar a temperatura de 150 litros de água de  $21^{\circ}\text{C}$  para  $38^{\circ}\text{C}$ ?

- 32** Duas amostras, *A* e *B*, estão a diferentes temperaturas quando são colocadas em contato em um recipiente termicamente isolado até entrarem em equilíbrio térmico. A Fig. 18-32a mostra as temperaturas  $T$  das duas amostras em função do tempo  $t$ . A amostra *A* tem uma massa de  $5,0\text{ kg}$ ; a amostra *B* tem uma massa de  $1,5\text{ kg}$ . A Fig. 18-32b é um gráfico do material da amostra *B* que indica a variação de temperatura  $\Delta T$  que o material sofre quando recebe uma energia  $Q$  na forma de calor. A variação  $\Delta T$  está plotada em função da energia  $Q$  por unidade de massa do material, e a escala vertical é definida por  $\Delta T_s = 4,0^{\circ}\text{C}$ . Qual é o calor específico da amostra *A*?

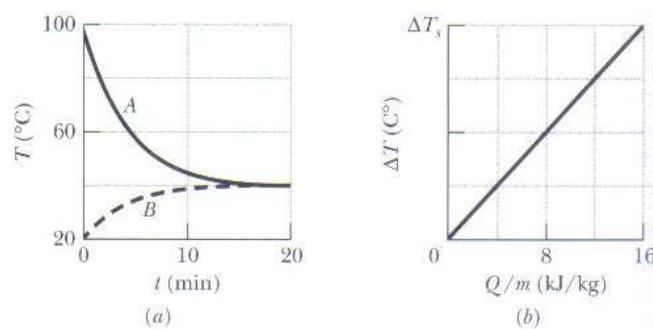


FIG. 18-32 Problema 32.

- 33** Em um aquecedor solar a radiação do Sol é absorvida pela água que circula em tubos em um coletor situado no telhado. A radiação solar penetra no coletor através de uma cobertura transparente e aquece a água dos tubos; essa água é bombeada para um tanque de armazenamento. Suponha que a eficiência global do sistema é de  $20\%$  (ou seja,  $80\%$  da energia solar incidente são perdidos). Que área de coleta é necessária para aumentar a temperatura de  $200\text{ L}$  de água no tanque de  $20^{\circ}\text{C}$  para  $40^{\circ}\text{C}$  em  $1,0\text{ h}$  se a intensidade da luz solar incidente é  $700\text{ W/m}^2$ ?

- 34** Uma amostra de  $0,400\text{ kg}$  é colocada em um sistema de resfriamento que remove calor a uma taxa constante. A Fig. 18-33 indica a temperatura  $T$  da amostra em função do tempo  $t$ ; a escala do eixo horizontal é definida por  $t_s = 80,0\text{ min}$ . A amostra congela durante o processo. O calor específico da amostra no estado líquido inicial é  $3000\text{ J/kg} \cdot \text{K}$ . Determine (a) o calor de fusão da amostra e (b) o calor específico na fase sólida.

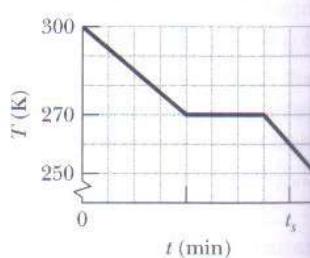


FIG. 18-33 Problema 34.

- 35** Uma garrafa térmica contém  $130\text{ cm}^3$  de café a  $80,0^{\circ}\text{C}$ . Um cubo de gelo de  $12,0\text{ g}$  à temperatura de fusão é usado para esfriar o café. De quantos graus o café esfria depois que todo o gelo derrete e o equilíbrio térmico é atingido? Trate o café como se fosse água pura e despreze as trocas de energia com o ambiente.

- 36** Uma amostra de  $0,530\text{ kg}$  de água e uma amostra de gelo são colocadas em um recipiente termicamente isolado. O recipiente também contém um dispositivo que transfere calor da

água para o gelo a uma taxa constante  $P$ , até que o equilíbrio térmico seja estabelecido. As temperaturas  $T$  da água e do gelo são mostradas na Fig. 18-34 em função do tempo  $t$ ; a escala do eixo horizontal é definida por  $t_s = 80,0$  min. (a) Qual é a taxa  $P$ ? (b) Qual é a massa inicial de gelo no recipiente? (c) Quando o equilíbrio térmico é atingido, qual é a massa do gelo produzido?

**••37** O álcool etílico tem um ponto de ebulição de  $78,0^\circ\text{C}$ , um ponto de congelamento de  $-114^\circ\text{C}$ , um calor de vaporização de  $879 \text{ kJ/kg}$ , um calor de fusão de  $109 \text{ kJ/kg}$  e um calor específico de  $2,43 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ . Quanta energia deve ser removida de  $0,510 \text{ kg}$  de álcool etílico que está inicialmente na forma de gás a  $78,0^\circ\text{C}$  para que ele se torne um sólido a  $-114^\circ\text{C}$ ?

**••38** O calor específico de uma substância varia com a temperatura de acordo com a equação  $c = 0,20 + 0,14T + 0,023T^2$ , com  $T$  em  $^\circ\text{C}$  e  $c$  em  $\text{cal/g} \cdot \text{K}$ . Determine a energia necessária para aumentar a temperatura de  $2,0 \text{ g}$  desta substância de  $5,0^\circ\text{C}$  para  $15^\circ\text{C}$ .

**••39** Uma pessoa faz chá gelado misturando  $500 \text{ g}$  de chá quente (que se comporta como água pura) com a mesma massa de gelo no ponto de fusão. Suponha que a troca de energia entre a mistura e o ambiente é desprezível. Se a temperatura inicial do chá é  $T_i = 90^\circ\text{C}$ , qual é (a) a temperatura da mistura  $T_f$  e (b) a massa  $m_f$  do gelo remanescente quando o equilíbrio térmico é atingido? Se  $T_i = 70^\circ\text{C}$ , qual é o valor (c) de  $T_f$  e (d) de  $m_f$  quando o equilíbrio térmico é atingido?

**••40** *Pingentes de gelo.* A água cobre a superfície de um pingente de gelo ativo (em processo de crescimento) e forma um tubo curto e estreito na extremidade do eixo central (Fig. 18-35). Como a temperatura da interface água-gelo é  $0^\circ\text{C}$ , a água do tubo não pode perder energia para os lados do pingente ou para a ponta do tubo, porque não há variação de temperatura nessas direções. A água pode perder energia e congelar apenas transferindo energia para cima (através de uma distância  $L$ ) até o alto do pingente, onde a temperatura  $T_r$  pode ser menor que  $0^\circ\text{C}$ . Suponha que  $L = 0,12 \text{ m}$  e  $T_r = -5^\circ\text{C}$ . Suponha também que a seção reta do tubo e do pingente é  $A$ . Qual é, em termos de  $A$ , (a) a taxa com a qual a energia é transferida para cima e (b) a taxa com a qual a massa é convertida de água para gelo no alto do tubo central? (c) Qual é a velocidade com a qual o pingente se move para baixo por causa do congelamento da água? A condutividade térmica do gelo é  $0,400 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  e a massa específica da água é  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

**••41** (a) Dois cubos de gelo de  $50 \text{ g}$  são misturados com  $200 \text{ g}$  de água em um recipiente termicamente isolado. Se a água está inicialmente a  $25^\circ\text{C}$  e o gelo foi removido de um congelador a  $-15^\circ\text{C}$ , qual é a temperatura final em equilíbrio térmico? (b) Qual é a temperatura final se é usado apenas um cubo de gelo?

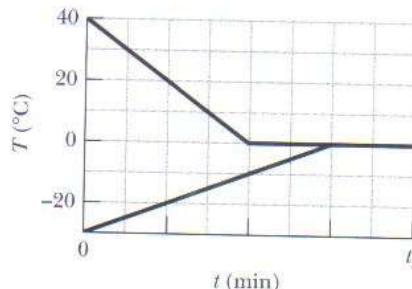


FIG. 18-34 Problema 36.

**••42** Um anel de cobre de  $20,0 \text{ g}$  a  $0,000^\circ\text{C}$  tem um diâmetro interno  $D = 2,540\ 00 \text{ cm}$ . Uma esfera de alumínio a  $100,0^\circ\text{C}$  tem um diâmetro  $d = 2,545\ 08 \text{ cm}$ . A esfera é colocada acima do anel (Fig. 18-36) até que os dois atinjam o equilíbrio térmico, sem perda de calor para o ambiente. A esfera se ajusta exatamente ao anel na temperatura do equilíbrio. Qual é a massa da esfera?

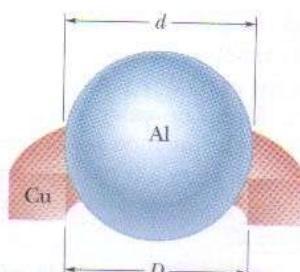


FIG. 18-36 Problema 42.

### seção 18-11 Alguns Casos Especiais da Primeira Lei da Termodinâmica

**•43** Um gás em uma câmara fechada passa pelo ciclo mostrado no diagrama  $p$ - $V$  da Fig. 18-37. A escala do eixo horizontal é definida por  $V_s = 4,0 \text{ m}^3$ . Calcule a energia líquida adicionada ao sistema em forma de calor durante um ciclo completo.

**•44** Um trabalho de  $200 \text{ J}$  é realizado sobre um sistema, e uma quantidade de calor de  $70,0 \text{ cal}$  é removida do sistema. Qual é o valor (incluindo o sinal) (a) de  $W$ , (b) de  $Q$  e (c) de  $\Delta E_{\text{int}}$ ?

**•45** Na Fig. 18-38 uma amostra de gás se expande de  $V_0$  para  $4,0V_0$  enquanto a pressão diminui de  $p_0$  para  $p_0/4,0$ . Se  $V_0 = 1,0 \text{ m}^3$  e  $p_0 = 40 \text{ Pa}$ , qual é o trabalho realizado pelo gás se a pressão varia com o volume de acordo (a) com a trajetória  $A$ , (b) com a trajetória  $B$  e (c) com a trajetória  $C$ ?

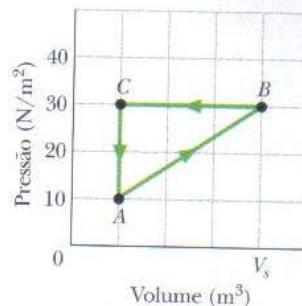


FIG. 18-37 Problema 43.

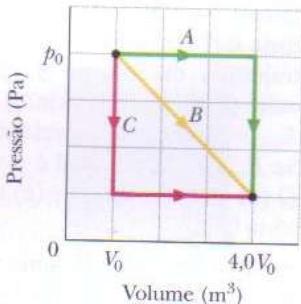
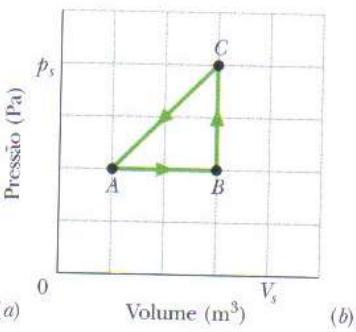


FIG. 18-38 Problema 45.

**•46** Um sistema termodinâmico passa do estado  $A$  para o estado  $B$ , do estado  $B$  para o estado  $C$  e de volta para o estado  $A$ , como mostra o diagrama  $p$ - $V$  da Fig. 18-39a. A escala do eixo vertical é definida por  $p_s = 40 \text{ Pa}$ , e a escala do eixo horizontal é definida por  $V_s = 4,0 \text{ m}^3$ . (a)–(g) Complete a tabela da Fig. 18-39b introduzindo um sinal positivo, um sinal negativo ou um zero nas células indicadas. (h) Qual é o trabalho líquido realizado pelo sistema em um ciclo  $ABCA$ ?



	$Q$	$W$	$\Delta E_{\text{int}}$
$A \rightarrow B$	(a)	(b)	+
$B \rightarrow C$	+	(c)	(d)
$C \rightarrow A$	(e)	(f)	(g)

FIG. 18-39 Problema 46.

**•47** A Fig. 18-40 mostra um ciclo fechado de um gás (a figura não foi desenhada em escala). A variação da energia interna do

gás ao passar de *a* para *c* ao longo da trajetória *abc* é  $-200\text{ J}$ . Quando o gás passa de *c* para *d* recebe  $180\text{ J}$  na forma de calor. Mais  $80\text{ J}$  são recebidos quando o gás passa de *d* para *a*. Qual é o trabalho líquido realizado sobre o gás quando ele passa de *c* para *d*?

**••48** Uma amostra de gás passa pelo ciclo *abca* mostrado no diagrama *p-V* da Fig. 18-41. O trabalho líquido realizado é  $+1,2\text{ J}$ . Ao longo da trajetória *ab* a variação da energia interna é  $+3,0\text{ J}$ , e o valor absoluto do trabalho realizado é  $5,0\text{ J}$ . Ao longo da trajetória *ca* a energia transferida para o gás na forma de calor é  $+2,5\text{ J}$ . Qual é a energia transferida na forma de calor ao longo (a) da trajetória *ab* e (b) da trajetória *bc*?

**••49** Quando um sistema passa do estado *i* para o estado *f* seguindo a trajetória *iaf* da Fig. 18-42,  $Q = 50\text{ cal}$  e  $W = 20\text{ cal}$ . Ao longo da trajetória *ibf*,  $Q = 36\text{ cal}$ . (a) Quanto vale  $W$  ao longo da trajetória *ibf*? (b) Se  $W = -13\text{ cal}$  na trajetória de retorno *fi*, quanto vale  $Q$  nesta trajetória? (c) Se  $E_{int,i} = 10\text{ cal}$ , qual é o valor de  $E_{int,f}$ ? Se  $E_{int,b} = 22\text{ cal}$ , qual é o valor de  $Q$  (d) na trajetória *ib* e (e) na trajetória *bf*?

**••50** Um gás em uma câmara passa pelo ciclo mostrado na Fig. 18-43. Determine a energia transferida pelo sistema na forma de calor durante o processo *CA* se a energia adicionada como calor  $Q_{AB}$  durante o processo *AB* é  $20,0\text{ J}$ , nenhuma energia é transferida como calor durante o processo *BC* e o trabalho líquido realizado durante o ciclo é  $15,0\text{ J}$ .

### seção 18-12 Mecanismos de Transferência de Calor

**•51** Considere a placa da Fig. 18-18. Suponha que  $L = 25,0\text{ cm}$ ,  $A = 90,0\text{ cm}^2$  e que o material é cobre. Se  $T_Q = 125^\circ\text{C}$ ,  $T_F = 10,0^\circ\text{C}$  e um regime estacionário é atingido, determine a taxa de condução de calor através da placa.

**•52** Se você se expusesse por alguns momentos ao espaço sideral longe do Sol e sem um traje espacial (como fez um astronauta no filme 2001: Uma Odisséia no Espaço), sentiria o frio do espaço, ao irradiar muito mais energia que a absorvida do ambiente. (a) Com que taxa você perderia energia? (b) Quanta energia você perderia em  $30\text{ s}$ ? Suponha que sua emissividade é  $0,90$  e estime outros dados necessários para os cálculos.

**•53** Uma barra cilíndrica de cobre de  $1,2\text{ m}$  de comprimento e  $4,8\text{ cm}^2$  de seção reta é bem isolada e não perde energia através da superfície. A diferença de temperatura entre as extremidades é  $100^\circ\text{C}$ , já que uma está imersa em uma mistura de água e gelo

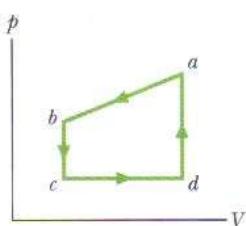


FIG. 18-40 Problema 47.

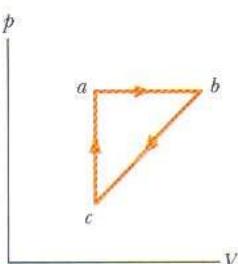


FIG. 18-41 Problema 48.

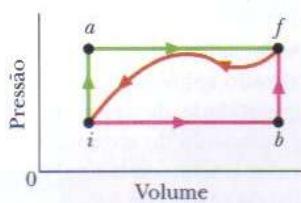


FIG. 18-42 Problema 49.

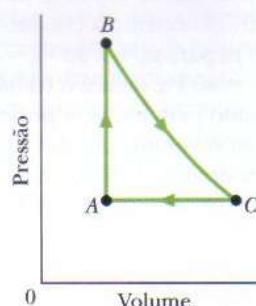


FIG. 18-43 Problema 50.

e a outra em uma mistura de água e vapor. (a) Com que taxa a energia é conduzida pela barra? (b) Com que taxa o gelo derrete na extremidade fria?

**•54** O teto de uma casa em uma cidade de clima frio deve ter uma resistência térmica  $R$  de  $30\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Para isso, qual deve ser a espessura de um revestimento (a) de espuma de poliuretano e (b) de prata?

**•55** Uma esfera com  $0,500\text{ m}$  de raio, cuja emissividade é  $0,850$ , está a  $27,0^\circ\text{C}$  em um local onde a temperatura ambiente é  $77,0^\circ\text{C}$ . Com que taxa a esfera (a) emite e (b) absorve radiação térmica? (c) Qual é a taxa líquida de troca de energia da esfera?

**•56** Um cilindro maciço de raio  $r_1 = 2,5\text{ cm}$ , comprimento  $h_1 = 5,0\text{ cm}$ , emissividade  $0,850$  e temperatura  $30^\circ\text{C}$  está suspenso em um ambiente de temperatura  $50^\circ\text{C}$ . (a) Qual é a taxa líquida  $P_1$  de transferência de radiação térmica do cilindro? (b) Se o cilindro é esticado até que seu raio seja  $r_2 = 0,50\text{ cm}$ , sua taxa líquida de transferência de radiação térmica passa a ser  $P_2$ . Qual é a razão  $P_2/P_1$ ?

**•57** Na Fig. 18-44a, duas barras retangulares iguais de metal são soldadas nas extremidades e mantidas a uma temperatura  $T_1 = 0^\circ\text{C}$  do lado esquerdo e uma temperatura  $T_2 = 100^\circ\text{C}$  do lado direito. Em  $2,0\text{ min}$ ,  $10\text{ J}$  são conduzidos a uma taxa constante do lado direito para o lado esquerdo. Que tempo seria necessário para conduzir  $10\text{ J}$  se as placas fossem soldadas lado a lado como na Fig. 18-44b?

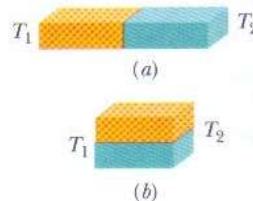


FIG. 18-44 Problema 57.

**•58** A Fig. 18-45 mostra uma parede feita de três camadas de espessuras  $L_1$ ,  $L_2 = 0,700L_1$  e  $L_3 = 0,350L_1$ . As condutividades térmicas são  $k_1$ ,  $k_2 = 0,900k_1$  e  $k_3 = 0,800k_1$ . As temperaturas do lado esquerdo e do lado direito da parede são  $T_Q = 30,0^\circ\text{C}$  e  $T_F = -15,0^\circ\text{C}$ , respectivamente. O sistema está no regime estacionário. (a) Qual é a diferença de temperatura  $\Delta T_2$  na camada 2 (entre o lado esquerdo e o lado direito da camada)? Se o valor de  $k_2$  fosse  $1,10k_1$ , (b) a taxa de condução de energia através da parede seria maior, menor ou igual à anterior, e (c) qual seria o valor de  $\Delta T_2$ ?

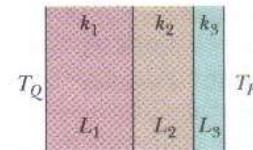


FIG. 18-45 Problema 58.

**•59** (a) Qual é a taxa de perda de energia em watts por metro quadrado através de uma janela de vidro de  $3,0\text{ mm}$  de espessura se a temperatura externa é  $-20^\circ\text{F}$  e a temperatura interna é  $+72^\circ\text{F}$ ? (b) Uma janela para tempestades, feita com a mesma espessura de vidro, é instalada do lado de fora da primeira, com um espaço de  $7,5\text{ cm}$  entre as duas janelas. Qual é a nova taxa de perda de energia se a condução é o único mecanismo importante de perda de energia?

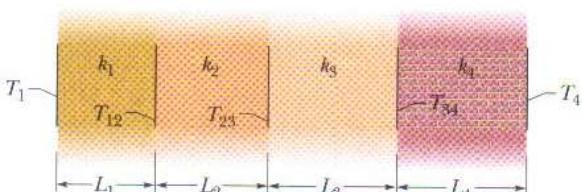
**•60** A vespa gigante *Vespa mandarinia japonica* se alimenta de abelhas japonesas. Entretanto, se uma vespa tenta invadir uma colmeia centenas de abelhas formam rapidamente uma bola em torno da vespa para detê-la. As abelhas não picam, mordem, esmagam ou sufocam a vespa; limitam-se a aquecer-lá, aumentando sua temperatura do valor normal de  $35^\circ\text{C}$  para  $47^\circ\text{C}$  ou  $48^\circ\text{C}$ , um valor que é mortal para a vespa, mas não para as abelhas (Fig. 18-46). Suponha o seguinte: 500 abelhas formam uma bola de raio  $R = 2,0\text{ cm}$  durante um intervalo de tempo  $t = 20\text{ min}$ , o mecanismo principal de perda de energia da bola é a radiação térmica, a superfície da bola tem uma emissividade  $\epsilon = 0,80$  e a

temperatura da bola é uniforme. Qual é a quantidade de energia que uma abelha precisa produzir, em média, durante os 20 min para manter a temperatura da bola em  $47^\circ\text{C}$ ? 



