

LISTA 3 – Temperatura, Calor, Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, Teoria Cinética dos Gases e Noções de Mecânica Estatística

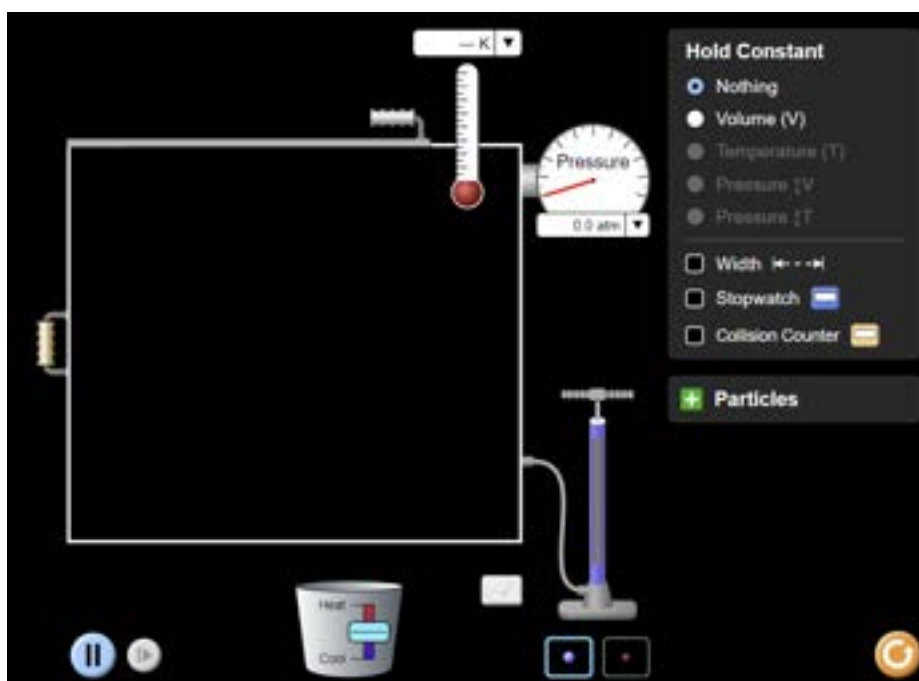
PRAZO: 25/06 – 23:59

PARA CADA EXPERIMENTAÇÃO INDIVIDUAL, SUBMETA UM RELATÓRIO DESCREVENDO O PROCESSO, RESULTADOS E OBSERVAÇÕES DECORRENTES DA SIMULAÇÃO REALIZADA.

1. EXPERIMENTO VIRTUAL – GASES

Acesse o site:

https://phet.colorado.edu/sims/html/gases-intro/latest/gases-intro_all.html

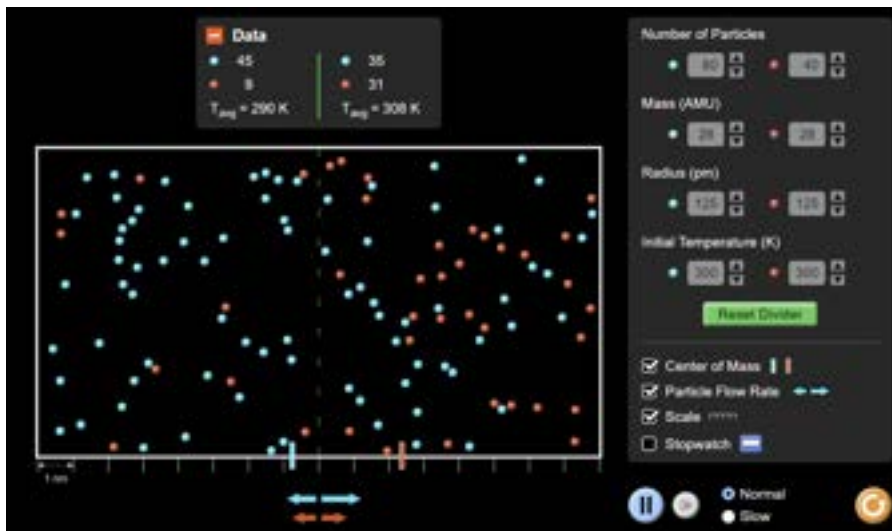


- Introduza o número de partículas do tipo “heavy” (Particles) como sendo os 3 primeiros números de seu CPF.
- Sistemáticamente, meça os parâmetros termodinâmicos (Volume, Temperatura e Pressão) explorando as condições de Volume constante, Temperatura Constante e Pressão Constante.

2. EXPERIMENTO VIRTUAL – DIFUSÃO

Acesse o site:

https://phet.colorado.edu/sims/html/diffusion/latest/diffusion_all.html



- Introduza o número de partículas do tipo azul e vermelha (Number of Particles) como sendo os **3 primeiros** números de seu CPF.
- Indique como a Temperatura inicial os **3 últimos** números de seu CPF
- Sistemáticamente, meça e apresente o gráfico da temperatura média (T_{avg}) em função do tempo para cada espécie de partícula (azul e vermelha)
- Discuta os efeitos decorrentes dos processos de difusão.

2. EXERCÍCIOS SUGERIDOS E PARA ENTREGA (**exercícios em vermelho sublinhados**)

CAPÍTULO 7:

Problemas: 7.3, 7.6, 7.9

CAPÍTULO 8:

Problemas: 8.3, 8.4, 8.8, 8.9, 8.16, 8.18, 8.19

CAPÍTULO 9:

Problemas: 9.1, 9.4, 9.6, 9.8, 9.10, 9.12

CAPÍTULO 10:

Problemas: 10.1, 10.3, 10.4, 10.8, 10.9, 10.10, 10.13, 10.20,

CAPÍTULO 11:

Problemas: 11.1, 11.3, 11.7, 11.9, 11.16, 11.18

CAPÍTULO 12:

Problemas: 12.2, 12.4, 12.7, 12.8

Analogamente, a variação de volume de um paralelepípedo de arestas l_1 , l_2 e l_3 será

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta(l_1 l_2 l_3)}{l_1 l_2 l_3} \cong \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_2}{l_2} + \frac{\Delta l_3}{l_3}$$

o que dá

$$\boxed{\Delta V / V = 3\alpha \Delta T} \quad (7.5.4)$$

desprezando termos de ordem α^2 e α^3 . Logo, o *coeficiente de dilatação volumétrica* é 3α , o que se aplica também ao volume de uma cavidade, num corpo cujo coeficiente de dilatação linear é α .

Para um *líquido*, que toma a forma do recipiente que o contém, só interessa o *coeficiente de dilatação volumétrica* β , definido por

$$\boxed{\Delta V / V = \beta \Delta T} \quad (7.5.5)$$

Valores típicos de β para líquidos são bem maiores que para sólidos: tipicamente, da ordem de 10^{-3} por $^{\circ}\text{C}$. Para o mercúrio, $\beta \approx 1,8 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$.

Se tivermos então um termômetro de mercúrio, em que este enche completamente o bulbo de vidro à temperatura de 0°C , o volume do bulbo à temperatura θ será $V_0(1 + 3\alpha\theta)$, e o volume do mercúrio será $V_0(1 + \beta\theta)$, de modo que o volume de mercúrio expelido do bulbo e que irá subir pelo tubo capilar é

$$V_0(\beta - 3\alpha)\theta$$

Diz-se que $\beta - 3\alpha$ é o *coeficiente de dilatação aparente* do líquido (no caso, o mercúrio).

Em geral, β é > 0 , mas há uma anomalia no caso da água, para a qual β se torna < 0 entre 0°C e 4°C . Assim, a densidade máxima da água é atingida a 4°C , e ela se expande, em lugar de se contrair, quando a temperatura diminui, na região abaixo de 4°C , até se congelar. Essa expansão pode fazer estourar um cano cheio de água, quando a mesma se congela. É também por essa razão que a superfície de um lago se congela, sem que isto ocorra com a água a maior profundidade. Esta permanece a temperatura mais elevada, com densidade maior, de forma que o gelo flutua sobre ela, permitindo assim que os peixes sobrevivam durante o inverno.

A explicação microscópica do coeficiente de dilatação anômalo da água na vizinhança de seu ponto de fusão não é simples. A água é um líquido muito peculiar, devido às propriedades específicas da ligação de hidrogênio, encontrada em suas moléculas.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO 7

1. Uma esfera oca de alumínio tem um raio interno de 10 cm e raio externo de 12 cm a 15°C . O coeficiente de dilatação linear do alumínio é $2,3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. De quantos cm^3 varia o volume da cavidade interna quando a temperatura sobe para 40°C ? O volume da cavidade aumenta ou diminui?
2. Uma barra retilínea é formada por uma parte de latão soldada em outra de aço. A 20°C , o comprimento total da barra é de 30 cm, dos quais 20 cm de latão e 10 cm de aço. Os coeficientes de dilatação linear são $1,9 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ para o latão e $1,1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ para o aço. Qual é o coeficiente de dilatação linear da barra?

3. Uma tira bimetálica, usada para controlar termostatos, é constituída de uma lâmina estreita de latão, de 2 mm de espessura, presa lado a lado com uma lâmina de aço, de mesma espessura $d = 2$ mm, por uma série de rebites. A 15°C , as duas lâminas têm o mesmo comprimento, igual a 15 cm, e a tira está reta. A extremidade A da tira é fixa; a outra extremidade B pode mover-se, controlando o termostato. A uma temperatura de 40°C , a tira se encurvou, adquirindo um raio de curvatura R , e a extremidade B se deslocou de uma distância vertical y (Fig. P.1). Calcule R e y , sabendo que o coeficiente de dilatação linear do latão é $1,9 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ e o do aço é $1,1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$.