**FIG. 18-46**  
Problema 60.  
(©Dr. Masato  
Ono, Tamagawa  
University)

**••61** A Fig. 18-47 mostra uma parede feita de quatro camadas, de condutividades térmicas  $k_1 = 0,060 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $k_3 = 0,040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  e  $k_4 = 0,12 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  ( $k_2$  não é conhecida). As espessuras das camadas são  $L_1 = 1,5 \text{ cm}$ ,  $L_3 = 2,8 \text{ cm}$  e  $L_4 = 3,5 \text{ cm}$  ( $L_2$  não é conhecida). As temperaturas conhecidas são  $T_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $T_{12} = 25^\circ\text{C}$  e  $T_4 = -10^\circ\text{C}$ . A transferência de energia está no regime estacionário. Qual é o valor da temperatura  $T_{34}$ ?



**FIG. 18-47** Problema 61.

**••62 Aglomerações de pingüins.** Para suportar o frio da Antártica os pingüins-imperadores se aglomeram (Fig. 18-48). Suponha que um pingüim é um cilindro circular de altura  $h = 1,1 \text{ m}$  e com uma área da base  $a = 0,34 \text{ m}^2$ . Seja  $P_i$  a taxa com a qual um pingüim isolado irradia energia para o ambiente (através das superfícies superior e lateral); nesse caso,  $NP_i$  é a taxa com a qual  $N$  pingüins iguais e separados irradiam energia. Se os pingüins se aglomeram para formar um cilindro único de altura  $h$  e área da base  $Na$ , o cilindro irradia com uma taxa  $P_u$ . Se  $N = 1000$ , deter-



**FIG. 18-48** Problema 62.  
(Alain Torterot/Peter Arnold, Inc.)

mine (a) o valor da razão  $P_u/NP_i$  e (b) a redução percentual da perda de energia devido à aglomeração. 

**••63** Formou-se gelo em um pequeno lago, e o regime estacionário foi atingido com o ar acima do gelo a  $-5,0^\circ\text{C}$  e o fundo do lago a  $4,0^\circ\text{C}$ . Se a profundidade total do gelo + água é  $1,4 \text{ m}$ , qual é a espessura do gelo? (Suponha que as condutividades térmicas do gelo e da água são  $0,40$  e  $0,12 \text{ cal/m} \cdot \text{C} \cdot \text{s}$ , respectivamente.)

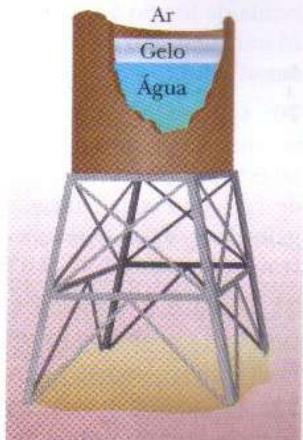
**••64 Efeito Leidenfrost.** Quando se deixa cair uma gota de água em uma frigideira cuja temperatura está entre  $100^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$  a gota dura menos de 1 s.

Entretanto, se a temperatura da frigideira é maior a gota pode durar vários minutos, um efeito que recebeu o nome de um médico alemão que foi um dos primeiros a investigar o fenômeno. O efeito se deve à formação de uma fina camada de ar e vapor de água que separa a gota do metal (Fig. 18-49). Suponha que a distância entre a gota e a frigideira é  $L = 0,100 \text{ mm}$  e que a gota tem a forma de um cilindro de altura  $h = 1,50 \text{ mm}$  e área da base  $A = 4,00 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . Suponha também que a frigideira é mantida a uma temperatura constante  $T_f = 300^\circ\text{C}$  e que a temperatura da gota é  $100^\circ\text{C}$ . A massa específica da água é  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , e a condutividade térmica da camada que separa a gota da frigideira é  $k = 0,026 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . (a) Com que taxa a energia é conduzida da frigideira para a gota? (b) Se a condução é a principal forma de transmissão de energia da frigideira para a gota, quanto tempo a gota leva para evaporar? 

**••65** Um camada de gelo de  $5,0 \text{ cm}$  de espessura se formou na superfície de uma caixa-d'água em um dia frio de inverno (Fig. 18-50). O ar acima do gelo está a  $-10^\circ\text{C}$ . Calcule a taxa de formação da placa de gelo em  $\text{cm}/\text{h}$ . Suponha que a condutividade térmica do gelo é  $0,0040 \text{ cal/s} \cdot \text{cm} \cdot \text{C}^\circ$  e que a massa específica é  $0,92 \text{ g/cm}^3$ . Suponha também que a transferência de energia através das paredes e do fundo do tanque pode ser desprezada.



**FIG. 18-49** Problema 64.



**FIG. 18-50** Problema 65.

**••66 Resfriamento de bebidas por evaporação.** Uma bebida pode ser mantida fresca, mesmo em um dia quente, se for colocada em um recipiente poroso de cerâmica embebida em água. Suponha que a energia perdida por evaporação seja igual à energia recebida em consequência da troca de radiação através da superfície superior e das superfícies laterais do recipiente. O recipiente e a bebida estão a uma temperatura  $T = 15^\circ\text{C}$ , a temperatura ambiente é  $T_{\text{amb}} = 32^\circ\text{C}$  e o recipiente é um cilindro de raio  $r = 2,2 \text{ cm}$  e altura  $h = 10 \text{ cm}$ . Suponha que a emissividade é  $\epsilon = 1$  e despreze outras trocas de energia. Qual é a taxa  $dm/dt$  de perda de massa de água do recipiente, em  $\text{g/s}$ ? 

#### Problemas Adicionais

**67** Na extrusão de chocolate frio através de um tubo, o êmbolo que empurra o chocolate realiza trabalho. O trabalho por unidade de massa do chocolate é igual a  $p/\rho$ , onde  $p$  é a diferença entre a pressão aplicada e a pressão no local onde o chocolate sai do tubo, e  $\rho$  é a massa específica do chocolate. Em vez de aumentar a temperatura, este trabalho funde a manteiga de cacau do choco-

late, cujo calor de fusão é 150 kJ/kg. Suponha que todo o trabalho é consumido na fusão e que a manteiga de cacau constitui 30% da massa do chocolate. Que porcentagem da manteiga de cacau é fundida durante a extrusão se  $p = 5,5 \text{ MPa}$  e  $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ ?

**68** Em uma série de experimentos, um bloco  $B$  é colocado em um recipiente termicamente isolado em contato com um bloco  $A$ , que tem a mesma massa que o bloco  $B$ . Em cada experimento o bloco  $B$  está inicialmente a uma certa temperatura  $T_B$ , mas a temperatura do bloco  $A$  varia de experimento para experimento. Suponha que  $T_f$  represente a temperatura final dos dois blocos ao atingirem o equilíbrio térmico. A Fig. 18-51 mostra a temperatura  $T_f$  em função da temperatura inicial  $T_A$  para um certo intervalo de valores possíveis de  $T_A$ , de  $T_{A1} = 0 \text{ K}$  até  $T_{A2} = 500 \text{ K}$ . A escala do eixo vertical é definida por  $T_{fs} = 400 \text{ K}$ . Quais são (a) a temperatura  $T_B$  e (b) a razão  $c_B/c_A$  entre os calores específicos dos blocos?

**69** Uma amostra de 0,300 kg é colocada em uma geladeira que remove calor a uma taxa constante de 2,81 W. A Fig. 18-52 mostra a temperatura  $T$  da amostra em função do tempo  $t$ . A escala de temperatura é definida por  $T_s = 30^\circ\text{C}$ , e a escala de tempo é definida por  $t_s = 20 \text{ min}$ . Qual é o calor específico da amostra?

**70** Calcule o calor específico de um metal a partir dos dados a seguir. Um recipiente feito do metal tem uma massa de 3,6 kg e contém 14 kg de água. Um pedaço de 1,8 kg do metal, inicialmente à temperatura de  $180^\circ\text{C}$ , é mergulhado na água. O recipiente e a água estão inicialmente a uma temperatura de  $16,0^\circ\text{C}$ , e a temperatura final do sistema é  $18,0^\circ\text{C}$ .

**71** Qual é o aumento de volume de um cubo de alumínio com 5,00 cm de lado quando o cubo é aquecido de  $10,0^\circ\text{C}$  para  $60,0^\circ\text{C}$ ?

**72** Uma barra de cobre, uma barra de alumínio e uma barra de latão, todas com 6,00 m de comprimento e 1,00 cm de diâmetro, são colocadas em contato pelas extremidades, com a barra de alumínio no meio. A extremidade livre da barra de cobre é mantida no ponto de ebulição da água, e a extremidade livre da barra de latão é mantida no ponto de congelamento da água. Qual é a temperatura, no regime estacionário, (a) da junção cobre-alumínio e (b) da junção alumínio-latão?

**73** Uma amostra de gás sofre uma transição de um estado inicial  $a$  para um estado final  $b$  por três diferentes trajetórias (processos), como mostra o diagrama  $p$ - $V$  da Fig. 18-53, onde  $V_b = 5,00V_i$ . A energia transferida para o gás como calor no processo 1 é  $10p_iV_i$ . Em termos de  $p_iV_i$ , quais são (a) a energia transferida para o gás como calor no processo 2 e (b) a variação da energia interna do gás no processo 3?

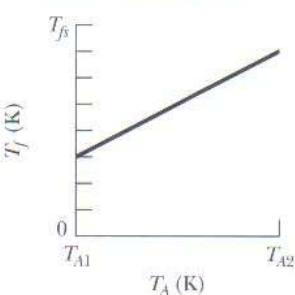


FIG. 18-51 Problema 68.

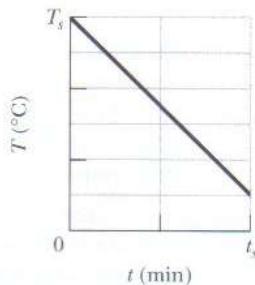


FIG. 18-52 Problema 69.

**74** A taxa média com a qual a energia chega à superfície do solo na América do Norte é  $54,0 \text{ mW/m}^2$ , e a condutividade térmica média das rochas próximas da superfície é  $2,50 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . Supondo que a temperatura da superfície é de  $10,0^\circ\text{C}$ , determine a temperatura a uma profundidade de 35,0 km (perto da base da crosta). Ignore o calor gerado pela presença de elementos radioativos.

**75** A temperatura de um disco de Pyrex varia de  $10,0^\circ\text{C}$  para  $60,0^\circ\text{C}$ . O raio inicial do disco é 8,00 cm e a espessura inicial é 0,500 cm. Tome esses dados como sendo exatos. Qual é a variação do volume do disco? (Veja a Tabela 18-2.)

**76** Em certa casa com aquecimento solar, a energia proveniente do Sol é armazenada em barris com água. Em cinco dias seguidos no inverno, em que o tempo permanece nublado,  $1,00 \times 10^6 \text{ kcal}$  são necessárias para manter o interior da casa a  $22,0^\circ\text{C}$ . Supondo que a água dos barris está a  $50,0^\circ\text{C}$  e que a água tem uma massa específica de  $1,00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , que volume de água é necessário?

**77** Uma amostra de gás se expande de uma pressão inicial de  $10 \text{ Pa}$  e um volume inicial de  $1,0 \text{ m}^3$  para um volume final de  $2,0 \text{ m}^3$ . Durante a expansão, a pressão e o volume estão relacionados pela equação  $p = aV^2$ , onde  $a = 10 \text{ N/m}^8$ . Determine o trabalho realizado pelo gás durante a expansão.

**78** (a) Calcule a taxa com a qual o calor do corpo atravessa a roupa de um esquiador em regime estacionário, a partir dos seguintes dados: a área da superfície do corpo é  $1,8 \text{ m}^2$ ; a roupa tem 1,0 cm de espessura; a temperatura da pele é  $33^\circ\text{C}$ ; a temperatura da superfície externa da roupa é  $1,0^\circ\text{C}$ ; a condutividade térmica da roupa é  $0,040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ . (b) Se, após uma queda, a roupa do esquiador fica encharcada de água, cuja condutividade térmica é  $0,60 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , por que fator a taxa de condução é multiplicada?

**79** A Fig. 18-54 mostra um ciclo fechado a que um gás é submetido. De  $c$  até  $b$ , 40 J deixam o gás em forma de calor. De  $b$  até  $a$ , 130 J deixam o gás em forma de calor, e o valor absoluto do trabalho realizado pelo gás é 80 J. De  $a$  até  $c$ , 400 J são recebidos pelo gás na forma de calor. Qual é o trabalho realizado pelo gás de  $a$  até  $c$ ? (Sugestão: É preciso levar em conta os sinais dos dados fornecidos.)

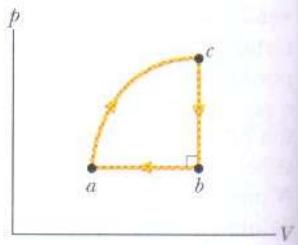


FIG. 18-54 Problema 79.

**80** Uma vidraça tem exatamente 20 cm por 30 cm a  $10^\circ\text{C}$ . De quanto aumenta sua área quando a temperatura aumenta para  $40^\circ\text{C}$ , supondo que pode se expandir livremente?

**81** Um lingote de 2,50 kg de alumínio é aquecido até  $92,0^\circ\text{C}$  e mergulhado em 8,00 kg de água a  $5,00^\circ\text{C}$ . Supondo que o sistema amostra-água está termicamente isolado, qual é a temperatura de equilíbrio do sistema?

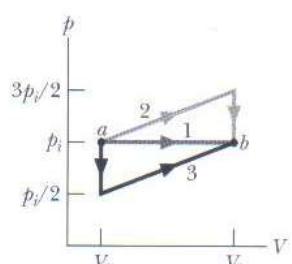
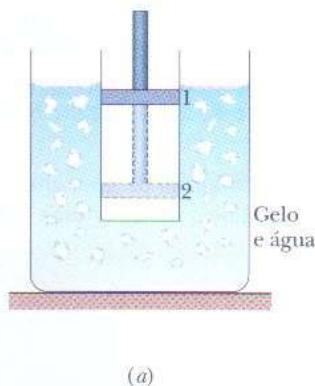


FIG. 18-53 Problema 73.

**82** A Fig. 18-55a mostra um cilindro com gás, fechado por um êmbolo móvel. O cilindro é mantido submerso em uma mistura de gelo e água. O êmbolo é empurrado para baixo *rapidamente* da posição 1 para a posição 2 e mantido na posição 2 até que o gás esteja novamente à temperatura da mistura de gelo e água; em seguida, é erguido *lentamente* de volta para a posição 1. A Fig. 18-55b é um diagrama  $p$ - $V$  do processo. Se 100 g de gelo são derretidos durante o ciclo, qual é o trabalho que foi realizado *sobre* o gás?



(a)

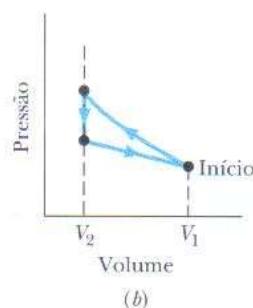


FIG. 18-55 Problema 82.

**83** A temperatura de um cubo de gelo de 0,700 kg é reduzida para  $-150^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, é fornecido calor ao cubo, mantendo-o termicamente isolado do ambiente. A transferência total é de 0,6993 MJ. Suponha que o valor de  $c_{\text{gelo}}$  que aparece na Tabela 18-3 é válido para temperaturas de  $-150^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$ . Qual é a temperatura final da água?

**84** Uma barra de aço a  $25,0^{\circ}\text{C}$  é fixada nas duas extremidades e resfriada. A que temperatura a barra se rompe? Use a Tabela 12-1.

**85** Suponha que você intercepte  $5,0 \times 10^{-3}$  da energia irradiada por uma esfera quente que tem um raio de 0,020 m, uma emissividade de 0,80 e uma temperatura de 500 K na superfície. Qual é a quantidade de energia que você intercepta em 2,0 min?

**86** Três barras retilíneas de mesmo comprimento, feitas de alumínio, Invar e aço, todas a  $20,0^{\circ}\text{C}$ , formam um triângulo equilátero com pinos articulados nos vértices. A que temperatura o ângulo oposto à barra de Invar é  $59,95^{\circ}$ ? As fórmulas trigonométricas necessárias estão no Apêndice E, e os dados necessários estão na Tabela 18-2.

**87** É possível derreter um bloco de gelo esfregando-o em outro bloco de gelo. Qual é o trabalho, em joules, necessário para derreter 1,00 g de gelo?

**88** Um termômetro de massa 0,0550 kg e calor específico 0,837 kJ/kg · K indica  $15,0^{\circ}\text{C}$ . O termômetro é totalmente imerso em 0,300 kg de água por tempo suficiente para ficar à mesma temperatura que a água. Se o termômetro indica  $44,4^{\circ}\text{C}$ , qual era a temperatura da água antes da introdução do termômetro?

**89** Um novato só pode entrar para o semi-secreto clube "300 F"\*\* da Estação Polar Amundsen-Scott, no Pólo Sul, quando a temperatura do lado de fora está abaixo de  $-70^{\circ}\text{C}$ . Em um dia como esse o novato tem que fazer uma sauna e depois correr ao ar livre usando apenas sapatos. (Naturalmente, fazer isso é muito perigoso, mas o ritual é um protesto contra os riscos da exposição ao frio.)

Suponha que, ao sair da sauna, a temperatura da pele do novato seja  $102^{\circ}\text{F}$  e que as paredes, teto e piso da base estejam a uma temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$ . Estime a área da superfície do novato e suponha que a emissividade da pele é 0,80. (a) Qual é a taxa líquida,  $P_{\text{liq}}$ , com a qual o novato perde energia através da troca de radiação térmica com o aposento? Em seguida, suponha que, ao ar livre, metade da área da superfície do recruta perde energia

\*O nome se refere a uma diferença de  $300^{\circ}\text{F}$  entre a temperatura da sauna e a temperatura do lado de fora da base. (N.T.)

térmica com o céu à temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  e que a outra metade troca radiação térmica com a neve e o solo à temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$ . Qual é a taxa líquida com a qual o recruta perde energia através da troca de radiação térmica (b) com o céu e (c) com a neve e o solo?

**90** Uma placa retangular de vidro mede inicialmente 0,200 m por 0,300 m. O coeficiente de expansão linear do vidro é  $9,00 \times 10^{-6}/\text{K}$ . Qual é a variação da área da placa se a temperatura aumenta de 20,0 K?

**91** Um atleta precisa perder peso e decide "puxar ferro". (a) Quantas vezes um peso de 80,0 kg deve ser levantado a uma altura de 1,00 m para queimar 0,50 kg de gordura, supondo que essa quantidade de gordura equivale a 3500 Cal? (b) Se o peso for levantado uma vez a cada 2,00 s, quanto tempo será necessário?

**92** Os icebergs do Atlântico Norte constituem um grande perigo para os navios; por causa deles, as distâncias das rotas marítimas sofrem um aumento da ordem de 30% durante a temporada de icebergs. Já se tentou destruir os icebergs usando explosivos, bombas, torpedos, balas de canhão, aríetes e cobrindo-os com fuligem. Suponha que a fusão direta de um iceberg, através da instalação de fontes de calor no gelo, seja tentada. Que quantidade de energia em forma de calor é necessária para derreter 10% de um iceberg com uma massa de 200 000 toneladas métricas? (1 tonelada métrica = 1000 kg.)

**93** Uma amostra de gás se expande de  $V_1 = 1,0 \text{ m}^3$  e  $p_1 = 40 \text{ Pa}$  para  $V_2 = 4,0 \text{ m}^3$  e  $p_2 = 10 \text{ Pa}$  segundo a trajetória B do diagrama p-V da Fig. 18-56. Em seguida, o gás é comprimido de volta para  $V_1$ , seguindo a trajetória A ou a trajetória C. Calcule o trabalho líquido realizado pelo gás para o ciclo completo ao longo (a) da trajetória BA e (b) da trajetória BC.

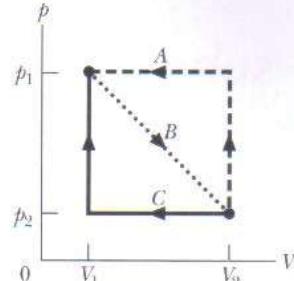
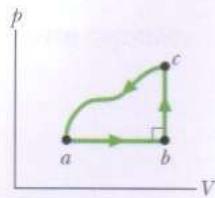


FIG. 18-56 Problema 93.

**94** Logo depois que a Terra se formou o calor liberado pelo decaimento de elementos radioativos aumentou a temperatura interna média de 300 para 3000 K, valor que permanece até hoje. Suponha que o coeficiente de dilatação volumétrica médio é  $3,0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , de quanto o raio do planeta aumentou desde a sua formação?

**95** A Fig. 18-57 mostra um ciclo fechado de um gás. A variação da energia interna ao longo da trajetória ca é  $-160 \text{ J}$ . A energia transferida para o gás como calor é  $200 \text{ J}$  ao longo da trajetória ab e  $40 \text{ J}$  ao longo da trajetória bc. Qual é o trabalho realizado pelo gás ao longo (a) da trajetória abc e (b) da trajetória ab?

FIG. 18-57  
Problema 95.

**96** O diagrama p-V da Fig. 18-58 mostra duas trajetórias ao longo das quais uma amostra de gás pode passar do estado a para o estado b, onde  $V_b = 3,0V_1$ . A trajetória 1 requer que uma energia igual a  $5,0p_1V_1$  seja transferida ao gás na forma de calor. A trajetória 2 requer que uma energia igual a  $5,5p_1V_1$  seja transferida ao gás na forma de calor. Qual é a razão  $p_2/p_1$ ?

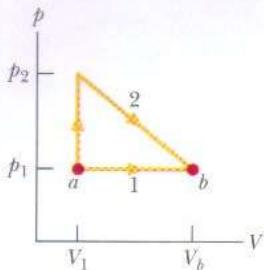


FIG. 18-58 Problema 96.

**97** Um cubo de  $6,0 \times 10^{-6}$  m de aresta e emissividade 0,75, à temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$ , flutua no espaço sideral, onde a temperatura é  $-150^{\circ}\text{C}$ . Qual é a taxa líquida de transferência da radiação térmica do cubo?

**98** O *calorímetro de fluxo* é um dispositivo usado para medir o calor específico dos líquidos. O líquido que passa pelo calorímetro, com uma vazão conhecida, recebe energia, na forma de calor, a uma taxa conhecida. A medida da diferença de temperatura resultante entre os pontos de entrada e de saída do líquido permite determinar o calor específico do líquido. Suponha que um líquido de massa específica  $0,85 \text{ g/cm}^3$  passa por um calorímetro de fluxo

com uma vazão de  $8,0 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Quando um aquecedor elétrico é usado para fornecer energia ao líquido a uma taxa de  $250 \text{ W}$ , uma diferença de temperatura de  $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  é estabelecida no regime estacionário entre os pontos de entrada e de saída. Qual é o calor específico do líquido?

**99** Um objeto com uma massa de  $6,00 \text{ kg}$  cai de uma altura de  $50,0 \text{ m}$  e, através de uma ligação mecânica, faz girar uma hélice que agita  $0,600 \text{ kg}$  de água. Suponha que a energia potencial gravitacional inicial do objeto é totalmente transferida para a energia térmica da água, que está inicialmente a  $15,0^{\circ}\text{C}$ . Qual é o aumento de temperatura da água?

## REVISÃO E RESUMO

**Teoria Cinética dos Gases** A teoria cinética dos gases relaciona as propriedades *macroscópicas* dos gases (como, por exemplo, pressão e temperatura) às propriedades *microscópicas* das moléculas do gás (como, por exemplo, velocidade e energia cinética).

**Número de Avogadro** Um mol de uma substância contém  $N_A$  (*número de Avogadro*) unidades elementares (em geral átomos ou moléculas), onde  $N_A$  é uma constante física cujo valor experimental é

$$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (\text{número de Avogadro}). \quad (19-1)$$

A massa molar  $M$  de uma substância é a massa de um mol da substância, e está relacionada à massa  $m$  de uma molécula da substância através da equação

$$M = mN_A. \quad (19-4)$$

O número de mols  $n$  em uma amostra de massa  $M_{\text{am}}$ , que contém  $N$  moléculas, é dado por

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{M_{\text{am}}}{M} = \frac{M_{\text{am}}}{mN_A}. \quad (19-2, 19-3)$$

**Gás Ideal** Um gás ideal é um gás para o qual a pressão  $p$ , o volume  $V$  e a temperatura  $T$  estão relacionados através da equação

$$pV = nRT \quad (\text{lei dos gases ideais}). \quad (19-5)$$

onde  $n$  é o número de mols do gás e  $R$  é uma constante (8,31 J/mol · K) chamada **constante dos gases ideais**. A lei dos gases ideais também pode ser escrita na forma

$$pV = NkT, \quad (19-9)$$

onde  $k$  é a **constante de Boltzmann**, dada por

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}. \quad (19-7)$$

**Trabalho em uma Variação de Volume Isotérmica** O trabalho realizado por um gás ideal durante uma variação isotérmica (a temperatura constante) de um volume  $V_i$  para um volume  $V_f$  é dado por

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (\text{gás ideal, processo isotérmico}). \quad (19-14)$$

**Pressão, Temperatura e Velocidade Molecular** A pressão exercida por  $n$  mols de um gás ideal, em termos da velocidade de suas moléculas, é dada por

$$p = \frac{nMv_{\text{rms}}^2}{3V}, \quad (19-21)$$

onde  $v_{\text{rms}} = \sqrt{(v^2)_{\text{med}}}$  é a **velocidade média quadrática** das moléculas do gás. De acordo com a Eq. 19-5,

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (19-22)$$

**Temperatura e Energia Cinética** A energia cinética de translação média  $K_{\text{med}}$  por molécula em um gás ideal é dada por

$$K_{\text{med}} = \frac{3}{2} kT. \quad (19-24)$$

**Livre Caminho Médio** O livre caminho médio  $\lambda$  de uma molécula em um gás é a distância média percorrida pela molécula entre duas colisões sucessivas, e é dado por

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi d^2 N/V}}, \quad (19-25)$$

onde  $N/V$  é o número de moléculas por unidade de volume e  $d$  é o diâmetro da molécula.

**Distribuição de Velocidades de Maxwell** A distribuição de velocidades de Maxwell  $P(v)$  é uma função tal que  $P(v) dv$  é a fração de moléculas com velocidades em um intervalo  $dv$  no entorno da velocidade  $v$ :

$$P(v) = 4\pi \left( \frac{M}{2\pi RT} \right)^{3/2} v^2 e^{-Mv^2/2RT}. \quad (19-27)$$

Três medidas da distribuição de velocidades das moléculas de um gás são

$$v_{\text{med}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (\text{velocidade média}), \quad (19-31)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (\text{velocidade mais provável}), \quad (19-35)$$

e a velocidade média quadrática é definida pela Eq. 19-22.

**Calores Específicos Molares** O calor específico molar  $C_V$  de um gás a volume constante é definido como

$$C_V = \frac{Q}{n \Delta T} = \frac{\Delta E_{\text{int}}}{n \Delta T}, \quad (19-39, 19-41)$$

onde  $Q$  é o calor cedido ou absorvido por uma amostra de  $n$  mols de um gás,  $\Delta T$  é a variação de temperatura resultante e  $\Delta E_{\text{int}}$  é a variação de energia interna. Para um gás ideal monoatômico,

$$C_V = \frac{3}{2} R = 12,5 \text{ J/mol} \cdot \text{K}. \quad (19-43)$$

O calor específico molar  $C_p$  de um gás a pressão constante é definido como

$$C_p = \frac{Q}{n \Delta T}, \quad (19-46)$$

onde  $Q$ ,  $n$  e  $\Delta T$  têm as mesmas definições que para  $C_V$ .  $C_p$  também é dado por

$$C_p = C_V + R. \quad (19-49)$$

Para  $n$  mols de um gás ideal,

$$E_{\text{int}} = nC_V T \quad (\text{gás ideal}). \quad (19-44)$$

Se  $n$  mols de um gás ideal confinado sofrem uma variação de temperatura  $\Delta T$  devido a qualquer processo, a variação da energia interna do gás é dada por

$$\Delta E_{\text{int}} = nC_V \Delta T \quad (\text{gás ideal, qualquer processo}), \quad (19-45)$$

onde deve ser usado o valor apropriado de  $C_V$ , de acordo com o tipo de gás ideal.

**Graus de Liberdade e  $C_V$**  Podemos determinar  $C_V$  usando o teorema de equipartição da energia, segundo o qual a cada grau de liberdade de uma molécula (ou seja, cada forma independente de armazenar energia) está associada (em média) uma energia de

$\frac{1}{2}kT$  por molécula ( $= \frac{1}{2}RT$  por mol). Se  $f$  é o número de graus de liberdade,  $E_{\text{int}} = \frac{f}{2}nRT$  e

$$C_V = \left(\frac{f}{2}\right)R = 4,16f \text{ J/mol}\cdot\text{K}. \quad (19-51)$$

Para gases monoatômicos,  $f = 3$  (três graus de liberdade de translação); para gases diatônicos,  $f = 5$  (três graus de translação e dois de rotação).

## PERGUNTAS

1 Para um aumento de temperatura  $\Delta T_1$ , uma certa quantidade de um gás ideal requer 30 J quando aquecido a volume constante e 50 J quando aquecido a pressão constante. Qual é o trabalho realizado pelo gás na segunda situação?

2 O ponto na Fig. 19-17a representa o estado inicial de um gás, e a reta vertical que passa pelo ponto divide o diagrama  $p$ - $V$  em regiões 1 e 2. Para os seguintes processos, determine se o trabalho  $W$  realizado pelo gás é positivo, negativo ou nulo: (a) o gás se move para cima ao longo da reta vertical, (b) o gás se move para baixo ao longo da linha vertical, (c) o gás se move para um ponto qualquer da região 1 e (d) o gás se move para um ponto qualquer da região 2.

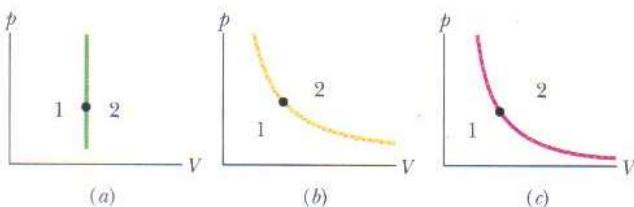


FIG. 19-17 Perguntas 2, 4 e 6.

3 Para quatro situações de um gás ideal, a tabela mostra a energia  $Q$  absorvida ou cedida pelo gás em forma de calor e o trabalho  $W$  realizado pelo gás ou o trabalho  $W_s$  realizado sobre o gás, todos em joules. Ordene as quatro situações em termos da variação de temperatura do gás, em ordem decrescente.

	a	b	c	d
$Q$	-50	+35	-15	+20
$W$	-50	+35		
$W_s$			-40	+40

4 O ponto da Fig. 19-17b representa o estado inicial de um gás, e a isoterma que passa pelo ponto divide o diagrama  $p$ - $V$  em duas regiões, 1 e 2. Para os processos a seguir, determine se a variação  $\Delta E_{\text{int}}$  da energia interna do gás é positiva, negativa ou nula: (a) o gás se move para cima ao longo da isoterma, (b) o gás se move para baixo ao longo da isoterma, (c) o gás se move para qualquer ponto da região 1 e (d) o gás se move para qualquer ponto da região 2.

5 Uma certa quantidade de calor deve ser transferida para 1 mol de um gás ideal monoatômico (a) a pressão constante e (b) a volume constante, e para 1 mol de um gás diatônico (c) a pressão constante e (d) a volume constante. A Fig. 19-18 mostra quatro

**Processo Adiabático** Quando um gás ideal sofre uma lenta variação de volume adiabática (uma variação para a qual  $Q = 0$ ), a pressão e o volume estão relacionados através da equação

$$pV^\gamma = \text{constante} \quad (\text{processo adiabático}), \quad (19-53)$$

onde  $\gamma$  ( $= C_p/C_V$ ) é a razão entre os calores específicos molares do gás. Para uma expansão livre, porém,  $pV = \text{constante}$ .

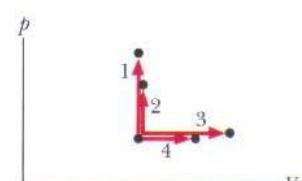


FIG. 19-18 Pergunta 5.

trajetórias de um ponto inicial para um ponto final em um diagrama  $p$ - $V$ . Que trajetória corresponde a que processo? (e) As moléculas do gás diatônico estão girando?

6 O ponto da Fig. 19-17c representa o estado inicial de um gás, e a adiabática que passa pelo ponto divide o diagrama  $p$ - $V$  nas regiões 1 e 2. Para os processos a seguir, determine se o calor  $Q$  correspondente é positivo, negativo ou nulo: (a) o gás se move para cima ao longo da adiabática, (b) o gás se move para baixo ao longo da adiabática, (c) o gás se move para qualquer ponto da região 1 e (d) o gás se move para qualquer ponto da região 2.

7 Um gás ideal diatônico, cujas moléculas estão girando, mas não oscilam, perde uma quantidade  $Q$  de calor. A diminuição de energia interna do gás é maior se a perda acontece em um processo a volume constante ou em um processo a pressão constante?

8 No diagrama  $p$ - $V$  da Fig. 19-19, o gás realiza 5 J de trabalho quando percorre a isoterma  $ab$  e 4 J quando percorre a adiabática  $bc$ . Qual é a variação da energia interna do gás quando ele percorre a trajetória retilínea  $ac$ ?

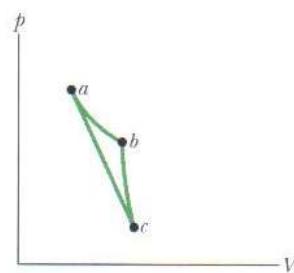


FIG. 19-19 Pergunta 8.

9 (a) Ordene as quatro trajetórias da Fig. 19-16 de acordo com o trabalho realizado pelo gás, em ordem decrescente. (b) Ordene as trajetórias 1, 2 e 3 de acordo com a variação da energia interna do gás, da mais positiva para a mais negativa.

10 A temperatura de um gás ideal aumenta, diminui ou permanece a mesma durante (a) uma expansão isotérmica, (b) uma expansão a pressão constante, (c) uma expansão adiabática e (d) um aumento de pressão a volume constante?

## PROBLEMAS

• - •• O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

~~scribble~~ Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

### seção 19-2 O Número de Avogadro

- 1** O ouro tem uma massa molar de 197 g/mol. (a) Quantos mols de ouro existem em uma amostra de 2,50 g de ouro puro? (b) Quantos átomos existem na amostra?
- 2** Determine a massa em quilogramas de  $7,50 \times 10^{24}$  átomos de arsênico, que tem uma massa molar de 74,9 g/mol.

### seção 19-3 Gases Ideais

- 3** O melhor vácuo produzido em laboratório tem uma pressão de aproximadamente  $1,00 \times 10^{-18}$  atm, ou  $1,01 \times 10^{-13}$  Pa. Quantas moléculas do gás existem por centímetro cúbico neste vácuo a 293 K?

- 4** Calcule (a) o número de mols e (b) o número de moléculas em  $1,00 \text{ cm}^3$  de um gás ideal a uma pressão de 100 Pa e a uma temperatura de 220 K.

- 5** Um pneu de automóvel tem um volume de  $1,64 \times 10^{-2} \text{ m}^3$  e contém ar à pressão manométrica (pressão acima da pressão atmosférica) de 165 kPa quando a temperatura é 0,00°C. Qual é a pressão manométrica do ar no pneu quando a temperatura aumenta para 27,0°C e o volume aumentar para  $1,67 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ? Suponha que a pressão atmosférica é  $1,01 \times 10^5$  Pa.

- 6** Uma certa quantidade de um gás ideal a 10,0°C e 100 kPa ocupa um volume de 2,50 m<sup>3</sup>. (a) Quantos mols do gás estão presentes? (b) Se a pressão é aumentada para 300 kPa e a temperatura é aumentada para 30,0°C, que volume o gás passa a ocupar? Suponha que não há vazamentos.

- 7** Uma amostra de oxigênio com um volume de 1000 cm<sup>3</sup> a 40,0°C e  $1,01 \times 10^5$  Pa se expande até um volume de 1500 cm<sup>3</sup> a uma pressão de  $1,06 \times 10^5$  Pa. Determine (a) o número de mols de oxigênio presentes na amostra e (b) a temperatura final da amostra.

- 8** Um recipiente contém 2 mols de um gás ideal que tem uma massa molar  $M_1$  e 0,5 mol de um segundo gás ideal que tem uma massa molar  $M_2 = 3M_1$ . Que fração da pressão total sobre a parede do recipiente se deve ao segundo gás? (A explicação da teoria cinética dos gases para a pressão leva à lei das pressões parciais para uma mistura de gases que não reagem quimicamente, descoberta experimentalmente: A pressão total exercida por uma mistura de gases é igual à soma das pressões que os gases exerceriam se cada um ocupasse sozinho o volume do recipiente.)

- 9** Suponha que 1,80 mol de um gás ideal é levado de um volume de 3,00 m<sup>3</sup> para um volume de 1,50 m<sup>3</sup> através de uma compressão isotérmica a 30°C. (a) Qual é o calor transferido durante a compressão e (b) o calor é absorvido ou cedido pelo gás?

- 10** *Garrafa de água em um carro quente.* Nos dias de calor a temperatura em um carro fechado estacionado no sol pode ser suficiente para provocar queimaduras. Suponha que uma garrafa de água removida de uma geladeira à temperatura de 5,00°C seja aberta, fechada novamente e deixada em um carro fechado com uma temperatura interna de 75,0°C. Desprezando a dilatação térmica da água e da garrafa, determine a pressão do ar contido no interior da garrafa. (A pressão pode ser suficiente para arrancar uma tampa rosqueada.) ~~scribble~~

- 11** Suponha que 0,825 mol de um gás ideal sofre uma expansão isotérmica quando uma energia  $Q$  é acrescentada ao gás na forma de calor. Se a Fig. 19-20 mostra o volume final  $V_f$  em função de  $Q$ , qual é a temperatura do gás? A escala do eixo vertical é definida por  $V_{fs} = 0,30 \text{ m}^3$  e a escala do eixo horizontal é definida por  $Q_s = 1200 \text{ J}$ .

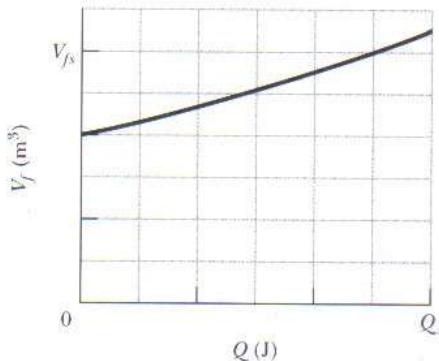


FIG. 19-20 Problema 11.

- 12** No intervalo de temperaturas de 310 K a 330 K, a pressão  $p$  de um certo gás não ideal está relacionada ao volume  $V$  e à temperatura  $T$  através da equação

$$p = (24,9 \text{ J/K}) \frac{T}{V} - (0,00662 \text{ J/K}^2) \frac{T^2}{V}$$

Qual é o trabalho realizado pelo gás se a temperatura aumenta de 315 K para 325 K enquanto a pressão permanece constante?

- 13** O ar que inicialmente ocupa  $0,140 \text{ m}^3$  à pressão manométrica de 103,0 kPa se expande isotermicamente para uma pressão de 101,3 kPa e em seguida é resfriado a pressão constante até atingir o volume inicial. Calcule o trabalho realizado pelo ar. (Pressão manométrica é a diferença entre a pressão real e a pressão atmosférica.)

- 14** *Salvamento no fundo do mar.* Quando o submarino americano *Squalus* enguiçou a 80 m de profundidade, uma câmara cilíndrica foi usada para resgatar a tripulação. A câmara tinha um raio de 1,00 m e uma altura de 4,00 m, era aberta do fundo e levava dois operadores. Foi baixada ao longo de um cabo-guia que um mergulhador havia fixado ao submarino. Depois que a câmara completou a descida e foi presa a uma escotilha do submarino, a tripulação pôde passar para a câmara. Durante a descida, os operadores liberaram ar de tanques para que a câmara não fosse inundada. Suponha que a pressão do ar no interior da câmara era igual à pressão da água à profundidade  $h$ , dada por  $p_0 + \rho gh$ , onde  $p_0 = 1,000 \text{ atm}$  na superfície e  $\rho = 1024 \text{ kg/m}^3$  é a massa específica da água do mar. Suponha uma temperatura constante de 20,0°C na superfície e uma temperatura da água de 3,0°C na profundidade do submarino. (a) Qual era o volume de ar na câmara na superfície? (b) Se não tivesse sido liberado ar de tanques, qual seria o volume do ar na câmara à profundidade  $h = 80,0 \text{ m}$ ? (c) Quantos mols adicionais de ar foram necessários para manter o volume inicial de ar na câmara? ~~scribble~~

- 15** Uma amostra de um gás ideal é submetida ao processo cíclico *abca* mostrado na Fig. 19-21. A escala do eixo vertical é definida por  $p_b = 7,5 \text{ kPa}$  e  $p_{ac} = 2,5 \text{ kPa}$ . No ponto *a*,  $T = 200 \text{ K}$ . (a) Quantos mols do gás estão presentes na amostra? Quais são (b) a temperatura do gás no ponto *b*, (c) a temperatura do gás no ponto *c* e (d) a energia líquida adicionada ao gás em forma de calor durante o ciclo?

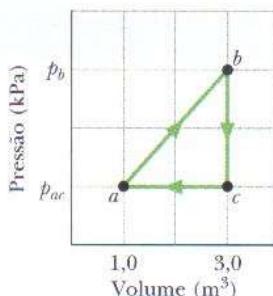


FIG. 19-21 Problema 15.

- 16** Uma bolha de ar com  $20 \text{ cm}^3$  de volume está no fundo de um lago de  $40 \text{ m}$  de profundidade, onde a temperatura é  $4,0^\circ\text{C}$ . A bolha sobe até a superfície, que está à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Considere a temperatura da bolha como sendo a mesma da água em volta. Qual é o volume da bolha no momento em que chega à superfície?

- 17** O recipiente *A* da Fig. 19-22 contém um gás ideal à pressão de  $5,0 \times 10^5 \text{ Pa}$  e à temperatura de  $300 \text{ K}$ . Ele está ligado por um tubo fino (e uma válvula fechada) a um recipiente *B*, cujo volume é quatro vezes maior que o de *A*. O recipiente *B* contém o mesmo gás ideal à pressão de  $1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$  e à temperatura de  $400 \text{ K}$ . A válvula é aberta para que as pressões se igualem, mas a temperatura de cada recipiente é mantida. Qual é a nova pressão nos dois recipientes?

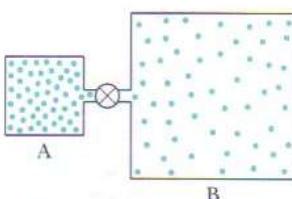


FIG. 19-22 Problema 17.

#### seção 19-4 Pressão, Temperatura e Velocidade Média Quadrática

- 18** Calcule a velocidade média quadrática de átomos de hélio a  $1000 \text{ K}$ . A massa molar dos átomos de hélio é dada no Apêndice F.
- 19** A menor temperatura possível no espaço sideral é  $2,7 \text{ K}$ . Qual é a velocidade média quadrática de moléculas de hidrogênio a esta temperatura? [A massa molar da molécula de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) é dada na Tabela 19-1.]
- 20** Determine a velocidade média quadrática de átomos de argônio a  $313 \text{ K}$ . A massa molar do argônio é dada no Apêndice F.
- 21** (a) Calcule a velocidade média quadrática de uma molécula de nitrogênio a  $20,0^\circ\text{C}$ . A massa molar da molécula de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) é dada na Tabela 19-1. A que temperatura a velocidade média quadrática é (b) metade desse valor e (c) o dobro desse valor?