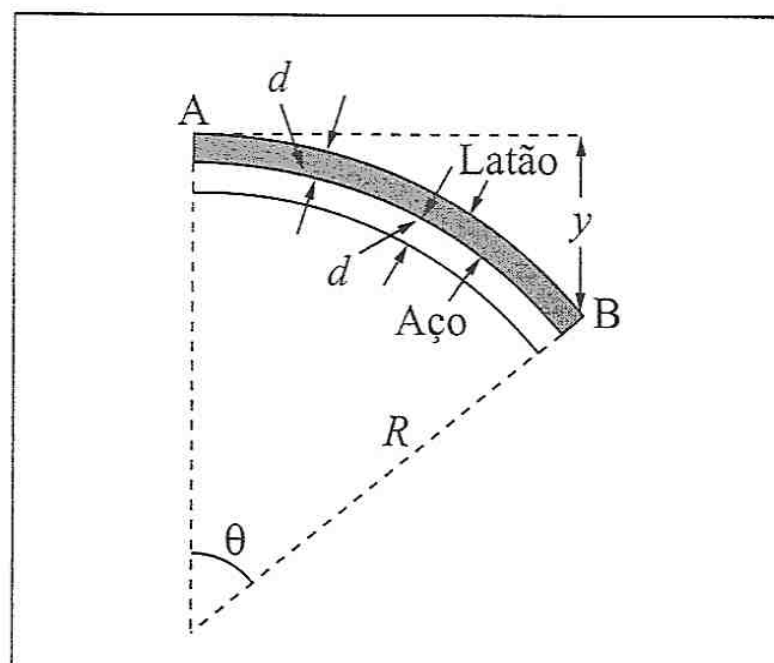


Figura P.1

4. Num relógio de pêndulo, o pêndulo é uma barra metálica, projetada para que seu período de oscilação seja igual a 1 s. Verifica-se que, no inverno, quando a temperatura média é de 10°C , o relógio adianta, em média 55 s por semana; no verão, quando a temperatura média é de 30°C , o relógio atrasa, em média 1 minuto por semana. (a) Calcule o coeficiente de dilatação linear do metal do pêndulo. (b) A que temperatura o relógio funcionaria com precisão?
5. A Fig. P.2 ilustra um esquema possível de construção de um pêndulo cujo comprimento l não seja afetado pela dilatação térmica. As três barras verticais claras na figura, de mesmo comprimento l_1 , são de aço, cujo coeficiente de dilatação linear é $1,1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$. As duas barras verticais escuras na figura, de mesmo comprimento l_2 , são de alumínio, cujo coeficiente de dilatação linear é $2,3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$. Determine l_1 e l_2 de forma a manter $l = 0,5\text{m}$.

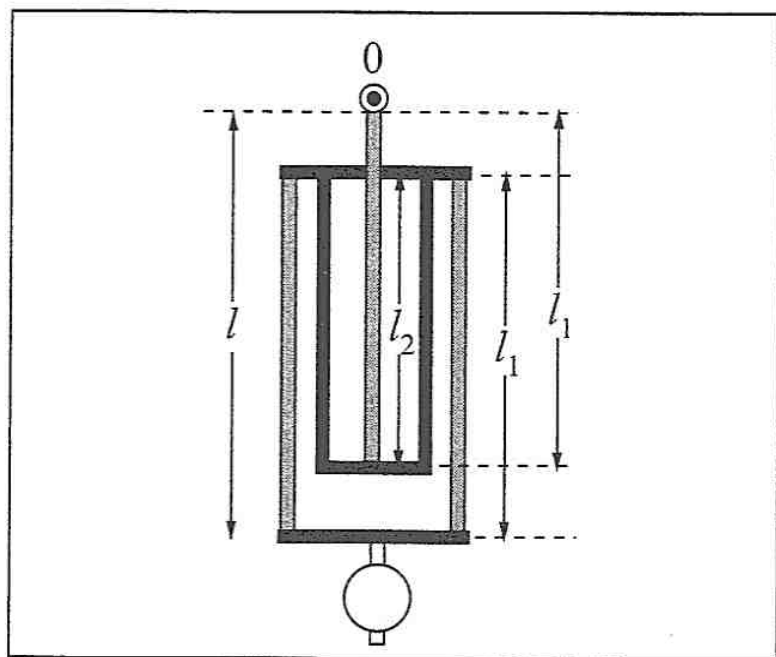


Figura P.2

6. (a) Um líquido tem coeficiente de dilatação volumétrica β . Calcule a razão ρ/ρ_0 entre a densidade do líquido à temperatura T e sua densidade ρ_0 à temperatura T_0 . (b) No método de Dulong e Petit para determinar β , o líquido é colocado num tubo em U, com um dos ramos imerso em gelo fundente (temperatura T_0) e o outro (Fig. P.3) em óleo aquecido à temperatura T . O nível atingido pelo líquido nos dois ramos é, respectivamente medido pelas alturas h_0 e h . Mostre que a experiência permite determinar β (em lugar do coeficiente de dilatação aparente do líquido), e que o resultado independe de o tubo em U ter secção uniforme. (c) Numa experiência com acetona utilizando este método, T_0 é 0°C , T é 20°C , $h_0 = 1$ m e $h = 1,03$ m. Calcule o coeficiente de dilatação volumétrica da acetona.

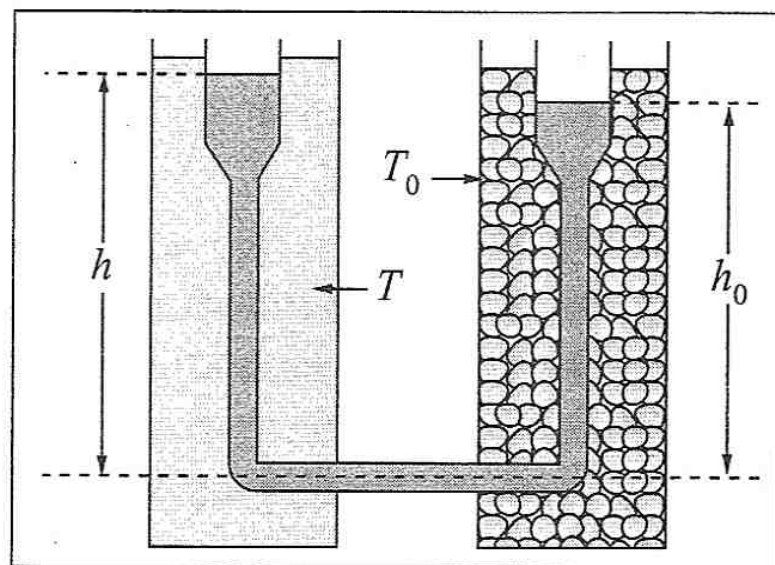


Figura P.3

7. Um tubo cilíndrico delgado de secção uniforme, feito de um material de coeficiente de dilatação linear α , contém um líquido de coeficiente de dilatação volumétrica β . À temperatura T_0 , a altura da coluna líquida é h_0 . (a) Qual é a variação Δh de altura da coluna quando a temperatura sobe de 1°C ? (b) Se o tubo é de vidro ($\alpha = 9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) e o líquido é mercúrio ($\beta = 1,8 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$), mostre que este sistema não constitui um bom termômetro, do ponto de vista prático, calculando Δh para $h_0 = 10$ cm.

8. Para construir um termômetro de leitura fácil, do ponto de vista prático (Problema 7), acopla-se um tubo capilar de vidro a um reservatório numa extremidade do tubo. Suponha que, à temperatura T_0 , o mercúrio está todo contido no reservatório, de volume V_0 , e o diâmetro do capilar é d_0 . (a) Calcule a altura h do mercúrio no capilar a uma temperatura $T > T_0$ (Fig. P.4). (b) Para um volume do reservatório $V_0 = 0,2$ cm³, calcule qual deve ser o diâmetro do capilar em mm para que a coluna de mercúrio suba de 1 cm quando a temperatura aumenta de 1°C . Tome $\alpha = 9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ para o vidro e $\beta = 1,8 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ para o mercúrio.

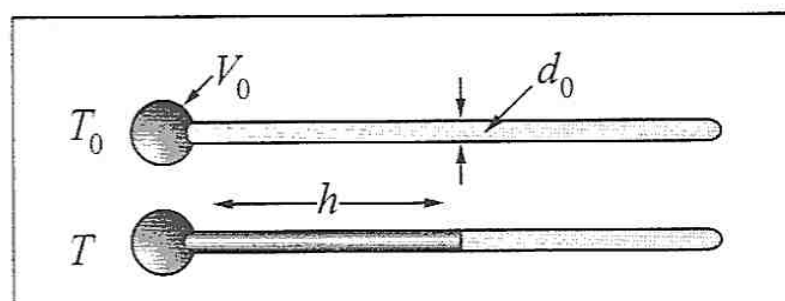


Figura P.4

9. Um reservatório cilíndrico de aço contém mercúrio, sobre o qual flutua um bloco cilíndrico de latão. À temperatura de 20°C , o nível do mercúrio no reservatório está a uma altura $h_0 = 0,5$ m em relação ao fundo e a altura a_0 do cilindro de latão é de $0,3$ m. A essa temperatura, a densidade do latão é de $8,60$ g/cm³ e a densidade do mercúrio é de $13,55$ g/cm³. (a) Ache a que altura H_0 está o topo do bloco de latão em relação ao fundo do reservatório a 20°C (Fig. P.5). (b) O coeficiente de dilatação linear do aço é $1,1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$; o do latão é $1,9 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, e o coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio é $1,8 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$. Calcule a variação δH da altura H_0 (em mm) quando a temperatura sobe para 80°C .

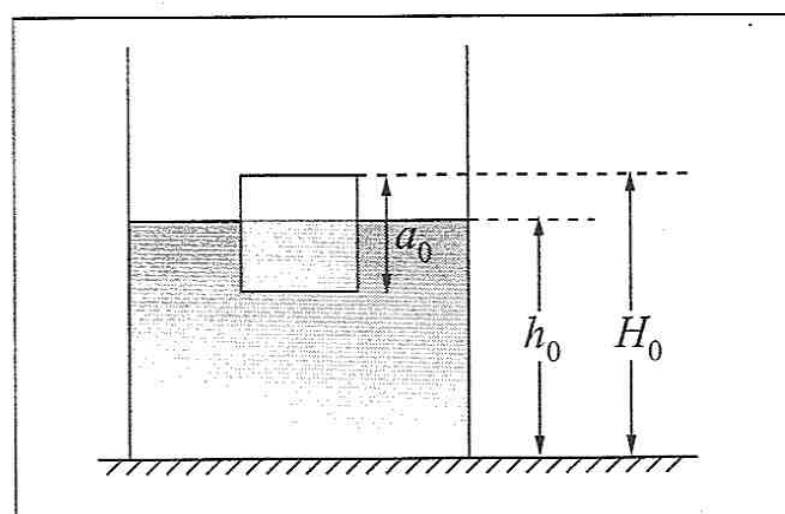


Figura P.5

(iii) Conforme já foi mencionado à pág. 177, qualquer processo suficientemente rápido para que não haja tempo de transferir calor (a transmissão de calor por condução e convecção é relativamente lenta num meio isolante como um gás) pode ser tratado como adiabático. *Exemplos:* a propagação de ondas sonoras; o aquecimento do ar quando bombeamos um pneu de bicicleta; a expansão do vapor entre a caldeira e o condensador de uma máquina a vapor; a expansão da mistura de gases aquecidos num motor de automóvel.

(iv) A *experiência de Joule de expansão livre*: Joule realizou a experiência da expansão livre, ilustrada na pág. 178, com o sistema todo imerso num calorímetro de água com paredes adiabáticas. Como vimos à pág. 179, tem-se $W_{i \rightarrow f} = 0$ neste caso (o volume do sistema total não se altera, de modo que não há trabalho externo realizado). Logo, a (8.7.7) dá

$$\Delta U = 0$$

(8.7.8)

ou seja, a energia do gás não varia neste processo adiabático irreversível.

Note que, neste exemplo, embora os estados inicial e final sejam de equilíbrio termodinâmico, podendo pois ser representados por pontos i e f num gráfico (P, V) , por exemplo (Fig. 8.12), os estados intermediários da expansão *não são estados de equilíbrio termodinâmico* (pág. 179), e não podem pois ser representados nesse gráfico.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO 8