- 22** A temperatura e a pressão da atmosfera solar são  $2,00 \times 10^6 \text{ K}$  e  $0,0300 \text{ Pa}$ . Calcule a velocidade média quadrática dos elétrons livres (de massa igual a  $9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ) na superfície do Sol, supondo que se comportam como um gás ideal.

- 23** Um feixe de moléculas de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) está direcionado para uma parede, fazendo um ângulo de  $55^\circ$  com a normal à parede. As moléculas do feixe têm uma velocidade de  $1,0 \text{ km/s}$  e uma massa de  $3,3 \times 10^{-24} \text{ g}$ . O feixe atinge a parede em uma área de  $2,0 \text{ cm}^2$ , a uma taxa de  $10^{23} \text{ moléculas por segundo}$ . Qual é a pressão do feixe sobre a parede?

- 24** A  $273 \text{ K}$  e  $1,00 \times 10^{-2} \text{ atm}$ , a massa específica de um gás é  $1,24 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$ . (a) Determine  $v_{\text{rms}}$  para as moléculas do gás. (b) Determine a massa molar do gás e (c) identifique o gás. (Sugestão: O gás aparece na Tabela 19-1.)

#### seção 19-5 Energia Cinética de Translação

- 25** Determine o valor médio da energia cinética de translação das moléculas de um gás ideal a (a)  $0,00^\circ\text{C}$  e (b)  $100^\circ\text{C}$ . Qual é a energia cinética de translação média por mol de um gás ideal a (c)  $0,00^\circ\text{C}$  e (d)  $100^\circ\text{C}$ ?

- 26** Qual é a energia cinética translacional média das moléculas de nitrogênio a  $1600 \text{ K}$ ?

- 27** A água a céu aberto a  $32^\circ\text{C}$  evapora por causa do escape de algumas de suas moléculas da superfície. O calor de vaporização ( $539 \text{ cal/g}$ ) é aproximadamente igual a  $\varepsilon n$ , onde  $\varepsilon$  é a energia média das moléculas que escapam e  $n$  é o número de moléculas por grama. (a) Determine  $\varepsilon$ . (b) Qual é a razão entre  $\varepsilon$  e a energia cinética média das moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , supondo que esta última está relacionada à temperatura da mesma forma que nos gases?

#### seção 19-6 Livre Caminho Médio

- 28** O livre caminho médio das moléculas de nitrogênio a  $0,0^\circ\text{C}$  e  $1,0 \text{ atm}$  é  $0,80 \times 10^{-5} \text{ cm}$ . Nessas condições de temperatura e pressão existem  $2,7 \times 10^{19} \text{ moléculas/cm}^3$ . Qual é o diâmetro das moléculas?

- 29** A concentração de moléculas na atmosfera a uma altitude de  $2500 \text{ km}$  está em torno de  $1 \text{ molécula/cm}^3$ . (a) Supondo que o diâmetro das moléculas é  $2,0 \times 10^{-8} \text{ cm}$ , determine o livre caminho médio previsto pela Eq. 19-25. (b) Explique se o valor previsto tem significado físico.

- 30** Para que freqüência o comprimento de onda do som no ar é igual ao livre caminho médio das moléculas de oxigênio a uma pressão de  $1,0 \text{ atm}$  e  $0,00^\circ\text{C}$ ? Tome o diâmetro de uma molécula de oxigênio como sendo  $3,0 \times 10^{-8} \text{ cm}$ .

- 31** Em um certo acelerador de partículas, prótons se movem em uma trajetória circular de  $23,0 \text{ m}$  de diâmetro em uma câmara evacuada cujo gás residual está a  $295 \text{ K}$  e a uma pressão de  $1,00 \times 10^{-6} \text{ torr}$ . (a) Calcule o número de moléculas do gás por centímetro cúbico com esta pressão. (b) Qual é o livre caminho médio das moléculas do gás se o diâmetro das moléculas é  $2,00 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ?

- 32** A  $20^\circ\text{C}$  e a uma pressão de  $750 \text{ torr}$ , os caminhos livres médios do argônio ( $\text{Ar}$ ) e do nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) são  $\lambda_{\text{Ar}} = 9,9 \times 10^{-6} \text{ cm}$  e  $\lambda_{\text{N}_2} = 27,5 \times 10^{-6} \text{ cm}$ . (a) Determine a razão entre o diâmetro de um átomo de Ar e o de uma molécula de  $\text{N}_2$ . Qual é o livre caminho médio do argônio (b) a  $20^\circ\text{C}$  e  $150 \text{ torr}$  e (c) a  $-40^\circ\text{C}$  e  $750 \text{ torr}$ ?

#### seção 19-7 A Distribuição de Velocidades das Moléculas

- 33** Dez partículas estão se movendo com as seguintes velocidades: quatro a  $200 \text{ m/s}$ , duas a  $500 \text{ m/s}$  e quatro a  $600 \text{ m/s}$ . Calcule suas velocidades (a) média e (b) média quadrática. (c)  $v_{\text{rms}}$  é maior que  $v_{\text{med}}$ ?

- 34** As velocidades de 22 partículas são mostradas a seguir ( $N_i$  representa o número de partículas que possuem velocidade  $v_i$ ):

$N_i$	2	4	6	8	2
$v_i \text{ (cm/s)}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0

Determine (a)  $v_{\text{med}}$ , (b)  $v_{\text{rms}}$  e (c)  $v_p$ .

- 35** As velocidades de 10 moléculas são:  $2,0; 3,0; 4,0; \dots; 11 \text{ km/s}$ . Determine (a) velocidade média e (b) a velocidade média quadrática das moléculas.

**••36** A Fig. 19-23 mostra a distribuição de probabilidade da velocidade das moléculas de uma amostra de nitrogênio. A escala do eixo horizontal é definida por  $v_s = 1200 \text{ m/s}$ . Determine (a) a temperatura do gás e (b) a velocidade média quadrática das moléculas.

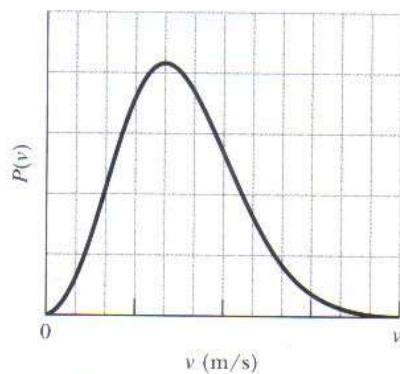


FIG. 19-23 Problema 36.

**••37** A que temperatura a velocidade média quadrática (a) do  $\text{H}_2$  (hidrogênio molecular) e (b) do  $\text{O}_2$  (oxigênio molecular) é igual à velocidade de escape da Terra (Tabela 13-2)? A que temperatura a velocidade média quadrática (c) do  $\text{H}_2$  e (d) do  $\text{O}_2$  é igual à velocidade de escape da Lua (onde a aceleração da gravidade na superfície tem um módulo de  $0,16g$ )? Considerando as respostas dos itens (a) e (b), deve existir muito (e) hidrogênio e (f) oxigênio na atmosfera superior da Terra, onde a temperatura é de cerca de  $1000 \text{ K}$ ?

**••38** Dois recipientes estão à mesma temperatura. O primeiro contém gás à pressão  $p_1$ , de massa molecular  $m_1$  e velocidade média quadrática  $v_{\text{rms}1}$ . O segundo contém gás à pressão  $2,0p_1$ , de massa molecular  $m_2$  e velocidade média  $v_{\text{med}2} = 2,0v_{\text{rms}1}$ . Determine a razão  $m_1/m_2$ .

**••39** Uma molécula de hidrogênio (diâmetro  $1,0 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ), movendo-se à velocidade média quadrática, escapa de um forno a  $4000 \text{ K}$  para uma câmara que contém átomos de argônio frios (diâmetro  $3,0 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ) em uma concentração de  $4,0 \times 10^{19} \text{ átomos/cm}^3$ . (a) Qual é a velocidade da molécula de hidrogênio? (b) Qual é a distância mínima entre os centros para que a molécula de hidrogênio colida com um átomo de argônio, supondo que ambos são esféricos? (c) Qual é o número inicial de colisões por segundo que a molécula de hidrogênio sofre? (Sugestão: Suponha que os átomos de argônio estão parados. Nesse caso, o livre caminho médio da molécula de hidrogênio é dado pela Eq. 19-26, e não pela Eq. 19-25.)

**••40** A velocidade mais provável das moléculas de um gás quando ele está a uma temperatura (uniforme)  $T_2$  é a mesma velocidade média quadrática das moléculas do gás quando ele está a uma temperatura (uniforme)  $T_1$ . Calcule a razão  $T_2/T_1$ .

**••41** A Fig. 19-24 mostra uma distribuição de velocidades hipotética para uma amostra de um gás com  $N$  partículas (note que  $P(v) = 0$  para qualquer velocidade  $v > 2v_0$ ). Quais são os valores de (a)  $av_0$ , (b)  $v_{\text{med}}/v_0$  e (c)  $v_{\text{rms}}/v_0$ ? (d) Qual é a fração de partículas com velocidades entre  $1,5v_0$  e  $2,0v_0$ ?

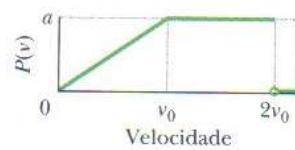


FIG. 19-24 Problema 41.

### seção 19-8 Os Calores Específicos Molares de um Gás Ideal

**•42** Qual é a energia interna de  $1,0 \text{ mol}$  de um gás ideal monoatômico a  $273 \text{ K}$ ?

**•43** A temperatura de  $2,00 \text{ mol}$  de um gás ideal monoatômico é aumentada de  $15,0 \text{ K}$  a volume constante. Quais são (a) o trabalho  $W$  realizado pelo gás, (b) a energia transferida como calor  $Q$ , (c) a variação  $\Delta E_{\text{int}}$  da energia interna do gás e (d) a variação  $\Delta K$  da energia cinética média por átomo?

**••44** A temperatura de  $2,00 \text{ mol}$  de um gás ideal monoatômico é aumentada de  $15,0 \text{ K}$  a pressão constante. Determine (a) o trabalho  $W$  realizado pelo gás, (b) a energia  $Q$  transferida para o gás na forma de calor, (c) a variação  $\Delta E_{\text{int}}$  da energia interna do gás e (d) a variação  $\Delta K$  da energia cinética média por átomo.

**••45** Um recipiente contém uma mistura de três gases não-reagentes:  $2,40 \text{ mol}$  do gás 1 com  $C_{V1} = 12,0 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ,  $1,50 \text{ mol}$  do gás 2 com  $C_{V2} = 12,8 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$  e  $3,20 \text{ mol}$  do gás 3 com  $C_{V3} = 20,0 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ . Qual é o  $C_V$  da mistura?

**••46** Um mol de um gás ideal diatômico vai de  $a$  a  $c$  ao longo da trajetória diagonal na Fig. 19-25. A escala do eixo vertical é definida por  $p_{ab} = 5,0 \text{ kPa}$  e  $p_c = 2,0 \text{ kPa}$ , e a escala do eixo horizontal é definida por  $V_{bc} = 4,0 \text{ m}^3$  e  $V_a = 2,0 \text{ m}^3$ . Durante a transição, (a) qual é a variação da energia interna do gás e (b) qual é a energia adicionada ao gás na forma de calor? (c) Que calor é necessário para que o gás vá de  $a$  a  $c$  ao longo da trajetória indireta  $abc$ ?

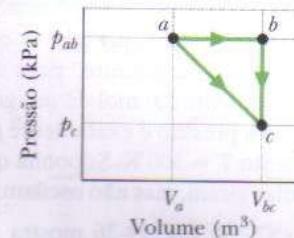


FIG. 19-25 Problema 46.

**••47** A massa da molécula de um gás pode ser calculada a partir do seu calor específico a volume constante  $c_V$ . (Note que não se trata de  $C_V$ .) Tome  $c_V = 0,075 \text{ cal/g} \cdot \text{C}^\circ$  para o argônio e calcule (a) a massa de um átomo de argônio e (b) a massa molar do argônio.

**••48** Quando  $20,9 \text{ J}$  foram adicionados como calor a um certo gás ideal, o volume do gás variou de  $50,0 \text{ cm}^3$  para  $100 \text{ cm}^3$ , enquanto a pressão permaneceu em  $1,00 \text{ atm}$ . (a) De quanto variou a energia interna do gás? Se a quantidade de gás presente era  $2,00 \times 10^{-3} \text{ mol}$ , determine (b)  $C_P$  e (c)  $C_V$ .

**••49** A temperatura de  $3,00 \text{ mols}$  de um gás diatômico ideal é aumentada de  $40,0^\circ\text{C}$  sem mudar a pressão do gás. As moléculas do gás giram, mas não oscilam. (a) Qual é a energia transferida para o gás na forma de calor? (b) Qual é a variação da energia interna do gás? (c) Qual é o trabalho realizado pelo gás? (d) Qual é o aumento da energia cinética de rotação do gás?

### seção 19-9 Graus de Liberdade e Calores Específicos Molares

**•50** Fornecemos  $70 \text{ J}$  de calor a um gás diatômico, que se expande a pressão constante. As moléculas do gás giram, mas não oscilam. De quanto a energia interna do gás aumenta?

**•51** Quando  $1,0 \text{ mol}$  de gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ) é aquecido a pressão constante a partir de  $0^\circ\text{C}$ , quanta energia deve ser adicionada ao gás como calor para dobrar seu volume? (As moléculas giram, mas não oscilam.)

**••52** Suponha que  $12,0 \text{ g}$  de gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ) são aquecidos de  $25,0^\circ\text{C}$  a  $125^\circ\text{C}$  a pressão atmosférica constante. (a) Quantos mols de oxigênio estão presentes? (A massa molar do oxigênio está na Tabela 19-1.) (b) Quanta energia é transferida para o oxigênio como calor? (As moléculas giram, mas não oscilam.) (c) Que fração do calor é usada para aumentar a energia interna do oxigênio?

**••53** Suponha que  $4,00 \text{ mols}$  de um gás ideal diatômico, com rotação molecular, mas sem oscilação, sofrem um aumento de temperatura de  $60,0 \text{ K}$  em condições de pressão constante. Quais são (a) a energia transferida como calor  $Q$ , (b) a variação  $\Delta E_{\text{int}}$  da energia interna do gás, (c) o trabalho  $W$  realizado pelo gás e (d) a variação  $\Delta K$  da energia cinética de translação do gás?

**seção 19-11 A Expansão Adiabática de um Gás Ideal**

**••54** Suponha que 1,00 L de um gás com  $\gamma = 1,30$ , inicialmente a 273 K e 1,00 atm, é comprimido adiabaticamente, de forma brusca, para metade do volume inicial. Determine (a) a pressão final e (b) a temperatura final. (c) Se, em seguida, o gás é resfriado para 273 K a pressão constante, qual é o volume final?

**••55** Um certo gás ocupa um volume de 4,3 L a uma pressão de 1,2 atm e uma temperatura de 310 K. Ele é comprimido adiabaticamente para um volume de 0,76 L. Determine (a) a pressão final e (b) a temperatura final, supondo que o gás é ideal e que  $\gamma = 1,4$ .

**••56** Sabemos que  $pV^\gamma = \text{constante}$  nos processos adiabáticos. Calcule a “constante” para um processo adiabático envolvendo exatamente 2,0 mol de um gás ideal que passa por um estado no qual a pressão é exatamente  $p = 1,0$  atm e a temperatura é exatamente  $T = 300$  K. Suponha que o gás é diatômico e que as moléculas giram, mas não oscilam.

**••57** A Fig. 19-26 mostra duas trajetórias que podem ser seguidas por um gás de um ponto inicial  $i$  até um ponto final  $f$ . A trajetória 1 consiste em uma expansão isotérmica (o módulo do trabalho é 50 J), uma expansão adiabática (o módulo de trabalho é 40 J), uma compressão isotérmica (o módulo do trabalho é 30 J) e uma compressão adiabática (o módulo do trabalho é 25 J). Qual é a variação da energia interna do gás se ele vai do ponto  $i$  para o ponto  $f$  seguindo a trajetória 2?

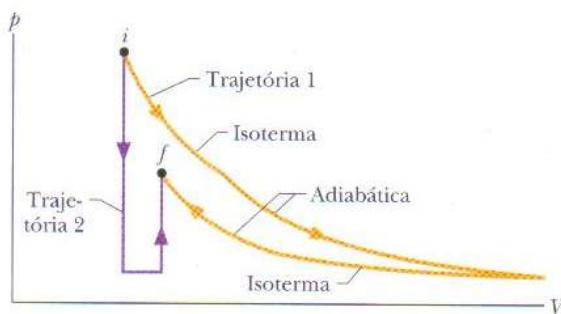


FIG. 19-26 Problema 57.

**••58 Vento adiabático.** Normalmente, o vento nas Montanhas Rochosas é de oeste para leste. Ao subir a encosta ocidental das montanhas o ar esfria e perde boa parte da umidade. Ao descer a encosta oriental o aumento da pressão com a diminuição da altitude faz a temperatura do ar aumentar. Esse fenômeno, conhecido como vento *chinook*, pode aumentar rapidamente a temperatura do ar na base das montanhas. Suponha que a pressão  $p$  do ar varia com a altitude  $y$  de acordo com a equação  $p = p_0 e^{-ay}$ , onde  $p_0 = 1,00$  atm e  $a = 1,16 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ . Suponha também que a razão entre os calores específicos molares é  $\gamma = 4/3$ . Uma certa massa de ar, a uma temperatura inicial de  $-5,00^\circ\text{C}$ , desce adiabaticamente de  $y_1 = 4267$  m para  $y = 1567$  m. Qual é a temperatura do ar no fim da descida?

**••59** Um gás pode ser expandido de um estado inicial  $i$  para um estado final  $f$  ao longo da trajetória 1 ou da trajetória 2 de um diagrama  $p$ - $V$ . A trajetória 1 é composta de três etapas: uma expansão isotérmica (o módulo do trabalho é 40 J), uma expansão adiabática (o módulo do trabalho é 20 J) e outra expansão isotérmica (o módulo do trabalho é 30 J). A trajetória 2 é composta de duas etapas: uma redução na pressão a volume constante e uma expansão a pressão constante. Qual é a variação da energia interna do gás ao longo da trajetória 2?

**••60 Abrindo uma garrafa de champanha.** Em uma garrafa de champanha, o bolsão de gás (dióxido de carbono, principalmente) que fica entre o líquido e a rolha está a uma pressão  $p_i = 5,00$  atm. Quando a rolha é removida da garrafa, o gás sofre uma expansão adiabática até que sua pressão se torne igual à pressão ambiente, 1,00 atm. Suponha que a razão entre os calores específicos molares é  $\gamma = 4/3$ . Se a temperatura inicial do gás é  $T_i = 5,00^\circ\text{C}$ , qual é sua temperatura no fim da expansão adiabática?

**••61** O volume de um gás ideal é reduzido adiabaticamente de 200 L para 74,3 L. A pressão e temperatura iniciais são 1,00 atm e 300 K. A pressão final é 4,00 atm. (a) O gás é monoatômico, diatômico ou poliatômico? (b) Qual é a temperatura final? (c) Quantos mols existem no gás?

**••62** Um gás ideal diatômico, com rotação, mas sem oscilações, sofre uma compressão adiabática. A pressão e o volume iniciais são 1,20 atm e  $0,200 \text{ m}^3$ . A pressão final é 2,40 atm. Qual é o trabalho realizado pelo gás?

**••63** A Fig. 19-27 mostra o ciclo a que é submetido 1,00 mol de um gás ideal monoatômico. As temperaturas são  $T_1 = 300$  K,  $T_2 = 600$  K e  $T_3 = 455$  K. Para a trajetória  $1 \rightarrow 2$ , determine (a) o calor trocado  $Q$ , (b) a variação de energia interna  $\Delta E_{\text{int}}$  e (c) o trabalho realizado  $W$ . Para a trajetória  $2 \rightarrow 3$ , determine (d)  $Q$ , (e)  $\Delta E_{\text{int}}$  e (f)  $W$ . Para a trajetória  $3 \rightarrow 1$ , determine (g)  $Q$ , (h)  $\Delta E_{\text{int}}$  e (i)  $W$ . Para o ciclo completo, determine (j)  $Q$ , (k)  $\Delta E_{\text{int}}$  e (l)  $W$ . A pressão inicial no ponto 1 é 1,00 atm ( $= 1,013 \times 10^5$  Pa). Quais são (m) o volume e (n) a pressão no ponto 2 e (o) o volume e (p) a pressão no ponto 3?

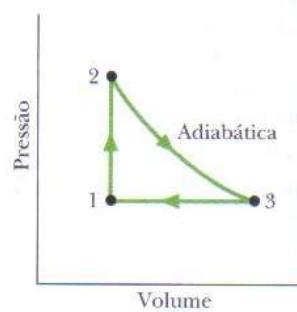


FIG. 19-27 Problema 63.

### Problemas Adicionais

**64** Em uma nuvem de gás interestelar a 50,0 K, a pressão é  $1,00 \times 10^{-8}$  Pa. Supondo que os diâmetros moleculares dos gases da nuvem são todos iguais a 20,0 nm, qual é o livre caminho médio das moléculas?

**65** A temperatura de 3,00 mol de um gás com  $C_V = 6,00$  cal/mol · K é aumentada de 50,0 K. Se o processo é conduzido a *volume constante*, quais são (a) a energia transferida como calor  $Q$ , (b) o trabalho  $W$  realizado pelo gás, (c) a variação  $\Delta E_{\text{int}}$  da energia interna do gás e (d) a variação  $\Delta K$  da energia cinética de translação? Se o processo é conduzido a *pressão constante*, quais são (e)  $Q$ , (f)  $W$ , (g)  $\Delta E_{\text{int}}$  e (h)  $\Delta K$ ? Se o processo é *adiabático*, quais são (i)  $Q$ , (j)  $W$ , (k)  $\Delta E_{\text{int}}$  e (l)  $\Delta K$ ?

**66** Uma amostra de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) a 273 K e 1,0 atm está confinada em um recipiente cúbico de 10 cm de aresta. Calcule  $\Delta U_g/K_{\text{méd}}$ , onde  $\Delta U_g$  é a variação da energia potencial gravitacional de uma molécula de oxigênio que cai da altura da caixa e  $K_{\text{méd}}$  é a energia cinética de translação média da molécula.

**67** O invólucro e a cesta de um balão de ar quente têm um peso total de 2,45 kN e o invólucro tem uma capacidade (volume) de  $2,18 \times 10^3 \text{ m}^3$ . Quando o invólucro está totalmente inflado, qual deve ser a temperatura do ar no seu interior para dar ao balão a *capacidade de levantamento* (força) de 2,67 kN (além do peso do balão)? Suponha que o ar ambiente, a  $20,0^\circ\text{C}$ , tem um peso específico de  $11,9 \text{ N/m}^3$ , uma massa molecular de  $0,028 \text{ kg/mol}$  e está a uma pressão de 1,0 atm.

**68** (a) Um gás ideal, inicialmente à pressão  $p_0$ , sofre uma expansão livre até que seu volume seja 3,00 vezes o volume inicial. Qual é a razão à nova pressão e  $p_0$ ? (b) Em seguida, o gás sofre uma lenta compressão adiabática até o volume inicial. A pressão após a compressão é  $(3,00)^{1/3} p_0$ . O gás é monoatômico, diatômico ou poliatômico? (c) Qual é a razão entre a energia cinética média por molécula no estado final e no estado inicial?

**69** A temperatura de 2,00 mol de um gás ideal monoatômico é aumentada em 15,0 K em um processo adiabático. Quais são (a) o trabalho  $W$  realizado pelo gás, (b) a energia transferida como calor  $Q$ , (c) a variação  $\Delta E_{int}$  da energia interna do gás e (d) a variação  $\Delta K$  da energia cinética média por átomo?

**70** Durante uma compressão a pressão constante de 250 Pa, o volume de um gás ideal diminui de  $0,80 \text{ m}^3$  para  $0,20 \text{ m}^3$ . A temperatura inicial é 360 K e o gás perde 210 J na forma de calor. Quais são (a) a variação da energia interna do gás e (b) a temperatura final do gás?

**71** Com que freqüência as moléculas de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) colidem à temperatura de 400 K e a uma pressão de 2,00 atm? Suponha que as moléculas têm 290 pm de diâmetro e que o oxigênio se comporta como um gás ideal.

**72** Uma amostra de um gás ideal contém 1,50 mol de moléculas diatônicas que giram, mas não oscilam. O diâmetro das moléculas é 250 pm. O gás sofre uma expansão a uma pressão constante de  $1,50 \times 10^5 \text{ Pa}$ , com uma transferência de 200 J na forma de calor. Qual é a variação do livre caminho médio das moléculas?

**73** Um gás ideal monoatômico tem inicialmente uma temperatura de 330 K e uma pressão de 6,00 atm. Ele se expande do volume de  $500 \text{ cm}^3$  para o volume de  $1500 \text{ cm}^3$ . Determine (a) a pressão final e (b) o trabalho realizado pelo gás se a expansão é isotérmica. Determine (c) a pressão final e (d) o trabalho realizado pelo gás se a expansão é adiabática.

**74** Um gás ideal com 3,00 mol está inicialmente no estado 1 à pressão  $p_1 = 20,0 \text{ atm}$  e volume  $V_1 = 1500 \text{ cm}^3$ . Primeiro, ele é levado ao estado 2 com pressão  $p_2 = 1,50 p_1$  e volume  $V_2 = 2,00 V_1$ . Em seguida, ele é levado ao estado 3 com pressão  $p_3 = 2,00 p_1$  e volume  $V_3 = 0,500 V_1$ . Qual é a temperatura do gás (a) no estado 1 e (b) no estado 2? (c) Qual é a variação líquida da energia interna do gás do estado 1 para o estado 3?

**75** Um gás ideal sofre uma compressão adiabática de  $p = 1,0 \text{ atm}$ ,  $V = 1,0 \times 10^6 \text{ L}$ ,  $T = 0,0^\circ\text{C}$  para  $p = 1,0 \times 10^5 \text{ atm}$ ,  $V = 1,0 \times 10^3 \text{ L}$ . (a) O gás é monoatômico, diatômico ou poliatômico? (b) Qual é a temperatura final? (c) Quantos mols do gás estão presentes? Qual é a energia cinética de translação por mol (d) antes e (e) depois da compressão? (f) Qual é a razão entre os quadrados das velocidades médias quadráticas antes e após a compressão?

**76** Um gás ideal, a uma temperatura inicial  $T_1$  e com um volume inicial de  $2,0 \text{ m}^3$ , sofre uma expansão adiabática para um volume de  $4,0 \text{ m}^3$ , depois uma expansão isotérmica para um volume de  $10 \text{ m}^3$  e, finalmente, uma compressão adiabática de volta para  $T_1$ . Qual é o volume final?

**77** Uma amostra de um gás ideal sofre uma expansão de uma pressão e volume iniciais de 32 atm e 1,0 L para um volume final de 4,0 L. A temperatura inicial é 300 K. Se o gás é monoatômico e a expansão é isotérmica, quais são (a) a pressão final  $p_f$ , (b) a temperatura final  $T_f$  e (c) o trabalho  $W$  realizado pelo gás? Se o gás é monoatômico e a expansão é adiabática, quais são (d)  $p_f$ , (e)  $T_f$  e (f)  $W$ ? Se o gás é diatômico e a expansão é adiabática, quais são (g)  $p_f$ , (h)  $T_f$  e (i)  $W$ ?

**78** Calcule o trabalho realizado por um agente externo durante uma compressão isotérmica de 1,00 mol de oxigênio de um volume de 22,4 L a  $0^\circ\text{C}$  e 1,00 atm para um volume de 16,8 L.

**79** Um tanque de aço contém 300 g de amônia ( $\text{NH}_3$ ) a uma pressão de  $1,35 \times 10^6 \text{ Pa}$  e uma temperatura de  $77^\circ\text{C}$ . (a) Qual é o volume do tanque em litros? (b) Mais tarde, a temperatura é  $22^\circ\text{C}$  e a pressão é  $8,7 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Quantos gramas do gás vazaram do tanque?

**80** Em que temperatura os átomos de hélio têm a mesma velocidade média quadrática que as moléculas de hidrogênio a  $20,0^\circ\text{C}$ ? (As massas molares são dadas na Tabela 19-1.)

**81** A Fig. 19-28 mostra a distribuição hipotética de velocidades das partículas de um certo gás:  $P(v) = Cv^2$  para  $0 < v \leq v_0$  e  $P(v) = 0$  para  $v > v_0$ . Determine (a) uma expressão para  $C$  em termos de  $v_0$ , (b) a velocidade média das partículas e (c) a velocidade média quadrática das partículas.

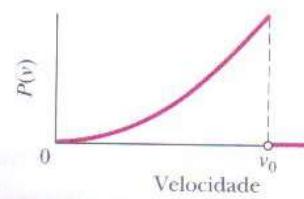


FIG. 19-28 Problema 81.

**82** Em um processo industrial, o volume de 25,0 mol de um gás ideal monoatômico é reduzido, a uma taxa uniforme, de  $0,616 \text{ m}^3$  para  $0,308 \text{ m}^3$  em 2,00 h, enquanto a temperatura é aumentada, a uma taxa uniforme, de  $27,0^\circ\text{C}$  para  $450^\circ\text{C}$ . Durante o processo, o gás passa por estados de equilíbrio termodinâmico. Quais são (a) o trabalho cumulativo realizado sobre o gás, (b) a energia cumulativa absorvida pelo gás como calor e (c) o calor específico molar para o processo? (Sugestão: Para calcular a integral para o trabalho, use a equação

$$\int \frac{a + bx}{A + Bx} dx = \frac{bx}{B} + \frac{aB - bA}{B^2} \ln(A + Bx),$$

uma integral indefinida.) Suponha que o processo é substituído por um processo de duas etapas que leva ao mesmo estado final. Na etapa 1, o volume do gás é reduzido a temperatura constante; na etapa 2, a temperatura é aumentada a volume constante. Para esse processo, quais são (d) o trabalho cumulativo realizado sobre o gás, (e) a energia cumulativa absorvida pelo gás como calor e (f) o calor específico molar para o processo?

**83** Um gás ideal sofre uma compressão isotérmica de um volume inicial de  $4,00 \text{ m}^3$  para um volume final de  $3,00 \text{ m}^3$ . Existem 3,50 mol do gás e a sua temperatura é  $10,0^\circ\text{C}$ . (a) Qual é o trabalho realizado pelo gás? (b) Qual é a energia trocada como calor entre o gás e o ambiente?

**84** (a) Qual é o número de moléculas por metro cúbico no ar a  $20^\circ\text{C}$  e a uma pressão de 1,0 atm ( $= 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$ )? (b) Qual é a massa de  $1,0 \text{ m}^3$  desse ar? Suponha que 75% das moléculas são de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e 25% são de oxigênio ( $\text{O}_2$ ).

**85** A Fig. 19-29 mostra um ciclo composto de cinco trajetórias:  $AB$  é isotérmica a 300 K,  $BC$  é adiabática com um trabalho de 5,0 J,

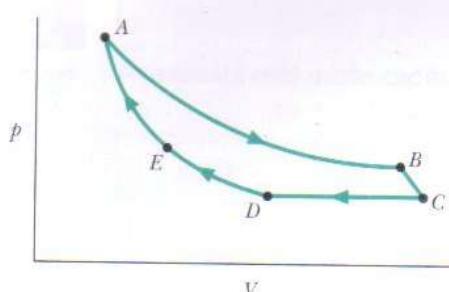


FIG. 19-29  
Problema 85.

*CD* é uma pressão constante de 5 atm, *DE* é isotérmica e *EA* é adiabática com uma variação da energia interna de 8,0 J. Qual é a variação da energia interna do gás ao longo da trajetória *CD*?

**86** Um gás ideal inicialmente a 300 K é comprimido a uma pressão constante de 25 N/m<sup>2</sup> de um volume de 3,0 m<sup>3</sup> para um volume de 1,8 m<sup>3</sup>. No processo, 75 J são perdidos pelo gás na forma de calor. Qual é (a) a variação da energia interna do gás e (b) a temperatura final do gás?

**87** Um gás ideal é submetido a um ciclo completo em três etapas: expansão adiabática com um trabalho de 125 J, contração

isotérmica a 325 K e um aumento na pressão a volume constante. (a) Plote as três etapas em um diagrama *p*-*V*. (b) Quanta energia é transferida como calor na etapa 3? (c) A energia é *absorvida* ou *cedida* pelo gás?

**88** (a) Qual é o volume ocupado por 1,00 mol de um gás ideal nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), ou seja, 1,00 atm ( $= 1,01 \times 10^5$  Pa) e 273 K? (b) Mostre que o número de moléculas por centímetro cúbico nas CNTP é  $2,69 \times 10^{19}$ . (Este número é chamado de *número de Loschmidt*.)

## REVISÃO E RESUMO

**Processos Unidirecionais** Um processo irreversível é aquele que não pode ser invertido por meio de pequenas mudanças no ambiente. O sentido no qual um processo irreversível ocorre é determinado pela variação de entropia  $\Delta S$  do sistema no qual ocorre o processo. A entropia  $S$  é uma propriedade de estado (ou função de estado) do sistema, ou seja, uma função que depende apenas do estado do sistema e não da forma como o sistema atinge esse estado. O postulado da entropia afirma (em parte) o seguinte: se um processo irreversível acontece em um sistema fechado, a entropia do sistema sempre aumenta.

**Cálculo da Variação de Entropia** A variação de entropia  $\Delta S$  em um processo irreversível que leva um sistema de um estado inicial  $i$  para um estado final  $f$  é exatamente igual à variação de entropia  $\Delta S$  de qualquer processo reversível que liga esses mesmos dois estados. Podemos calcular esta última (mas não a primeira) usando a equação

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}, \quad (20-1)$$

onde  $Q$  é a energia absorvida ou cedida pelo sistema na forma de calor durante o processo e  $T$  é a temperatura do sistema em kelvins durante o processo.

No caso de um processo isotérmico reversível, a Eq. 20-1 se reduz a

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{Q}{T}. \quad (20-2)$$

Quando a variação de temperatura  $\Delta T$  de um sistema é pequena em relação à temperatura (em kelvins) antes e depois do processo, a variação de entropia é dada aproximadamente por

$$\Delta S = S_f - S_i \approx \frac{Q}{T_{\text{méd}}}. \quad (20-3)$$

onde  $T_{\text{méd}}$  é a temperatura média do sistema durante o processo.

Quando um gás ideal passa reversivelmente de um estado inicial à temperatura  $T_i$  e volume  $V_i$  para um estado final à temperatura  $T_f$  e volume  $V_f$ , a variação  $\Delta S$  da entropia do gás é dada por

$$\Delta S = S_f - S_i = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + nC_V \ln \frac{T_f}{T_i}. \quad (20-4)$$

**A Segunda Lei da Termodinâmica** Esta lei, que é uma extensão do postulado da entropia, afirma o seguinte: se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta para processos irreversíveis e permanece constante para processos reversíveis. A entropia nunca diminui. Em forma de equação,

$$\Delta S \geq 0. \quad (20-5)$$

**Máquinas Térmicas** Uma máquina térmica é um dispositivo que, operando ciclicamente, extrai uma energia térmica  $|Q_Q|$  de uma fonte quente e realiza uma certa quantidade de trabalho  $|W|$ . A eficiência  $\varepsilon$  de uma máquina térmica é definida como

$$\varepsilon = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}} = \frac{|W|}{|Q_Q|}. \quad (20-11)$$

Em uma máquina térmica ideal todos os processos são reversíveis e as transferências de energia são realizadas sem as perdas

causadas por efeitos como o atrito e a turbulência. A máquina de Carnot é uma máquina ideal que segue o ciclo da Fig. 20-9. Sua eficiência é dada por

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{|Q_F|}{|Q_Q|} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}, \quad (20-12, 20-13)$$

onde  $T_Q$  e  $T_F$  são as temperaturas das fontes quente e fria, respectivamente. As máquinas térmicas reais possuem sempre uma eficiência menor que a dada pela Eq. 20-13. As máquinas térmicas ideais que não são máquinas de Carnot também possuem uma eficiência menor.

Uma máquina perfeita é uma máquina imaginária na qual a energia extraída em forma de calor de uma fonte é totalmente convertida em trabalho. Uma máquina que se comportasse dessa forma violaria a segunda lei da termodinâmica, que pode ser reformulada da seguinte maneira: não existe uma série de processos cujo único resultado seja a conversão total em trabalho da energia contida em uma fonte de calor.

**Refrigeradores** Um refrigerador é um dispositivo que, operando ciclicamente, usa trabalho para transferir uma energia  $|Q_F|$  de uma fonte fria para uma fonte quente. O coeficiente de desempenho  $K$  de um refrigerador é definido como

$$K = \frac{\text{energia utilizada}}{\text{energia adquirida}} = \frac{|Q_F|}{|W|}. \quad (20-14)$$

Um refrigerador de Carnot é uma máquina de Carnot operando no sentido contrário. Para um refrigerador de Carnot, a Eq. 20-14 se torna

$$K_C = \frac{|Q_F|}{|Q_Q| - |Q_F|} = \frac{T_F}{T_Q - T_F}. \quad (20-15, 20-16)$$

Um refrigerador perfeito é um refrigerador imaginário no qual a energia extraída em forma de calor de uma fonte fria é totalmente transferida para uma fonte quente, sem a necessidade de executar trabalho. Um refrigerador que se comportasse dessa forma violaria a segunda lei da termodinâmica, que pode ser reformulada da seguinte forma: não existe uma série de processos cujo único resultado seja a transferência de energia na forma de calor de uma fonte fria para uma fonte quente.

**Uma Visão Estatística da Entropia** A entropia de um sistema pode ser definida em termos das possíveis distribuições de suas moléculas. No caso de moléculas iguais cada distribuição possível de moléculas é chamada de **microestado** do sistema. Todos os microestados equivalentes são agrupados em uma **configuração** do sistema. O número de microestados de uma configuração é a **multiplicidade**  $W$  da configuração.

Para um sistema de  $N$  moléculas que podem ser distribuídas nos dois lados de uma caixa, a multiplicidade é dada por

$$W = \frac{N!}{n_1! n_2!}. \quad (20-20)$$

onde  $n_1$  é o número de moléculas em um dos lados da caixa e  $n_2$  é o número de moléculas no outro lado. Uma hipótese básica da **mecânica estatística** é a de que todos os microestados são igualmente prováveis. Assim, as configurações com uma alta multiplicidade

cidade ocorrem com maior freqüência. Quando  $N$  é muito grande ( $N = 10^{22}$  moléculas, digamos) as moléculas estão quase sempre na configuração na qual  $n_1 = n_2$ .

A multiplicidade  $W$  de uma configuração de um sistema e a entropia  $S$  do sistema nessa configuração estão relacionadas pela equação de entropia de Boltzmann:

$$S = k \ln W, \quad (20-21)$$

onde  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K é a constante de Boltzmann.

Quando  $N$  é muito grande (o caso mais comum), podemos calcular o valor aproximado de  $\ln N!$  usando a *aproximação de Stirling*:

$$\ln N! \approx N(\ln N) - N. \quad (20-22)$$

## PERGUNTAS

- 1** Em quatro experimentos, 2,5 mols de hidrogênio sofrem expansões isotérmicas reversíveis, começando com o mesmo volume, mas a temperaturas diferentes. Os diagramas  $p$ - $V$  correspondentes são mostrados na Fig. 20-19. Ordene as situações de acordo com a variação da entropia do gás, em ordem decrescente. (Sugestão: Veja o Exemplo 20-1.)

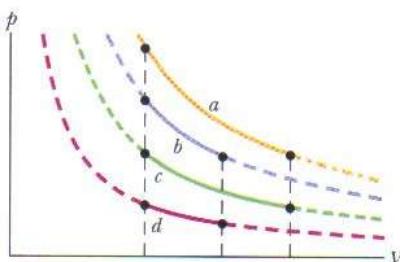


FIG. 20-19 Pergunta 1.

- 2** Em quatro experimentos, os blocos  $A$  e  $B$ , inicialmente a temperaturas diferentes, foram colocados juntos em uma caixa isolada (como no Exemplo 20-2) até atingirem uma temperatura final comum. As variações de entropia dos blocos nos quatro experimentos possuem, não necessariamente na ordem dada, os valores a seguir (em joules por kelvin). Determine a que valor de  $A$  corresponde cada valor de  $B$ .

Bloco	Valores			
$A$	8	5	3	9
$B$	-3	-8	-5	-2

- 3** O ponto  $i$  da Fig. 20-20 representa o estado inicial de um gás ideal a uma temperatura  $T$ . Levando em conta os sinais algébricos, ordene as variações de entropia que o gás sofre ao passar, sucessiva e reversivelmente, do ponto  $i$  para os pontos  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , em ordem decrescente.

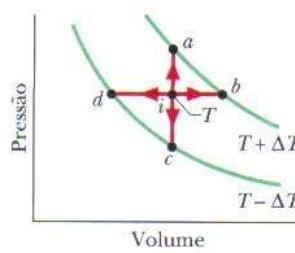


FIG. 20-20 Pergunta 3.

- 4** Um gás monoatômico ideal a uma temperatura inicial  $T_0$  (em kelvins) se expande de um volume inicial  $V_0$  para um volume  $2V_0$  através de cinco processos indicados no diagrama  $T$ - $V$  da Fig. 20-21. Em qual dos processos a expansão é (a) isotérmica, (b) isobárica (a pressão constante) e (c) adiabática? Justifique suas respostas. (d) Em quais dos processos a entropia do gás diminui?

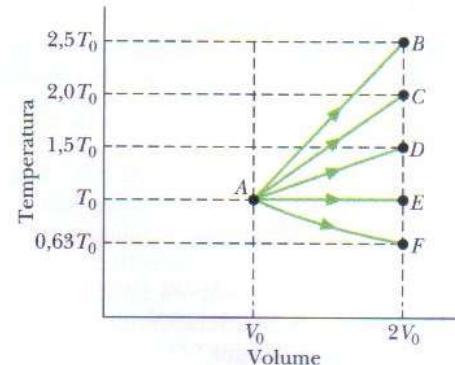


FIG. 20-21 Pergunta 4.

- 5** Um gás, confinado em um cilindro isolado, é comprimido adiabaticamente até metade do volume inicial. A entropia do gás aumenta, diminui ou permanece constante durante o processo?

- 6** Três máquinas de Carnot operam entre as temperaturas de (a) 400 e 500 K, (b) 500 e 600 K e (c) 400 e 600 K. Cada máquina extrai a mesma quantidade de energia por ciclo da fonte quente. Ordene os valores absolutos dos trabalhos realizados por ciclo pelas máquinas, em ordem decrescente.

- 7** Um inventor afirma que inventou quatro máquinas, todas operando entre fontes de calor a temperaturas constantes de 400 K e 300 K. Os dados sobre cada máquina, por ciclo de operação, são os seguintes: máquina A,  $Q_A = 200$  J,  $Q_F = -175$  J e  $W = 40$  J; máquina B,  $Q_Q = 500$  J,  $Q_F = -200$  J e  $W = 400$  J; máquina C,  $Q_A = 600$  J,  $Q_F = -200$  J e  $W = 400$  J; máquina D,  $Q_A = 100$  J,  $Q_F = -90$  J e  $W = 10$  J. Quais das máquinas violam a primeira ou a segunda lei da termodinâmica?