1. Verifique se a estimativa de Joule para a variação de temperatura da água entre o sopé e o topo das cataratas de Niagara (pág. 169) era correta, calculando a máxima diferença de temperatura possível devida à queda da água. A altura de queda é de 50 m.
2. A capacidade térmica molar (a volume constante) de um sólido a baixas temperaturas, $T \ll T_D$, onde T_D é a temperatura de Debye (pág. 171), é dada por: $C_V \approx 464 (T/T_D)^3$ cal/mol.K. Para o NaCl, $T_D \approx 281$ K. (a) Calcule a capacidade térmica molar média $\bar{C}_V$ do NaCl entre $T_i = 10$ K e $T_f = 20$ K. (b) Calcule a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 kg de NaCl de 10 K para 20 K.
3. Um bloco de gelo de 1 tonelada, destacado de uma geleira, desliza por uma encosta de 10° de inclinação com velocidade constante de 0,1 m/s. O calor latente de fusão do gelo (quantidade de calor necessária para liquefação por unidade de massa) é de 80 cal/g. Calcule a quantidade de gelo que se derrete por minuto em consequência do atrito.
4. A *constante solar*, quantidade de energia solar que chega à Terra por unidade de tempo e área, acima da atmosfera e para um elemento de área perpendicular à direção dos raios solares, é de $1,36$ kW/m². Para um elemento de área cuja normal faz um ângulo θ com a direção dos raios solares, o fluxo de energia varia com $\cos \theta$. (a) Calcule a quantidade total de energia solar que chega à Terra por dia. *Sugestão:* Para um elemento de superfície dS , leve em conta a interpretação de $dS \cos \theta$ como projeção sobre um plano (Capítulo 1, problema 8). (b) Sabe-se que $\approx 23\%$ da energia solar incidente sobre a água vão produzir evaporação. O calor latente de vaporização da água à temperatura ambiente (quantidade de calor necessária para vaporizá-la por unidade de massa) é ≈ 590 cal/g. Sabendo que $\approx 71\%$ da superfície da Terra são cobertos por oceanos, calcule a profundidade da camada de água dos oceanos que seria evaporada por dia pela energia solar que chega à Terra.

5. Um calorímetro de alumínio de 250 g contém 0,5 l de água a 20°C, inicialmente em equilíbrio. Coloca-se dentro do calorímetro um bloco de gelo de 100 g. Calcule a temperatura final do sistema. O calor específico do alumínio é 0,21 cal/g°C e o calor latente de fusão do gelo é de 80 cal/g (durante o processo de fusão, o gelo permanece a 0°C).
6. Um calorímetro de latão de 200 g contém 250 g de água a 30°C, inicialmente em equilíbrio. Quando 150 g de álcool etílico a 15°C são despejadas dentro do calorímetro, a temperatura de equilíbrio atingida é de 26,3°C. O calor específico do latão é 0,09 cal/g. Calcule o calor específico do álcool etílico.
7. Um calorímetro de capacidade térmica igual a 50 cal/g contém uma mistura de 100 g de água e 100 g de gelo, em equilíbrio térmico. Mergulha-se nele um aquecedor elétrico de capacidade térmica desprezível, pelo qual se faz passar uma corrente, com potência P constante. Após 5 minutos, o calorímetro contém água a 39,7°C. O calor latente de fusão é 80 cal/g. Qual é a potência (em W) do aquecedor?

8. O calor específico de um fluido pode ser medido com o auxílio de um calorímetro de fluxo (Fig. P.1). O fluido atravessa o calorímetro num escoamento estacionário, com vazão de massa V_m (massa por unidade de tempo) constante. Penetrando à temperatura T_i , o fluido passa por um aquecedor elétrico de potência P constante e emerge com temperatura T_f (fig.), em regime estacionário. Numa experiência com benzeno, tem-se $V_m = 5$ g/s, $P = 200$ W, $T_i = 15^\circ\text{C}$ e $T_f = 38,3^\circ\text{C}$. Determine o calor específico do benzeno.

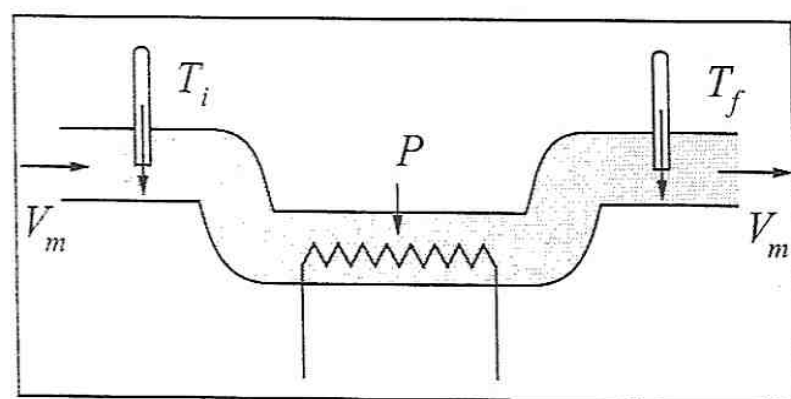


Figura P.1

9. Num dos experimentos originais de Joule (pág. 174), o trabalho era produzido pela queda de uma massa de 26,3 kg de uma altura de 1,60 m, repetida 20 vezes. O equivalente em água da massa da água e do calorímetro que a continha era de 6,32 kg e a variação de temperatura medida foi de 0,313°C. Que valor para o equivalente mecânico da caloria resulta destes dados experimentais?
10. A uma temperatura ambiente de 27°C, uma bala de chumbo de 10 g, com uma velocidade de 300 m/s, penetra num pêndulo balístico de massa igual a 200 g e fica retida nele. Se a energia cinética dissipada pela bala fosse totalmente gasta em aquecê-la, daria para derreter uma parte dela? Em caso afirmativo, quantas gramas? O calor específico do chumbo é 0,031 cal/g°C, sua temperatura de fusão é de 327°C e o calor latente de fusão é 5,85 cal/g.
11. Uma barra de secção transversal constante de 1 cm² de área tem 15 cm de comprimento, dos quais 5 cm de alumínio e 10 cm de cobre. A extremidade de alumínio está em contato com um reservatório térmico a 100°C, e a de cobre com outro, a 0°C. A condutividade térmica do alumínio é 0,48 cal/s.cm.°C e a do cobre é 0,92 cal/s.cm.°C. (a) Qual é a temperatura da barra na junção entre o alumínio e o cobre? (b) Se o reservatório térmico a 0°C é uma mistura de água com gelo fundente, qual é a massa de gelo que se derrete por hora? O calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g.
12. Uma barra metálica retilínea de secção homogênea é formada de três segmentos de materiais diferentes, de comprimentos l_1 , l_2 e l_3 , e condutividades térmicas k_1 , k_2 e k_3 , respectivamente. Qual é a condutividade térmica k da barra como um todo (ou seja, de uma barra equivalente de um único material e comprimento $l_1 + l_2 + l_3$)?