- 8** A entropia por ciclo aumenta, diminui ou permanece constante para (a) um refrigerador de Carnot, (b) um refrigerador real e (c) um refrigerador perfeito (que, obviamente, não pode ser construído na prática)?

- 9** A entropia por ciclo aumenta, diminui ou permanece a mesma para (a) uma máquina de Carnot, (b) uma máquina térmica real e (c) uma máquina térmica perfeita (que, obviamente, não pode ser construída na prática)?

- 10** Uma caixa contém 100 átomos em uma configuração na qual existem 50 átomos em cada lado da caixa. Suponha que você, usando um supercomputador, pudesse contar os diferentes microestados associados a essa configuração à razão de 100 bilhões de estados por segundo. Sem realizar nenhum cálculo por escrito, estime quanto tempo seria necessário para executar a tarefa: um dia, um ano ou muito mais que um ano.

## PROBLEMAS

• • • O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

 Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física*, de Jearl Walker, Rio de Janeiro: LTC, 2008.

### seção 20-3 Variação de Entropia

- 1 Uma amostra de 2,50 mols de um gás ideal se expande reversivelmente e isotermicamente a 360 K até que o volume seja duas vezes maior. Qual é o aumento da entropia do gás?
- 2 Quanta energia deve ser transferida em forma de calor para uma expansão isotérmica reversível de um gás ideal a 132°C se a entropia do gás aumenta de 46,0 J/K?
- 3 Determine (a) a energia absorvida na forma de calor e (b) a variação de entropia de um bloco de cobre de 2,00 kg cuja temperatura é aumentada reversivelmente de 25,0°C para 100°C. O calor específico do cobre é 386 J/kg · K.
- 4 (a) Qual é a variação de entropia de um cubo de gelo de 12,0 g que funde totalmente em um balde de água cuja temperatura está ligeiramente acima do ponto de congelamento da água? (b) Qual é a variação de entropia de uma colher de sopa de água, com uma massa de 5,00 g, que evapora totalmente ao ser colocada em uma placa quente cuja temperatura está ligeiramente acima do ponto de ebulição da água?
- 5 Suponha que 4,00 mols de um gás ideal sofram uma expansão isotérmica reversível do volume  $V_1$  para o volume  $V_2 = 2,00V_1$  a uma temperatura  $T = 400$  K. Determine (a) o trabalho realizado pelo gás e (b) a variação de entropia do gás. (c) Se a expansão fosse reversível e adiabática em vez de isotérmica, qual seria a variação da entropia do gás?
- 6 Um gás ideal sofre uma expansão isotérmica reversível a 77,0°C, aumentando seu volume de 1,30 L para 3,40 L. A variação de entropia do gás é 22,0 J/K. Quantos mols de gás estão presentes?
- 7 Em um experimento, 200 g de alumínio (com um calor específico de 900 J/kg · K) a 100°C são misturados com 50,0 g de água a 20,0°C, com a mistura isolada termicamente. (a) Qual é a temperatura de equilíbrio? Quais são as variações de entropia (b) do alumínio, (c) da água e (d) do sistema alumínio-água?

- 8 Um bloco de 364 g é colocado em contato com uma fonte de calor. O bloco está inicialmente a uma temperatura mais baixa do que a da fonte. Suponha que a consequente transferência de energia na forma de calor da fonte para o bloco seja reversível. A Fig. 20-22 mostra a variação de entropia  $\Delta S$  do bloco até que o equilíbrio térmico seja alcançado. A escala do eixo horizontal é definida por  $T_a = 280$  K e  $T_b = 380$  K. Qual é o calor específico do bloco?

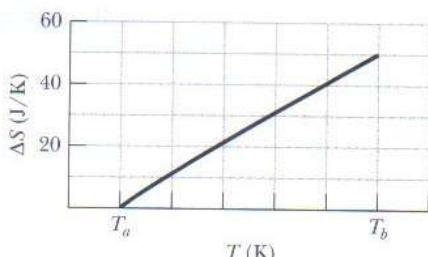


FIG. 20-22 Problema 8.

- 9 No processo irreversível da Fig. 20-5, as temperaturas iniciais dos blocos iguais  $E$  e  $D$  são 305,5 e 294,5 K, respectivamente, e 215 J é a energia que deve ser transferida de um bloco a outro para que o equilíbrio seja atingido. Para os processos reversíveis da Fig. 20-6, quanto é  $\Delta S$  (a) para o bloco  $E$  (b) para a sua fonte de calor, (c) para o bloco  $D$ , (d) para a sua fonte de calor, (e) para o sistema dos dois blocos e (f) para o sistema dos dois blocos e as duas fontes de calor?

- 10 Uma amostra de gás sofre uma expansão isotérmica reversível. A Fig. 20-23 mostra a variação  $\Delta S$  da entropia do gás em função do volume final  $V_f$  do gás. A escala do eixo vertical é definida por  $\Delta S_s = 64$  J/K. Quantos mols de gás existem na amostra?

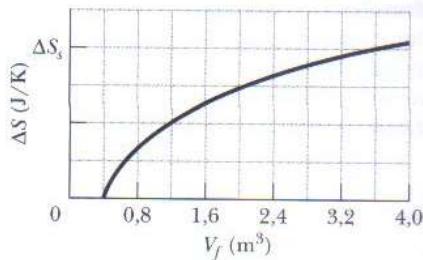


FIG. 20-23 Problema 10.

- 11 Um bloco de cobre de 50,0 g cuja temperatura é 400 K é colocado em uma caixa isolada junto com um bloco de chumbo de 100 g cuja temperatura é 200 K. (a) Qual é a temperatura de equilíbrio do sistema dos dois blocos? (b) Qual é a variação da energia interna do sistema do estado inicial para o estado de equilíbrio? (c) Qual é a variação da entropia do sistema? (Veja a Tabela 18-3.)

- 12 Em temperaturas muito baixas, o calor específico molar  $C_V$  de muitos sólidos é dado aproximadamente por  $C_V = AT^3$ , onde  $A$  depende da substância considerada. Para o alumínio,  $A = 3,15 \times 10^{-5}$  J/mol·K<sup>4</sup>. Determine a variação de entropia de 4,00 mols de alumínio quando a temperatura aumenta de 5,00 K para 10,0 K.

- 13 Na Fig. 20-24, onde  $V_{23} = 3,00V_1$ ,  $n$  mols de um gás diatômico ideal passam por um ciclo no qual as moléculas giram, mas não oscilam. Determine (a)  $p_2/p_1$ , (b)  $p_3/p_1$  e (c)  $T_3/T_1$ . Para a trajetória 1 → 2, determine (d)  $W/nRT_1$ , (e)  $Q/nRT_1$ , (f)  $\Delta E_{int}/nRT_1$  e (g)  $\Delta S/nR$ . Para a trajetória 2 → 3, determine (h)  $W/nRT_1$ , (i)  $Q/nRT_1$ , (j)  $\Delta E_{int}/nRT_1$  e (k)  $\Delta S/nR$ . Para a trajetória 3 → 1, determine (l)  $W/nRT_1$ , (m)  $Q/nRT_1$ , (n)  $\Delta E_{int}/nRT_1$  e (o)  $\Delta S/nR$ .

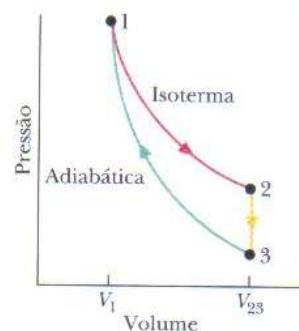


FIG. 20-24 Problema 13.

- 14 Uma amostra de 2,0 mols de um gás monoatômico ideal é submetido ao processo reversível da Fig. 20-25. A escala do eixo vertical é definida por  $T_s = 400,0$  K e a escala do eixo horizontal é definida por  $S_s = 20,0$  J/K. (a) Qual é a energia absorvida pelo gás na

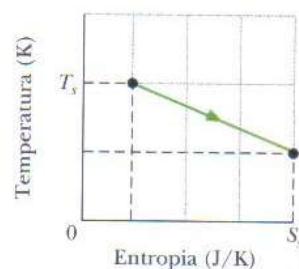


FIG. 20-25 Problema 14.

forma de calor? (b) Qual é a variação da energia interna do gás? (c) Qual é o trabalho realizado pelo gás?

**••15** Um cubo de gelo de 10 g a  $-10^{\circ}\text{C}$  é colocado em um lago cuja temperatura é  $15^{\circ}\text{C}$ . Calcule a variação da entropia do sistema cubo-lago quando o cubo de gelo entra em equilíbrio térmico com o lago. O calor específico do gelo é  $2220 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ . (Sugestão: O cubo de gelo afeta a temperatura do lago?)

**••16** (a) Para 1,0 mol de um gás monoatômico ideal submetido ao ciclo da Fig. 20-26, onde  $V_1 = 4,00V_0$ , qual é o valor de  $W/p_0V_0$  quando o gás vai do estado *a* ao estado *c* ao longo da trajetória *abc*? Quanto é o valor de  $\Delta E_{\text{int}}/p_0V_0$  quando o gás (b) vai de *b* a *c* e (c) descreve um ciclo completo? Quanto é o valor de  $\Delta S$  quando o gás (d) vai de *b* a *c* e (e) descreve um ciclo completo?

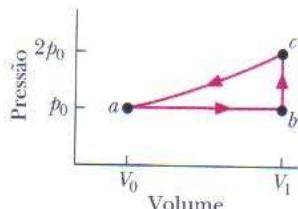


FIG. 20-26 Problema 16.

**••17** Uma mistura de 1773 g de água e 227 g de gelo está inicialmente em equilíbrio a  $0,00^{\circ}\text{C}$ . A mistura é levada, através de um processo reversível, a um segundo estado de equilíbrio no qual a razão água-gelo, em massa, é 1,00:1,00 a  $0,000^{\circ}\text{C}$ . (a) Calcule a variação de entropia do sistema durante esse processo. (O calor de fusão da água é  $333 \text{ kJ/kg}$ .) (b) O sistema retorna ao estado de equilíbrio inicial através de um processo irreversível (usando, por exemplo, um bico de Bunsen). Calcule a variação de entropia do sistema durante esse processo. (c) As respostas dos itens (a) e (b) são compatíveis com a segunda lei da termodinâmica?

**••18** Um cubo de gelo de 8,0 g a  $-10^{\circ}\text{C}$  é colocado em uma garrafa térmica com  $100 \text{ cm}^3$  de água a  $20^{\circ}\text{C}$ . De quanto varia a entropia do sistema cubo-água até o equilíbrio ser alcançado? O calor específico do gelo é  $2220 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ .

**••19** É possível remover energia da água na forma de calor na temperatura de congelamento ( $0,0^{\circ}\text{C}$  à pressão atmosférica) ou mesmo abaixo dessa temperatura sem que a água congele; quando isso acontece, dizemos que a água está *super-resfriada*. Suponha que uma gota d'água de 1,00 g seja super-resfriada até que sua temperatura seja a mesma do ar nas vizinhanças,  $-5,00^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, a gota congela bruscamente, transferindo energia para o ar na forma de calor. Qual é a variação da entropia da gota? (Sugestão: Use um processo reversível de três estágios, como se a gota passasse pelo ponto normal de congelamento.) O calor específico do gelo é  $2220 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ .

**••20** Uma garrafa térmica isolada contém 130 g de água a  $80,0^{\circ}\text{C}$ . Um cubo de gelo de 12,0 g a  $0^{\circ}\text{C}$  é introduzido na garrafa térmica, formando um sistema *gelo + água original*. (a) Qual é a temperatura de equilíbrio do sistema? Quais são as variações de entropia da água que era originalmente gelo (b) ao derreter e (c) ao se aquecer até a temperatura de equilíbrio? (d) Qual é a variação de entropia da água original ao esfriar até a temperatura de equilíbrio? (e) Qual é a variação total de entropia do sistema *gelo + água original* ao atingir a temperatura de equilíbrio?

**••21** Suponha que 1,00 mol de um gás monoatômico ideal inicialmente à pressão  $p_1$  e ocupando um volume  $V_1$  seja submetido sucessivamente a dois processos: (1) uma expansão isotérmica até um volume  $2,00V_1$  e (2) um aumento de pressão a volume constante até uma pressão  $2,00p_1$ . Qual é o valor de  $Q/p_1V_1$  (a) para o processo 1 e (b) para o processo 2? Qual é o valor de  $W/p_1V_1$  (c) para o processo 1 e (d) para o processo 2? Para o processo completo, qual é o valor (e) de  $\Delta E_{\text{int}}/p_1V_1$  e (f) de  $\Delta S$ ? O gás retorna

ao estado inicial e é levado ao mesmo estado final, mas dessa vez através dos seguintes processos sucessivos: (1) uma compressão isotérmica até a pressão  $2,00p_1$  e (2) um aumento de volume até um volume  $2,00V_1$  a pressão constante. Qual é o valor de  $Q/p_1V_1$  (g) para o processo 1 e (h) para o processo 2? Qual é o valor de  $W/p_1V_1$  (i) para o processo 1 e (j) para o processo 2? Quais são os valores de (k)  $\Delta E_{\text{int}}/p_1V_1$  e (l)  $\Delta S$  para o processo completo?

**••22** Expande-se 1,00 mol de um gás monoatômico ideal inicialmente a  $5,00 \text{ kPa}$  e  $600 \text{ K}$  do volume inicial  $V_i = 1,00 \text{ m}^3$  para o volume final  $V_f = 2,00 \text{ m}^3$ . Em qualquer instante durante a expansão a pressão  $p$  e o volume  $V$  do gás estão relacionados por  $p = 5,00 \exp[(V_i - V)/a]$ , com  $p$  em kPa,  $V_i$  e  $V$  em  $\text{m}^3$ , e  $a = 1,00 \text{ m}^3$ . Quais são (a) a pressão e (b) a temperatura final do gás? (c) Qual é o trabalho realizado pelo gás durante a expansão? (d) Qual é o valor de  $\Delta S$  para a expansão? (Sugestão: Use dois processos reversíveis simples para determinar  $\Delta S$ .)

### seção 20-5 Entropia no Mundo Real: Máquinas Térmicas

**•23** Uma máquina de Carnot tem uma eficiência de 22,0%. Ela opera entre duas fontes de calor de temperatura constante cuja diferença de temperatura é  $75,0^{\circ}\text{C}$ . Qual é a temperatura (a) da fonte fria e (b) da fonte quente?

**•24** Em um reator de fusão nuclear hipotético, o combustível é o gás deutério a uma temperatura de  $7 \times 10^8 \text{ K}$ . Se esse gás pudesse ser usado para operar uma máquina de Carnot com  $T_F = 100^{\circ}\text{C}$ , qual seria a eficiência da máquina? Tome as duas temperaturas como sendo exatas e calcule a resposta com sete algarismos significativos.

**•25** Uma máquina de Carnot opera entre  $235^{\circ}\text{C}$  e  $115^{\circ}\text{C}$ , absorvendo  $6,30 \times 10^4 \text{ J}$  por ciclo na temperatura mais alta. (a) Qual é a eficiência da máquina? (b) Qual é o trabalho por ciclo que essa máquina é capaz de realizar?

**•26** Uma máquina de Carnot absorve 52 kJ na forma de calor e rejeita 36 kJ na forma de calor em cada ciclo. Calcule (a) a eficiência da máquina e (b) o trabalho realizado por ciclo em quilojoules.

**•27** Uma máquina de Carnot, cuja fonte fria está a  $17^{\circ}\text{C}$ , tem uma eficiência de 40%. De quanto deve ser elevada a temperatura da fonte quente para que a eficiência aumente para 50%?

**•28** Uma máquina de Carnot de 500 W opera entre fontes de calor a temperaturas constantes de  $100^{\circ}\text{C}$  e  $60,0^{\circ}\text{C}$ . Qual é a taxa com a qual a energia é (a) absorvida pela máquina em forma de calor e (b) rejeitada pela máquina em forma de calor?

**•29** A Fig. 20-27 mostra um ciclo reversível a que é submetido 1,00 mol de um gás monoatômico ideal. O volume  $V_c = 8,00V_b$ . O processo *bc* é uma expansão adiabática, com  $p_b = 10,0 \text{ atm}$  e  $V_b = 1,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ . Para o ciclo, determine (a) a energia fornecida ao gás em forma de calor, (b) a energia liberada pelo gás em forma de calor, (c) o trabalho líquido realizado pelo gás e (d) a eficiência do ciclo.

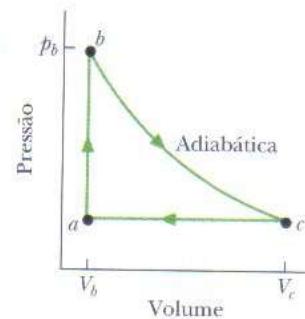


FIG. 20-27 Problema 29.

**••30** Uma máquina de Carnot é projetada para produzir um certo trabalho  $W$  por ciclo. Em cada ciclo, energia em forma de calor  $Q_O$  é transferida para a substância de trabalho da máquina a partir da fonte quente, que está a uma temperatura ajustável

$T_Q$ . A fonte fria é mantida à temperatura  $T_F = 250\text{ K}$ . A Fig. 20-28 mostra  $Q_Q$  para uma faixa de valores de  $T_Q$ . A escala do eixo vertical é definida por  $Q_{Q_0} = 6,0\text{ kJ}$ . Se  $T_Q$  é ajustada para  $550\text{ K}$ , qual é o valor de  $Q_Q$ ?

••31 A Fig. 20-29 mostra um ciclo reversível a que é submetido  $1,00\text{ mol}$  de um gás monoatômico ideal. Suponha que  $p = 2p_0$ ,  $V = 2V_0$ ,  $p_0 = 1,01 \times 10^5\text{ Pa}$  e  $V_0 = 0,0225\text{ m}^3$ . Calcule (a) o trabalho realizado durante o ciclo, (b) a energia adicionada em forma de calor durante o percurso  $abc$  e (c) a eficiência do ciclo. (d) Qual é a eficiência de uma máquina de Carnot operando entre a temperatura mais alta e a temperatura mais baixa desse ciclo? (e) Este valor é maior ou menor que a eficiência calculada em (c)?

••32 Um gás ideal ( $1,0\text{ mol}$ ) é a substância de trabalho em uma máquina térmica que descreve o ciclo mostrado na Fig. 20-30. Os processos  $BC$  e  $DA$  são reversíveis e adiabáticos. (a) O gás é monoatômico, diatônico ou poliatônico? (b) Qual é a eficiência da máquina?

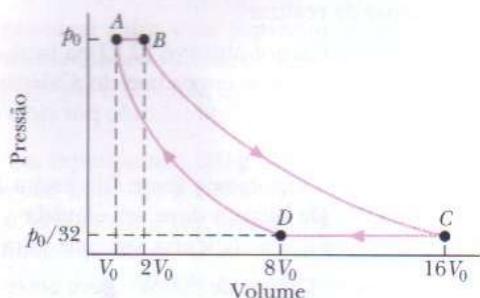


FIG. 20-30 Problema 32.

••33 A eficiência de um certo motor de automóvel é 25% quando o motor realiza um trabalho de  $8,2\text{ kJ}$  por ciclo. Suponha que o processo seja reversível. Quais são (a) a energia  $Q_{ganho}$  em forma de calor que o motor ganha por ciclo graças à queima do combustível e (b) a energia  $Q_{perdido}$  em forma de calor que o motor perde por ciclo por causa do atrito? Se uma regulagem do motor aumenta a eficiência para 31%, quais são os novos valores (c) de  $Q_{ganho}$  e (d) de  $Q_{perdido}$  para o mesmo valor do trabalho?

••34 No primeiro estágio de uma máquina de Carnot de dois estágios, uma energia  $Q_1$  é absorvida na forma de calor à temperatura  $T_1$ , um trabalho  $W_1$  é realizado e uma energia  $Q_2$  é liberada na forma de calor à temperatura  $T_2$ . O segundo estágio absorve essa energia na forma de calor  $Q_2$ , realiza um trabalho  $W_2$  e libera energia na forma de calor  $Q_3$  a uma temperatura ainda menor  $T_3$ . Mostre que a eficiência da máquina é  $(T_1 - T_3)/T_1$ .

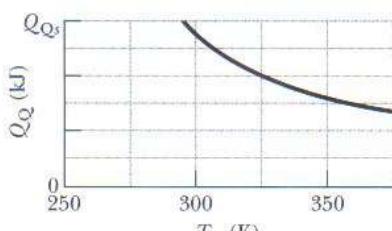


FIG. 20-28 Problema 30.

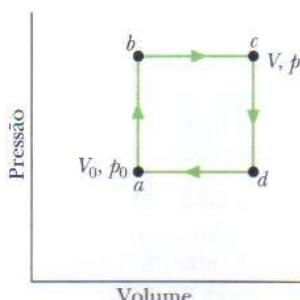


FIG. 20-29 Problema 31.

••35 O ciclo da Fig. 20-31 representa a operação de um motor de combustão interna a gasolina. O volume  $V_3 = 4,00V_1$ . Suponha que a mistura de admissão gasolina-ar é um gás ideal com  $\gamma = 1,30$ . Quais são as razões (a)  $T_2/T_1$ , (b)  $T_3/T_1$ , (c)  $T_4/T_1$ , (d)  $p_3/p_1$  e (e)  $p_4/p_1$ ? (f) Qual é a eficiência do motor?

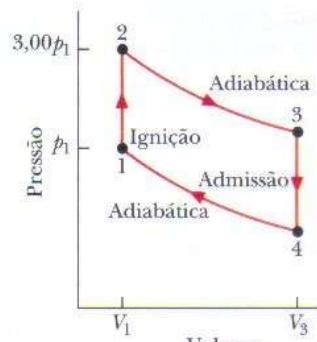


FIG. 20-31 Problema 35.