13. Duas esferas metálicas concêntricas, de raios r_1 e $r_2 > r_1$, são mantidas respectivamente às temperaturas T_1 e T_2 , e estão separadas por uma camada de material homogêneo de condutividade térmica k (Fig. P.2). Calcule a taxa de transmissão de calor por unidade de tempo através dessa camada. *Sugestão:* Considere uma superfície esférica concêntrica intermediária de raio r ($r_1 < r < r_2$) e escreva a lei de condução do calor através dessa superfície. Integre depois em relação a r , de $r = r_1$ até $r = r_2$.

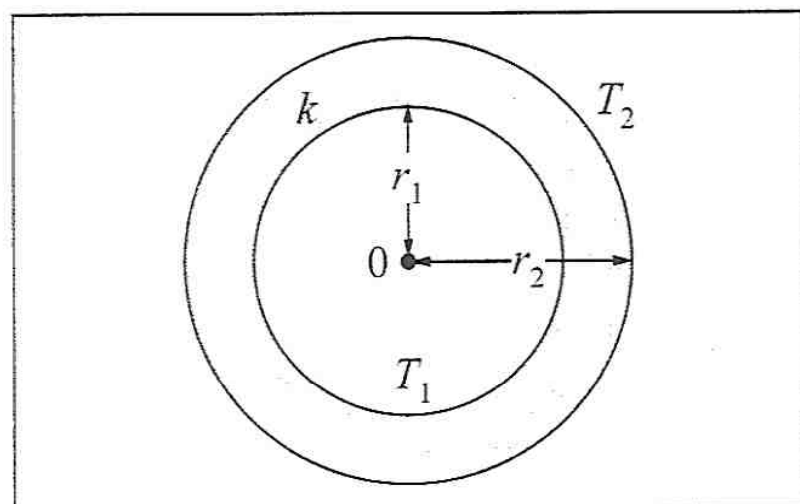


Figura P.2

14. Generalize o resultado de Problema 13 ao caso da condução do calor através de uma camada de material de condutividade térmica k entre dois cilindros concêntricos de raios ρ_1 e $\rho_2 > \rho_1$ e de comprimento $l \gg \rho_2$, de modo que se possam desprezar efeitos das extremidades. (a) Calcule a taxa de transmissão de calor por unidade de tempo através da camada. (b) Aplique o resultado a uma garrafa térmica cilíndrica, com $\rho_1 = 5$ cm, $\rho_2 = 5,5$ cm e $l = 20$ cm, com uma camada de ar entre as paredes interna e externa. A condutividade térmica do ar é de $5,7 \times 10^{-5}$ cal/s.cm.°C. A garrafa contém café inicialmente a 100°C e a temperatura externa é de 25°C . Quanto tempo demora para que o café esfrie até a temperatura ambiente?
15. Uma chaleira de alumínio contendo água em ebulição, a 100°C , está sobre uma chama. O raio do fundo da chaleira é de 7,5 cm e sua espessura é de 2 mm. A condutividade térmica do alumínio é 0,49 cal/s.cm.°C. A chaleira vaporiza 1 l de água em 5 min. O calor de vaporização da água a 100°C é de 540 cal/g. A que temperatura está o fundo da chaleira? Despreze as perdas pelas superfícies laterais.
16. Num país frio, a temperatura sobre a superfície de um lago caiu a -10°C e começa a formar-se uma camada de gelo sobre o lago. A água sob o gelo permanece a 0°C : o gelo flutua sobre ela e a camada de espessura crescente em formação serve como isolante térmico, levando ao crescimento gradual de novas camadas de cima para baixo. (a) Exprima a espessura l da camada de gelo formada, decorrido um tempo t do início do processo de congelamento, como função da condutividade térmica k do gelo, da sua densidade ρ e calor latente de fusão L , bem como da diferença de temperatura ΔT entre a água e a atmosfera acima do lago. *Sugestão:* Considere a agregação de uma camada de espessura dx à camada já existente, de espessura x , e integre em relação a x . (b) No exemplo acima, calcule a espessura da camada de gelo 1 h após iniciar-se o congelamento, sabendo que $k = 4 \times 10^{-3}$ cal/s.cm.°C, $\rho = 0,92$ g/cm³ e $L = 80$ cal/g.
17. À pressão atmosférica, a vaporização completa de 1 l de água a 100°C gera $1,671$ m³ de vapor de água. O calor latente de vaporização da água a esta temperatura é 539,6 cal/g. (a) Quanto trabalho é realizado pela expansão do vapor no processo de vaporização de 1 l de água? (b) Qual é a variação de energia interna do sistema nesse processo?
18. Um fluido homogêneo pode passar de um estado inicial i a um estado final f no plano (P, V) através de dois caminhos diferentes, representados por iaf e ibf no diagrama indicador (Fig. P.3). A diferença de energia interna entre os estados inicial e final é $U_f - U_i = 50$ J. O trabalho realizado pelo sistema na passagem de i para b é de 100 J. O trabalho realizado pelo sistema quando descreve o ciclo $(iafbi)$ é de 200 J. A partir destes dados,

determine, em magnitude e sinal: (a) a quantidade de calor $Q_{(ibf)}$, associada ao caminho ibf ; (b) o trabalho $W_{i \rightarrow f}$; (c) a quantidade de calor $Q_{(iaf)}$ associada ao caminho iaf ; (d) Se o sistema regressa do estado final ao estado inicial seguindo a diagonal fci do retângulo (Fig.), o trabalho $W_{(fci)}$ e a quantidade de calor $Q_{(fci)}$ associados a esse caminho.

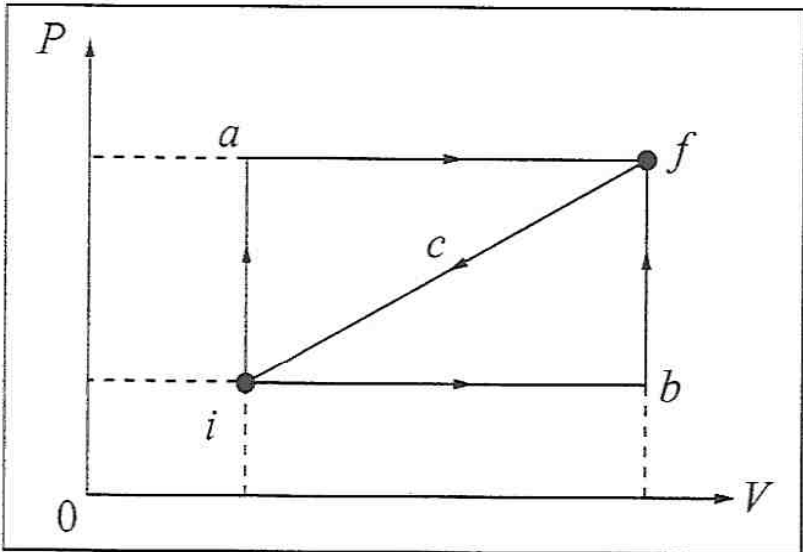


Figura P.3

19. O diagrama indicador da Fig. P.4, onde a pressão é medida em bar e o volume em l, está associado com um ciclo descrito por um fluido homogêneo. Sejam W , Q e ΔU respectivamente o trabalho, quantidade de calor e variação de energia interna do sistema associados com cada etapa do ciclo e com o ciclo completo, cujos valores (em J) devem ser preenchidos na tabela abaixo.

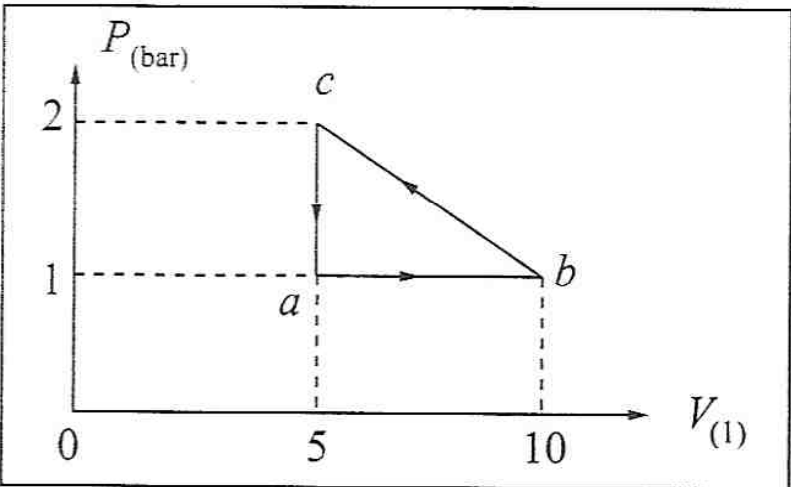


Figura P.4

Etapa	W (J)	Q (J)	ΔU (J)
ab		800	
bc			
ca			-100
Ciclo ($abca$)			

Complete a tabela, preenchendo todas as lacunas.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO 9

- O tubo de vidro de um barômetro de mercúrio tem secção reta de 1 cm^2 e 90 cm de altura acima da superfície livre do reservatório de mercúrio. Num dia em que a temperatura ambiente é de 20°C e a pressão atmosférica verdadeira é de 750 mm/Hg, a altura da coluna barométrica é de 735 mm. Calcule a quantidade de ar (em moles) aprisionada no espaço acima da coluna de mercúrio.
- Dois recipientes fechados de mesma capacidade, igual a 1 l, estão ligados um ao outro por um tubo capilar de volume desprezível. Os recipientes contêm oxigênio, inicialmente à temperatura de 25°C e pressão de 1 atm. (a) Quantas gramas de O_2 estão contidas nos recipientes? (b) Aquece-se um dos recipientes até a temperatura de 100°C , mantendo o outro a 25°C . Qual é o novo valor da pressão? (c) Quantas gramas de O_2 passam de um lado para o outro? Despreze a condução de calor através do capilar.
- Um recipiente de paredes adiabáticas é munido de um pistão adiabático móvel, de massa desprezível e 200 cm^2 de área, sobre o qual está colocado um peso de 10 kg. A pressão externa é de 1 atm. O recipiente contém 3 l de gás hélio, para o qual $C_V = \frac{3}{2}R$, à temperatura de 20°C . (a) Qual é a densidade inicial do gás? Faz-se funcionar um aquecedor elétrico interno ao recipiente, que eleva a temperatura do gás, gradualmente, até 70°C . (b) Qual é o volume final ocupado pelo gás? (c) Qual é o trabalho realizado pelo gás? (d) Qual é a variação de energia interna do gás? (e) Quanto calor é fornecido ao gás?
- Um mol de um gás ideal, com $\gamma = 7/5$, está contido num recipiente, inicialmente a 1 atm e 27°C . O gás é, sucessivamente: (i) comprimido isobaricamente até $3/4$ do volume inicial V_0 ; (ii) aquecido, a volume constante, até voltar à temperatura inicial; (iii) expandido a pressão constante até voltar ao volume inicial; (iv) resfriado, a volume constante, até voltar à pressão inicial. (a) Desenhe o diagrama P - V associado; (b) Calcule o trabalho total realizado pelo gás; (c) Calcule o calor total fornecido ao gás nas etapas (i) e (ii); (d) Calcule as temperaturas máxima e mínima atingidas; (e) Calcule a variação de energia interna no processo (i) + (ii).
- Um mol de um gás ideal, contido num recipiente munido de um pistão móvel, inicialmente a 20°C , se expande isotermicamente até que seu volume aumenta de 50%. A seguir, é contraído, mantendo a pressão constante, até voltar ao volume inicial. Finalmente, é aquecido, a volume constante, até voltar à temperatura inicial. (a) Desenhe o diagrama P - V associado; (b) Calcule o trabalho total realizado pelo gás neste processo.
- 0,1 mol de um gás ideal, com $C_V = \frac{3}{2}R$, descreve o ciclo representado na Fig. P.1 no plano (P, T) . (a) Represente o ciclo no plano (P, T) , indicando P (em atm) e V (em l) associados aos pontos A, B e C. (b) Calcule ΔW , ΔQ e ΔU para os processos AB, BC, CA e o ciclo.