### seção 20-6 Entropia no Mundo Real: Refrigeradores

••36 O motor elétrico de uma bomba térmica transfere energia em forma de calor do exterior, que está a  $-5,0^\circ\text{C}$ , para uma sala que está a  $17^\circ\text{C}$ . Se a bomba térmica fosse uma bomba térmica de Carnot (uma máquina de Carnot trabalhando no sentido inverso), que energia seria transferida na forma de calor para a sala para cada joule de energia elétrica consumida?

••37 Um condicionador de ar de Carnot retira energia térmica de uma sala a  $70^\circ\text{F}$  e a transfere na forma de calor para o ambiente, que está a  $96^\circ\text{F}$ . Para cada joule da energia elétrica necessária para operar o condicionador de ar, quantos joules são removidos da sala?

••38 Para fazer gelo, um refrigerador que é o inverso de uma máquina de Carnot extrai  $42\text{ kJ}$  em forma de calor a  $-15^\circ\text{C}$  durante cada ciclo, com um coeficiente de desempenho de 5,7. A temperatura ambiente é  $30,3^\circ\text{C}$ . Qual é (a) a energia por ciclo fornecida ao ambiente em forma de calor para o ambiente e (b) o trabalho por ciclo necessário para operar o refrigerador?

••39 Uma bomba térmica é usada para aquecer um edifício. A temperatura externa é  $-5,0^\circ\text{C}$  e a temperatura no interior do edifício deve ser mantida em  $22^\circ\text{C}$ . O coeficiente de desempenho da bomba é 3,8 e a bomba térmica fornece  $7,54\text{ MJ}$  por hora ao edifício em forma de calor. Se a bomba térmica é uma máquina de Carnot trabalhando no sentido inverso, qual deve ser a potência de operação da bomba?

••40 Qual deve ser o trabalho realizado por um refrigerador de Carnot para transferir  $1,0\text{ J}$  em forma de calor (a) de uma fonte de calor a  $7,0^\circ\text{C}$  para uma a  $27^\circ\text{C}$ , (b) de uma fonte a  $-73^\circ\text{C}$  para uma a  $27^\circ\text{C}$ , (c) de uma fonte a  $-173^\circ\text{C}$  para uma a  $27^\circ\text{C}$  e (d) de uma fonte a  $-223^\circ\text{C}$  para uma a  $27^\circ\text{C}$ ?

••41 A Fig. 20-32 mostra uma máquina de Carnot que trabalha entre as temperaturas  $T_1 = 400\text{ K}$  e  $T_2 = 150\text{ K}$  e alimenta um refrigerador de Carnot que trabalha entre as temperaturas  $T_3 = 325\text{ K}$  e  $T_4 = 225\text{ K}$ . Qual é a razão  $Q_3/Q_1$ ?

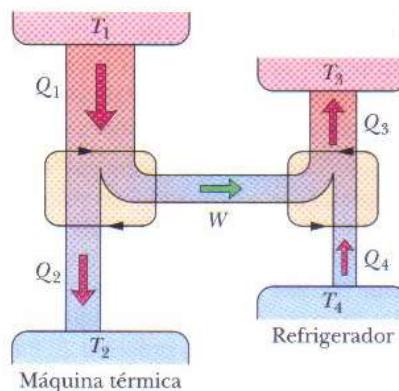


FIG. 20-32 Problema 41.

**••42** (a) Durante cada ciclo, uma máquina de Carnot absorve 750 J em forma de calor de uma fonte quente a 360 K, com a fonte fria a 280 K. Qual é o trabalho realizado por ciclo? (b) A máquina é operada em sentido inverso para funcionar como um refrigerador de Carnot entre as mesmas fontes. Durante cada ciclo, que trabalho é necessário para remover 1200 J em forma de calor da fonte fria?

**••43** Um condicionador de ar operando entre 93°F e 70°F é especificado como tendo uma capacidade de refrigeração de 4000 Btu/h. Seu coeficiente de desempenho é 27% do de um refrigerador de Carnot operando entre as mesmas duas temperaturas. Qual é a potência do motor do condicionador de ar em cavalos-vapor?

**••44** O motor de um refrigerador tem uma potência de 200 W. Se o compartimento do congelador está a 270 K e o ar externo está a 300 K, e supondo a eficiência de um refrigerador de Carnot, qual é a quantidade máxima de energia que pode ser extraída em forma de calor do compartimento do congelador em 10,0 min?

### seção 20-8 Uma Visão Estatística da Entropia

**•45** Construa uma tabela como a Tabela 20-1 para oito moléculas.

**••46** Uma caixa contém  $N$  moléculas iguais de um gás, igualmente divididas entre os dois lados da caixa. Para  $N = 50$ , quais são (a) a multiplicidade  $W$  da configuração central, (b) o número total de microestados e (c) a porcentagem do tempo que o sistema passa na configuração central? Para  $N = 100$ , quais são (d)  $W$  da configuração central, (e) o número total de microestados e (f) a porcentagem do tempo que o sistema passa na configuração central? Para  $N = 200$ , quais são (g)  $W$  da configuração central, (h) o número total de microestados e (i) a porcentagem do tempo que o sistema passa na configuração central? (j) O tempo que o sistema passa na configuração central aumenta ou diminui quando  $N$  aumenta?

**••47** Uma caixa contém  $N$  moléculas de um gás. A caixa é dividida em três partes iguais. (a) Por extensão da Eq. 20-20, escreva uma fórmula para a multiplicidade de qualquer configuração dada. (b) Considere duas configurações: a configuração  $A$ , com números iguais de moléculas nas três divisões da caixa, e a configuração  $B$ , com números iguais de moléculas em cada lado da caixa dividida em duas partes iguais, em vez de em três. Qual é a razão  $W_A/W_B$  entre a multiplicidade da configuração  $A$  e a da configuração  $B$ ? (c) Calcule  $W_A/W_B$  para  $N = 100$ . (Como 100 não é divisível por 3, ponha 34 moléculas em uma das três partes da configuração  $A$  e 33 moléculas nas duas outras partes.)

### Problemas Adicionais

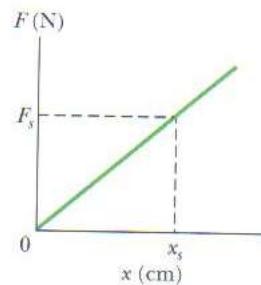
**48** A Fig. 20-33 mostra o módulo  $F$  da força em função da distensão  $x$  de um elástico, com a escala do eixo  $F$  definida por  $F_s = 1,50 \text{ N}$  e a escala do eixo  $x$  definida por  $x_s = 3,50 \text{ cm}$ . A temperatura é 2,00°C. Quando o elástico é distendido de  $x = 1,70 \text{ cm}$ , qual é a taxa de variação da entropia do elástico com a distensão para pequenas distensões? 

FIG. 20-33 Problema 48.

**49** Quando uma amostra de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) sofre um aumento de temperatura a volume constante, a distribuição de velocidades das moléculas se altera, ou seja, a função distribuição de probabilidade  $P(v)$  da velocidade das moléculas se torna mais larga,

como mostra a Fig. 19-8b. Uma forma de descrever este alargamento de  $P(v)$  é medir a diferença  $\Delta v$  entre a velocidade mais provável  $v_p$  e a velocidade média quadrática  $v_{rms}$ . Quando  $P(v)$  se alarga para velocidades mais altas,  $\Delta v$  aumenta. Suponha que o gás seja ideal e que as moléculas de  $\text{N}_2$  giram, mas não oscilam. Para 1,5 mol, uma temperatura inicial de 250 K e uma temperatura final de 500 K, quais são (a) a diferença inicial  $\Delta v_i$ , (b) a diferença final  $\Delta v_f$  e (c) a variação de entropia  $\Delta S$  do gás?

**50** Um ciclo de três etapas é realizado por 3,4 mol de um gás diatômico ideal: (1) a temperatura do gás é aumentada de 200 K para 500 K a volume constante; (2) o gás é expandido isotermicamente até a pressão original; (3) o gás é contraído a pressão constante de volta ao volume original. Durante o ciclo, as moléculas giram, mas não oscilam. Qual é a eficiência do ciclo?

**51** Suponha que um poço profundo seja cavado na crosta terrestre perto de um dos pólos, onde a temperatura da superfície é -40°C, até uma profundidade onde a temperatura é 800°C. (a) Qual é o limite teórico para a eficiência de uma máquina térmica operando entre essas duas temperaturas? (b) Se toda a energia liberada em forma de calor na fonte fria fosse usada para derreter gelo que se encontra inicialmente a -40°C, a que taxa água líquida a 0°C poderia ser produzida por uma usina de energia elétrica de 100 MW (trate-a como uma máquina térmica)? O calor específico do gelo é 2220 J/kg · K; o calor de fusão da água é 333 kJ/kg. (Observe que neste caso a máquina térmica opera efetivamente entre 0°C e 800°C. Uma energia liberada a -40°C não pode aquecer nada acima de -40°C).

**52** (a) Uma máquina de Carnot opera entre uma fonte quente a 320 K e uma fonte fria a 260 K. Se a máquina absorve 500 J da fonte quente em forma de calor por ciclo, qual é o trabalho realizado por ciclo? (b) Se a máquina opera como um refrigerador entre as mesmas fontes, que trabalho por ciclo deve ser fornecido para remover 1000 J em forma de calor da fonte fria?

**53** Um lingote de cobre de 600 g a 80,0°C é colocado em 70,0 g de água a 10,0°C em um recipiente isolado. (Os calores específicos estão na Tabela 18-3.) (a) Qual é a temperatura de equilíbrio do sistema cobre-água? Que variação de entropia (b) o cobre, (c) a água e (d) o sistema cobre-água sofrem até atingir a temperatura de equilíbrio?

**54** Suponha que 0,550 mol de um gás ideal seja expandido isotermicamente e reversivelmente nas quatro situações a seguir. Qual é a variação de entropia do gás para cada situação?

Situação	(a)	(b)	(c)	(d)
Temperatura (K)	250	350	400	450
Volume inicial ( $\text{cm}^3$ )	0,200	0,200	0,300	0,300
Volume final ( $\text{cm}^3$ )	0,800	0,800	1,20	1,20

**55** Uma amostra de 0,600 kg de água está inicialmente na forma de gelo à temperatura de -20°C. Qual é a variação de entropia da amostra se a temperatura aumenta para 40°C?

**56** Qual é a variação de entropia para 3,20 mol de um gás monoatômico ideal que sofre um aumento reversível de temperatura de 380 K para 425 K a volume constante?

**57** Um ciclo de três etapas é executado reversivelmente por 4,00 mol de um gás ideal: (1) uma expansão adiabática que dá ao gás 2,00 vezes o volume inicial, (2) um processo a volume constante, (3) uma compressão isotérmica de volta ao estado inicial

do gás. Não sabemos se o gás é monoatômico ou diatômico; se for diatômico, não sabemos se as moléculas estão girando ou oscilando. Quais são as variações de entropia (a) para o ciclo, (b) para o processo 1, (c) para o processo 3 e (d) para o processo 2?

**58** Suponha que 1,0 mol de um gás monoatômico ideal inicialmente com 10 L e a 300 K seja aquecido a volume constante até 600 K, liberado para se expandir isotermicamente até a pressão inicial e, finalmente, contraído a pressão constante até os valores iniciais de volume, pressão e temperatura. Durante o ciclo, quais são (a) a energia líquida que entra no sistema (o gás) na forma de calor e (b) o trabalho líquido realizado pelo gás? (c) Qual é a eficiência do ciclo?

**59** Dois mols de um gás diatômico inicialmente a 300 K realizam o seguinte ciclo: o gás é (1) aquecido a volume constante até 800 K, (2) liberado para se expandir isotermicamente até a pressão inicial, (3) contraído a pressão constante para o estado inicial. Supondo que as moléculas do gás nem giram nem oscilam, determine (a) a energia líquida transferida para o gás em forma de calor, (b) o trabalho líquido realizado pelo gás e (c) a eficiência do ciclo.

**60** Um bloco de tungstênio de 45,0 g a 30,0°C e um bloco de prata de 25,0 g a -120°C são colocados juntos em um recipiente isolado. (Os calores específicos estão na Tabela 18-3.) (a) Qual é a temperatura de equilíbrio? Que variação de entropia (b) o tungstênio, (c) a prata e (d) o sistema tungstênio-prata sofrem até atingir a temperatura de equilíbrio?

**61** Uma barra cilíndrica de cobre com 1,50 m de comprimento e 2,00 cm de raio é isolada para impedir a perda de calor através da superfície lateral. Uma das extremidades é colocada em contato com uma fonte de calor a 300°C; a outra é colocada em contato com uma fonte de calor a 30,0°C. Qual é a taxa de aumento de entropia do sistema barra-fontes?

**62** Um refrigerador ideal realiza 150 J de trabalho para remover 560 J em forma de calor do compartimento frio. (a) Qual é o coeficiente de desempenho do refrigerador? (b) Qual é a quantidade de energia em forma de calor liberada para a cozinha por ciclo?

**63** Um refrigerador de Carnot extrai 35,0 kJ em forma de calor durante cada ciclo, operando com um coeficiente de desempenho de 4,60. Quais são (a) a energia transferida por ciclo para o ambiente e (b) o trabalho realizado por ciclo?

**64** Quatro partículas estão na caixa isolante da Fig. 20-17. Quais são (a) a menor multiplicidade, (b) a maior multiplicade, (c) a menor entropia e (d) a maior entropia do sistema de quatro partículas?

**65** Uma barra de latão está em contato térmico com uma fonte de calor a uma temperatura constante de 130°C em uma extremidade e com uma fonte de calor a uma temperatura constante de 24,0°C na outra extremidade. (a) Calcule a variação total da entropia do sistema barra-fontes quando 5030 J de energia são transferidos através da barra, de uma fonte para a outra. (b) A entropia da barra varia?

**66** Um liquefator de hélio está em uma sala mantida a 300 K. Se o hélio está a 4,0 K, qual é o valor mínimo da razão  $Q_{\text{sala}}/Q_{\text{He}}$ ,

onde  $Q_{\text{sala}}$  é a energia fornecida à sala em forma de calor e  $Q_{\text{He}}$  é a energia removida do hélio em forma de calor?

**67** O sistema A de três partículas e o sistema B de cinco partículas estão em caixas isoladas como as da Fig. 20-17. Qual é a menor multiplicade W (a) do sistema A e (b) do sistema B? Qual é a maior multiplicade (c) do sistema A e (d) do sistema B? Qual é a maior entropia (e) de A e (f) de B?

**68** Calcule a eficiência de uma usina de combustível fóssil que consome 380 toneladas métricas de carvão por hora para produzir trabalho útil à taxa de 750 MW. O calor de combustão do carvão (o calor produzido pela queima do carvão) é 28 MJ/kg.

**69** A temperatura de 1,00 mol de um gás monoatômico ideal é elevada reversivelmente de 300 K para 400 K, com o volume mantido constante. Qual é a variação da entropia do gás?

**70** Repita o Problema 69, supondo que a pressão do gás seja mantida constante.

**71** Suponha que 260 J sejam conduzidos de uma fonte à temperatura constante de 400 K para uma fonte (a) a 100 K, (b) a 200 K, (c) a 300 K e (d) a 360 K. Qual é a variação líquida da entropia das fontes,  $\Delta S_{\text{liq}}$ , em cada caso? (e) Quando a diferença entre as temperaturas das fontes diminui,  $\Delta S_{\text{liq}}$  aumenta, diminui ou permanece a mesma?

**72** Uma máquina de Carnot cuja fonte quente está a 400 K tem uma eficiência de 30,0%. De quanto deve mudar a temperatura da fonte fria para que a eficiência aumente para 40,0%?

**73** Uma caixa contém  $N$  moléculas. Considere duas configurações: a configuração A, com uma divisão igual de moléculas entre os dois lados da caixa, e a configuração B, com 60,0% das moléculas no lado esquerdo e 40,0% no lado direito. Para  $N = 50$ , quais são (a) a multiplicade  $W_A$  da configuração A, (b) a multiplicade  $W_B$  da configuração B e (c) a razão  $f_{B/A}$  entre o tempo que o sistema passa na configuração B e o tempo que o sistema passa na configuração A? Para  $N = 100$ , quais são (d)  $W_A$ , (e)  $W_B$  e (f)  $f_{B/A}$ ? Para  $N = 200$ , quais são (g)  $W_A$ , (h)  $W_B$  e (i)  $f_{B/A}$ ? (j) Com o aumento de  $N$ , aumenta, diminui ou permanece constante?

**74** Suponha que 2,00 mols de um gás diatômico ideal sejam submetidos reversivelmente ao ciclo mostrado no diagrama  $T$ - $S$  da Fig. 20-34, onde  $S_1 = 6,00 \text{ J/K}$  e  $S_2 = 8,00 \text{ J/K}$ . As moléculas não giram nem oscilam. Qual é a energia transferida em forma de calor  $Q$  (a) na trajetória 1 → 2, (b) na trajetória 2 → 3 e (c) no ciclo completo? (d) Qual é o trabalho  $W$  para o processo isotérmico? O volume  $V_1$  no estado 1 é  $0,200 \text{ m}^3$ . Qual é o volume (e) no estado 2 e (f) no estado 3?

Qual é a variação  $\Delta E_{\text{int}}$  (g) na trajetória 1 → 2, (h) na trajetória 2 → 3 e (i) no ciclo completo? (Sugestão: O item (h) pode ser resolvido em uma ou duas linhas de cálculos usando os resultados da Seção 19-8 ou em uma página de cálculos usando os resultados da Seção 19-11.) (j) Qual é o trabalho  $W$  para o processo adiabático?

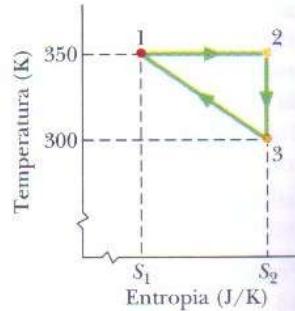


FIG. 20-34 Problema 74.

- 29.** (a) 0,75; (b) 0,25; (c)  $2^{-0.5}x_m$  **31.** (a) 2,25 Hz; (b) 125 J; (c) 250 J; (d) 86,6 cm **33.** (a) 3,1 ms; (b) 4,0 m/s; (c) 0,080 J; (d) 80 N; (e) 40 N **35.** (a) 1,1 m/s; (b) 3,3 cm **37.** (a) 2,2 Hz; (b) 56 cm/s; (c) 0,0 kg; (d) 20,0 cm **39.** (a) 39,5 rad/s; (b) 34,2 rad/s; (c) 124 rad/s<sup>2</sup> **41.** (a) 1,64 s; (b) igual **43.** (a) 0,205 kg · m<sup>2</sup>; (b) 47,7 cm; (c) 1,50 s **45.** 0,366 s **47.** 8,77 s **49.** (a) 0,53 m; (b) 2,1 s **51.** 0,0653 s **53.** (a) 0,845 rad; (b) 0,0602 rad **55.** (a) 2,26 s; (b) aumenta; (c) permanece o mesmo **57.** (a) 14,3 s; (b) 5,27 **59.** 6,0% **61.** (a)  $F_m/b\omega$ , (b)  $F_m/b$  **63.** 5,0 cm **65.** (a) 1,2 J; (b) 50 **67.** 1,53 m **69.** (a) 16,6 cm; (b) 1,23% **71.** (a)  $2,8 \times 10^3$  rad/s; (b) 2,1 m/s; (c) 5,7 km/s<sup>2</sup> **73.** (a) 0,735 kg · m<sup>2</sup>; (b) 0,0240 N · m; (c) 0,181 rad/s **75.** (a) 0,35 Hz; (b) 0,39 Hz; (c) 0 (não há oscilações) **77.** (a) 7,90 N/m; (b) 1,19 cm; (c) 2,00 Hz **79.** 1,6 kg **81.** (a) 3,5 m; (b) 0,75 s **83.** 7,2 m/s **85.** (a) 1,23 kN/m; (b) 76,0 N **87.** (a) 1,1 Hz; (b) 5,0 cm **89.** (a)  $1,3 \times 10^2$  N/m; (b) 0,62 s; (c) 1,6 Hz; (d) 5,0 cm; (e) 0,51 m/s **91.** (a) 3,2 Hz; (b) 0,26 m; (c)  $x = (0,26 \text{ m}) \cos(20t - \pi/2)$ , com  $t$  em segundos **93.** 0,079 kg · m<sup>2</sup> **95.** (a) 0,44 s; (b) 0,18 m **97.** (a) 245 N/m; (b) 0,284 s **99.** 50 cm **101.** (a)  $8,11 \times 10^{-5}$  kg · m<sup>2</sup>; (b) 3,14 rad/s **103.** 14,0° **105.** (a) 0,30 m; (b) 0,28 s; (c)  $1,5 \times 10^2$  m/s<sup>2</sup>; (d) 11 J **107.** (a) 0,45 s; (b) 0,10 m acima e 0,20 m abaixo; (c) 0,15 m; (d) 2,3 J **109.**  $7 \times 10^2$  N/m **111.** (a)  $F/m$ ; (b)  $2F/mL$ ; (c) 0

## Capítulo 16

- T** **1.** a, 2; b, 3; c, 1 (compare com a fase da Eq. 16-2 e veja a Eq. 16-5) **2.** (a) 2, 3, 1 (veja a Eq. 16-12); (b) 3 e depois 1 e 2 empatados (determine a amplitude de  $dy/dt$ ) **3.** (a) permanece igual (é independente de  $f$ ); (b) diminui ( $\lambda = v/f$ ); (c) aumenta; (d) aumenta **4.** 0,20 e 0,80, 0,60, 0,45 **5.** (a) l; (b) 3; (c) 2 **6.** (a) 75 Hz; (b) 525 Hz **P** **1.** a, para cima; b, para cima; c, para baixo; d, para baixo; e, para baixo; f, para baixo; g, para cima; h, para cima **3.** (a) 1, 4, 2, 3; (b) 1, 4, 2, 3 **5.** (a) 0; 0,2 comprimento de onda; 0,5 comprimento de onda (zero); (b)  $4P_{\text{méd},1}$  **7.** intermediária (mais próxima de totalmente destrutiva) **9.** c, a, b **11.** d **PR** **1.** (a)  $3,49 \text{ m}^{-1}$ ; (b) 31,5 m/s **3.** (a) 0,680 s; (b) 1,47 Hz; (c) 2,06 m/s **5.** 1,1 ms **7.** (a) 11,7 cm; (b)  $\pi$  rad **9.** (a) 64 Hz; (b) 1,3 m; (c) 4,0 cm; (d)  $5,0 \text{ m}^{-1}$ ; (e)  $4,0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ; (f)  $\pi/2$  rad; (g) negativo **11.** (a) 3,0 mm; (b)  $16 \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $2,4 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ; (d) negativo **13.** (a) negativa; (b) 4,0 cm; (c)  $0,31 \text{ cm}^{-1}$ ; (d)  $0,63 \text{ s}^{-1}$ ; (e)  $\pi$  rad; (f) negativo; (g) 2,0 cm/s; (h)  $-2,5 \text{ cm/s}$  **15.** 129 m/s **17.** (a) 0,12 mm; (b)  $141 \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $628 \text{ s}^{-1}$ ; (d) positivo **19.** (a) 15 m/s; (b) 0,036 N **21.** (a) 5,0 cm; (b) 40 cm; (c) 12 m/s; (d) 0,033 s; (e) 9,4 m/s; (f)  $16 \text{ m}^{-1}$ ; (g)  $1,9 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ; (h) 0,93 rad; (i) positivo **23.** 2,63 m **27.** 3,2 mm **29.** 0,20 m/s **31.**  $1,41 y_m$  **33.** (a) 9,0 mm; (b)  $16 \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $1,1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ; (d) 2,7 rad; (e) positivo **35.** 5,0 cm **37.** 84° **39.** (a) 3,29 mm; (b) 1,55 rad; (c) 1,55 rad **41.** (a) 7,91 Hz; (b) 15,8 Hz; (c) 23,7 Hz **43.** (a) 82,0 m/s; (b) 16,8 m; (c) 4,88 Hz **45.** (a) 144 m/s; (b) 60,0 cm; (c) 241 Hz **47.** (a) 105 Hz; (b) 158 m/s **49.** 260 Hz **51.** (a) 0,25 cm; (b)  $1,2 \times 10^2$  cm/s; (c) 3,0 cm; (d) 0 **53.** (a) 0,50 cm; (b)  $3,1 \text{ m}^{-1}$ ; (c)  $3,1 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ ; (d) negativo **55.** (a) 2,00 Hz; (b) 2,00 m; (c) 4,00 m/s; (d) 50,0 cm; (e) 150 cm; (f) 250 cm; (g) 0; (h) 100 cm; (i) 200 cm **57.** 0,25 m **59.** (a) 324 Hz; (b) 8 **61.** (a)  $0,83y_1$ ; (b) 37° **63.** (a) 0,31 m; (b) 1,64 rad; (c) 2,2 mm **65.** 1,2 rad **67.** (a) 3,77 m/s; (b) 12,3 N; (c) 0; (d) 46,4 W; (e) 0; (f) 0; (g)  $\pm 0,50 \text{ cm}$  **69.** (a)  $2\pi y_m/\lambda$ ; (b) não **71.** (a) 1,00 cm; (b)  $3,46 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ ; (c)  $10,5 \text{ m}^{-1}$ ; (d) positivo **73.** (a) 75 Hz; (b) 13 ms **75.** (a) 240 cm; (b) 120 cm; (c) 80 cm **77.** (a) 144 m/s; (b) 3,00 m; (c) 1,50 m; (d) 48,0 Hz; (e) 96,0 Hz **79.** (a) 2,0 mm; (b) 95 Hz; (c)  $+30 \text{ m/s}$ ; (d) 31 cm; (e) 1,2 m/s **81.** 36 N **83.** (a) 300 m/s; (b) não **85.** (a) 1,33 m/s; (b) 1,88 m/s; (c)  $16,7 \text{ m/s}^2$ ; (d)  $23,7 \text{ m/s}^2$  **87.** (a) 0,16 m; (b)  $2,4 \times 10^2 \text{ N}$ ; (c)  $y(x, t) = (0,16 \text{ m}) \sin[(1,57 \text{ m}^{-1})x] \sin[(31,4$

- $\text{s}^{-1})t]$  **89.** (a)  $[k \Delta\ell(\ell + \Delta\ell)/m]^{0.5}$  **91.** (a) 0,52 m; (b) 40 m/s; (c) 0,40 m **93.** (c) 2,0 m/s; (d)  $-x$

## Capítulo 17

- T** **1.** começando a diminuir (exemplo: desloque mentalmente as curvas da Fig. 17-7 para a direita, a partir do ponto  $x = 42 \text{ m}$ ) **2.** (a) 1 e 2,3 (veja a Eq. 17-28); (b) 3 e depois 1 e 2 empatados (veja a Eq. 17-26) **3.** o segundo (veja as Eqs. 17-39 e 17-41) **4.** a, maior; b, menor; c, indefinido; d, indefinido; e, maior; f, menor **P** **1.** C e depois A e B empatados **3.** (a) 0; 0,2 comprimento de onda; 0,5 comprimento de onda (zero); (b)  $4P_{\text{méd},1}$  **5.** 150 Hz e 450 Hz **7.** E, A, D, C, B **9.** 1, 4, 3, 2 **PR** **1.** (a) 2,6 km; (b)  $2,0 \times 10^2$  **3.** (a) 79 m; (b) 41 m; (c) 89 m **5.** 40,7 m **7.**  $1,9 \times 10^3$  km **9.** (a)  $76,2 \mu\text{m}$ ; (b)  $0,333 \text{ mm}$  **11.** 0,23 ms **13.** (a)  $2,3 \times 10^2 \text{ Hz}$ ; (b) maior **15.** 960 Hz **17.** (a) 14; (b) 14 **19.** (a) 343 Hz; (b) 3; (c) 5; (d) 686 Hz; (e) 2; (f) 3 **21.** (a) 143 Hz; (b) 3; (c) 5; (d) 286 Hz; (e) 2; (f) 3 **23.** (a) 0; (b) totalmente construtiva; (c) aumenta; (d) 128 m; (e) 63,0 m; (f) 41,2 m **25.** 15,0 mW **27.** 36,8 nm **29.** (a)  $1,0 \times 10^3$ ; (b) 32 **31.** 0,76  $\mu\text{m}$  **33.** 2  $\mu\text{W}$  **35.** (a)  $5,97 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ ; (b) 4,48 nW **37.** (a) 0,34 nW; (b) 0,68 nW; (c) 1,4 nW; (d) 0,88 nW; (e) 0 **39.** (a) 833 Hz; (b) 0,418 m **41.** (a) 2; (b) 1 **43.** (a) 405 m/s; (b) 596 N; (c) 44,0 cm; (d) 37,3 cm **45.** (a) 3; (b) 1129 Hz; (c) 1506 Hz **47.** 45,3 N **49.** 12,4 m **51.** 2,25 ms **53.** 0,020 **55.** 0 **57.** (a) 526 Hz; (b) 555 Hz **59.** 155 Hz **61.** (a) 1,022 kHz; (b) 1,045 kHz **63.** 41 kHz **65.** (a) 485, Hz; (b) 500,0 Hz; (c) 486,2 Hz; (d) 500,0 Hz **67.** (a) 2,0 kHz; (b) 2,0 kHz **69.** (a) 42°; (b) 11 s **71.** (a) 2,10 m; (b) 1,47 m **73.** (a) 21 nm; (b) 35 cm; (c) 24 nm; (d) 35 cm **75.** 0,25 **77.** (a)  $9,7 \times 10^2 \text{ Hz}$ ; (b) 1,0 kHz; (c) 60 Hz, não **79.** (a)  $39,7 \mu\text{W/m}^2$ ; (b) 171 nm; (c) 0,893 Pa **81.** (a) 10 W; (b)  $0,032 \text{ W/m}^2$ ; (c) 99 dB **83.** (a) 7,70 Hz; (b) 7,70 Hz **85.** (a) 59,7; (b)  $2,81 \times 10^{-4}$  **87.** (a) 5,2 kHz; (b) 2 **89.** 2,1 m **91.** 1 cm **93.** (a)  $3,6 \times 10^2 \text{ m/s}$ ; (b) 150 Hz **95.** (a) 0; (b) 0,572 m; (c) 1,14 m **97.** 171 m **99.** (a) 11 ms; (b) 3,8 m **101.** (a) para a direita; (b) 0,90 m/s; (c) menor **103.** (a)  $5,5 \times 10^2 \text{ m/s}$ ; (b)  $1,1 \times 10^3 \text{ m/s}$ ; (c) 1 **105.** 400 Hz **107.** (a) 14; (b) 12 **109.** (b) 0,8 a 1,6  $\mu\text{s}$  **111.** 4,8  $\times 10^2 \text{ Hz}$

## Capítulo 18

- T** **1.** (a) são todos iguais; (b)  $50^\circ\text{X}$ ,  $50^\circ\text{Y}$ ,  $50^\circ\text{W}$  **2.** (a) 2 e 3, 1, 4; (b) 3, 2 e, em seguida, 1 e 4 empatados (por analogia com as Eqs. 18-9 e 18-10, suponha que a variação da área é proporcional à área inicial) **3.** A (veja a Eq. 18-14) **4.** c e e (maximizam a área limitada por um ciclo no sentido horário) **5.** (a) são todas iguais ( $\Delta E_{\text{int}}$  não depende da trajetória, mas apenas de *i* e *f*); (b) 4, 3, 2, 1 (comparando as áreas sob as curvas); (c) 4, 3, 2, 1 (veja a Eq. 18-26) **6.** (a) nula (ciclo fechado); (b) negativa (*W* é negativo; veja a Eq. 18-26). **7.** b e d, a, c (mesmo valor de  $P_{\text{cond}}$ ; veja a Eq. 18-32) **P** **1.** B e, em seguida, A e C empatados **3.** c e, em seguida, a, b e d empatados **5.** (a) ambos no sentido horário; (b) ambos no sentido horário **7.** c, b, a **9.** (a) f, porque a temperatura do gelo não pode aumentar até o ponto de congelamento e depois diminuir; (b) b e c no ponto de congelamento da água, d acima, e abaixo; (c) em b, o líquido congela parcialmente e o gelo não derrete; em c o líquido não congela e o gelo não derrete; em d o líquido não congela e o gelo não derrete totalmente; em e, o líquido congela totalmente e o gelo não derrete **11.** (a) maior; (b) 1, 2, 3; (c) 1, 3, 2; (d) 1, 2, 3; (e) 2, 3, 1 **PR** **1.** 348 K **3.** 1,366 **5.** (a)  $320^\circ\text{F}$ ; (b)  $-12,3^\circ\text{F}$  **7.**  $-92,1^\circ\text{X}$  **9.**  $29 \text{ cm}^3$  **11.**  $2,731 \text{ cm}$  **13.**  $49,87 \text{ cm}^3$  **15.** 0,26  $\text{cm}^3$  **17.**  $360^\circ\text{C}$  **19.** 0,13 mm **21.** 7,5 cm **23.** 94,6 L **25.** 42,7 kJ **27.** 160 s **29.** 33 g **31.** 3,0 min **33.** 33 m<sup>2</sup> **35.** 13,5 C° **37.** 742 kJ **39.** (a)  $5,3^\circ\text{C}$ ; (b) 0; (c)  $0^\circ\text{C}$ ; (d) 60 g **41.** (a)

0°C; (b) 2,5°C **43.** -30 J **45.** (a)  $1,2 \times 10^2$  J; (b) 75 J; (c) 30 J **47.** 60 J **49.** (a) 6,0 cal; (b) -43 cal; (c) 40 cal; (d) 18 cal; (e) 18 cal **51.** 1,66 kJ/s **53.** (a) 16 J/s; (b) 0,048 g/s **55.** (a) 1,23 kW; (b) 2,28 kW; (c) 1,05 kW **57.** 0,50 min **59.** (a)  $1,7 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup>; (b) 18 W/m<sup>2</sup> **61.** -4,2°C **63.** 1,1 m **65.** 0,40 cm/h **67.** 10% **69.**  $4,5 \times 10^2$  J/kg·K **71.** 0,432 cm<sup>3</sup> **73.** (a)  $11p_1V_1$ ; (b)  $6p_1V_1$  **75.**  $4,83 \times 10^{-2}$  cm<sup>3</sup> **77.** 23 J **79.**  $3,1 \times 10^2$  J **81.** 10,5°C **83.** 79,5°C **85.** 8,6 J **87.** 333 J **89.** (a) 90 W; (b)  $2,3 \times 10^2$  W; (c)  $3,3 \times 10^2$  W **91.** (a)  $1,87 \times 10^4$ ; (b) 10,4 h **93.** (a) -45 J; (b) +45 J **95.** (a) 80 J; (b) 80 J **97.** -6,1 nW **99.** 1,17 C°

### Capítulo 19

**T** **1.** todos, menos *c* **2.** (a) são todos iguais; (b) 3, 2, 1 **3.** o gás *A* **4.** 5 (a maior variação de *T*) e, em seguida, 1, 2, 3 e 4 empataados **5.** 1, 2, 3 ( $Q_3 = 0$ ,  $Q_2$  é produzido pelo trabalho  $W_2$ , mas  $Q_1$  é produzido por um trabalho maior  $W_1$  e aumenta a temperatura do gás) **P** **1.** 20 J **3.** *d, a e b, c* **5.** (a) 3; (b) 1; (c) 4; (d) 2; (e) sim **7.** a volume constante **9.** (a) 1, 2, 3, 4; (b) 1, 2, 3 **PR** **1.** (a) 0,0127 mol; (b)  $7,64 \times 10^{21}$  átomos **3.25** moléculas/cm<sup>3</sup> **5.186** kPa **7.** (a) 0,0388 mol; (b) 220°C **9.** (a)  $3,14 \times 10^3$  J; (b) cedido **11.** 360 K **13.** 5,60 kJ **15.** (a) 1,5 mol; (b)  $1,8 \times 10^3$  K; (c)  $6,0 \times 10^2$  K; (d) 5,0 kJ **17.**  $2,0 \times 10^5$  Pa **19.**  $1,8 \times 10^2$  m/s **21.** (a) 511 m/s; (b) -200°C; (c) 899°C **23.** 1,9 kPa **25.** (a)  $5,65 \times 10^{-21}$  J; (b)  $7,72 \times 10^{-21}$  J; (c) 3,40 kJ; (d) 4,65 kJ **27.** (a)  $6,76 \times 10^{-20}$  J; (b) 10,7 **29.** (a)  $6 \times 10^9$  km **31.** (a)  $3,27 \times 10^{10}$  moléculas/cm<sup>3</sup>; (b) 172 m **33.** (a) 420 m/s; (b) 458 m/s; (c) sim **35.** (a) 6,5 km/s; (b) 7,1 km/s **37.** (a)  $1,0 \times 10^4$  K; (b)  $1,6 \times 10^5$  K; (c)  $4,4 \times 10^2$  K; (d)  $7,0 \times 10^3$  K; (e) não; (f) sim **39.** (a) 7,0 km/s; (b)  $2,0 \times 10^{-8}$  cm; (c)  $3,5 \times 10^{10}$  colisões/s **41.** (a) 0,67; (b) 1,2; (c) 1,3; (d) 0,33 **43.** a) 0; (b) +374 J; (c) +374 J; (d)  $+3,11 \times 10^{-22}$  J **45.** 15,8 J/mol · K **47.** (a)  $6,6 \times 10^{-26}$  kg; (b) 40 g/mol **49.** (a) 3,49 kJ; (b) 2,49 kJ; (c) 997 J; (d) 1,00 kJ **51.** 8,0 kJ **53.** (a) 6,98 kJ; (b) 4,99 kJ; (c) 1,99 kJ; (d) 2,99 kJ **55.** (a) 14 atm; (b)  $6,2 \times 10^2$  K **57.** -15 J **59.** -20 J **61.** (a) diatômico; (b) 446 K; (c) 8,10 mol **63.** (a) 3,74 kJ; (b) 3,74 kJ; (c) 0; (d) 0; (e) -1,81 kJ; (f) 1,81 kJ; (g) -3,22 kJ; (h) -1,93 kJ; (i) -1,29 kJ; (j) 520 J; (k) 0; (l) 520 J; (m) 0,0246 m<sup>3</sup>; (n) 2,00 atm; (o) 0,0373 m<sup>3</sup>; (p) 1,00 atm **65.** (a) 900 cal; (b) 0; (c) 900 cal; (d) 450 cal; (e) 1200 cal; (f) 300 cal; (g) 900 cal; (h) 450 cal; (i) 0; (j) -900 cal; (k) 900 cal; (l) 450 cal **67.** 349 K **69.** (a) -374 J; (b)

0; (c) +374 J; (d)  $+3,11 \times 10^{-22}$  J **71.**  $7,03 \times 10^9$  s<sup>-1</sup> **73.** (a) 2,00 atm; (b) 333 J; (c) 0,961 atm; (d) 236 J **75.** (a) monoatômica; (b)  $2,7 \times 10^4$  K; (c)  $4,5 \times 10^4$  mol; (d) 3,4 kJ; (e)  $3,4 \times 10^2$  kJ; (f) 0,010 **77.** (a) 8,0 atm; (b) 300 K; (c) 4,4 kJ; (d) 3,2 atm; (e) 120 K; (f) 2,9 kJ; (g) 4,6 atm; (h) 170 K; (i) 3,4 kJ **79.** (a) 38 L; (b) 71 g **81.** (a)  $3/v_0^3$ ; (b)  $0,750v_0$ ; (c)  $0,775v_0$  **83.** (a) -2,37 kJ; (b) 2,37 kJ **85.** -3,0 J **87.** (b) 125 J; (c) absorvida

### Capítulo 20

**T** **1.** a, b, c **2.** menor (*Q* é menor) **3.** c, b, a **4.** a, d, c, b **5.** b **P** **1.** *a e c* empataados e depois *b e d* empataados **3.** *b, a, c, d* **5.** permanece constante **7.** A, primeira; B, primeira e segunda; C, segunda; D, nenhuma **9.** (a) permanece a mesma; (b) aumenta; (c) diminui **PR** **1.** 14,4 J/K **3.** (a)  $5,79 \times 10^4$  J; (b) 173 J/K **5.** (a) 9,22 kJ; (b) 23,1 J/K; (c) 0 **7.** (a) 57,0°C; (b) -22,1 J/K; (c) +24,9 J/K; (d) +2,8 J/K **9.** (a) -710 mJ/K; (b) +710 mJ/K; (c) +723 mJ/K; (d) -723 mJ/K; (e) +13 mJ/K; (f) 0 **11.** (a) 320 K; (b) 0; (c) +1,72 J/K **13.** (a) 0,333; (b) 0,215; (c) 0,644; (d) 1,10; (e) 1,10; (f) 0; (g) 1,10; (h) 0; (i) -0,889; (j) -0,889; (k) -1,10; (l) -0,889; (m) 0; (n) 0,889; (o) 0 **15.** +0,76 J/K **17.** (a) -943 J/K; (b) +943 J/K; (c) sim **19.** -1,18 J/K **21.** (a) 0,693; (b) 4,50; (c) 0,693; (d) 0; (e) 4,50; (f) 23,0 J/K; (g) -0,693; (h) 7,50; (i) -0,693; (j) 3,00; (k) 4,50; (l) 23,0 J/K **23.** (a) 266 K; (b) 341 K **25.** (a) 23,6%; (b) 1,49  $\times 10^4$  J **27.** 97 K **29.** (a) 1,47 kJ; (b) 554 J; (c) 918 J; (d) 62,4% **31.** (a) 2,27 kJ; (b) 14,8 kJ; (c) 15,4%; (d) 75,0%; (e) maior **33.** (a) 33 kJ; (b) 25 kJ; (c) 26 kJ; (d) 18 kJ **35.** (a) 3,00; (b) 1,98; (c) 0,660; (d) 0,495; (e) 0,165; (f) 34,0% **37.** 20 J **39.** 440 W **41.** 2,03 **43.** 0,25 hp **47.** (a)  $W = N!/(n_1!n_2!n_3!)$ ; (b)  $[(N/2)!(N/2)!][(N/3)!(N/3)!]$ ; (c)  $4,2 \times 10^{16}$  **49.** (a) 87 m/s; (b)  $1,2 \times 10^2$  m/s; (c) 22 J/K **51.** (a) 78%; (b) 82 kg/s **53.** (a) 40,9°C; (b) -27,1 J/K; (c) 30,5 J/K; (d) 3,4 J/K **55.**  $1,18 \times 10^3$  J/K **57.** (a) 0; (b) 0; (c) -23,0 J/K; (d) 23,0 J/K **59.** (a) 25,5 kJ; (b) 4,73 kJ; (c) 18,5% **61.** 0,141 J/K · s **63.** (a) 42,6 kJ; (b) 7,61 kJ **65.** (a) 4,45 J/K; (b) não **67.** (a) l; (b) l; (c) 3; (d) 10; (e)  $1,5 \times 10^{-23}$  J/K; (f)  $3,2 \times 10^{-23}$  J/K **69.** +3,59 J/K **71.** (a) 1,95 J/K; (b) 0,650 J/K; (c) 0,217 J/K; (d) 0,072 J/K; (e) diminui **73.** (a)  $1,26 \times 10^{14}$ ; (b)  $4,71 \times 10^{13}$ ; (c) 0,37; (d)  $1,01 \times 10^{29}$ ; (e)  $1,37 \times 10^{28}$ ; (f) 0,14; (g)  $9,05 \times 10^{38}$ ; (h)  $1,64 \times 10^{57}$ ; (i) 0,018; (j) diminui