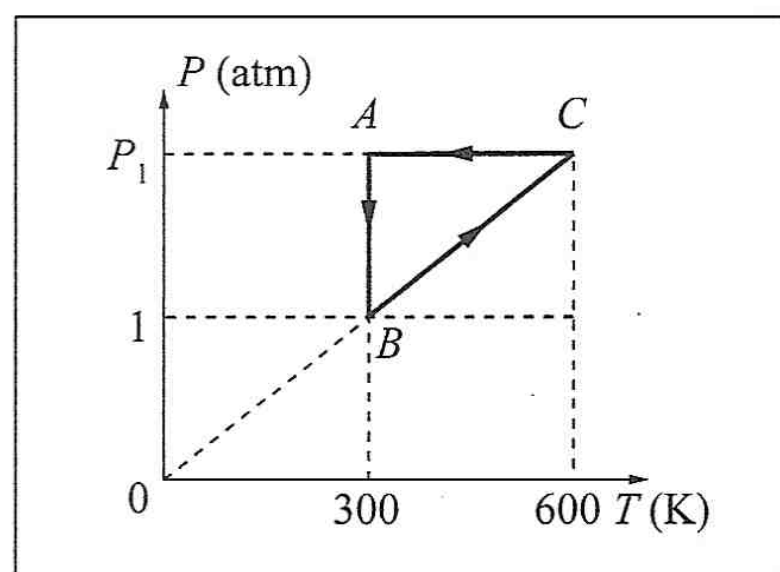


Figura P.1

7. 1 g de gás hélio, com $C_V = \frac{3}{2}R$, inicialmente nas condições NTP, é submetida aos seguintes processos: (i) Expansão isotérmica até o dobro do volume inicial; (ii) Aquecimento a volume constante, absorvendo 50 cal; (iii) Compressão isotérmica, até voltar ao volume inicial. (a) Represente os processos no plano (P, V) , indicando P (em atm), V (em l) e T (em K) associado a cada ponto. (b) Calcule ΔU e ΔW para os processos (i), (ii) e (iii).
8. Um mol de um gás ideal descreve o ciclo ABCDA representado na Fig. P.2 no plano (P, V) , onde $T = T_1$ e $T = T_2$ são isotermas. Calcule o trabalho total associado ao ciclo, em função de P_0 , V_0 , T_1 e T_2 .

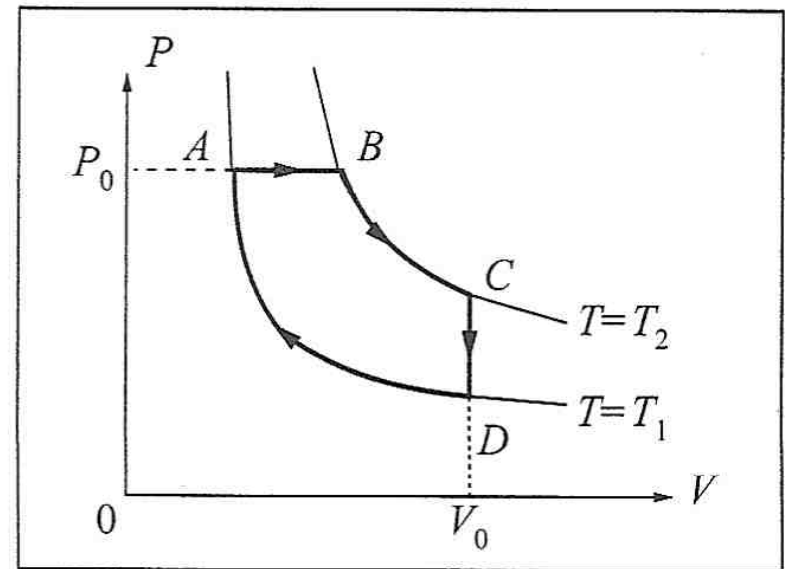


Figura P.2

9. Um mol de gás hélio, com $C_V = \frac{3}{2}R$, inicialmente a 10 atm e 0°C , sofre uma expansão adiabática reversível até atingir a pressão atmosférica, como primeiro estágio num processo de liquefação do gás. (a) Calcule a temperatura final (em $^\circ\text{C}$); (b) Calcule o trabalho realizado pelo gás na expansão.
10. 1 l de H_2 (para o qual $\gamma = 7/5$), à pressão de 1 atm e temperatura de 27°C , é comprimido adiabaticamente até o volume de 0,5 l e depois resfriado, a volume constante, até voltar à pressão inicial. Finalmente, por expansão isobárica, volta à situação inicial. (a) Represente o processo no plano (P, V) , indicando P (atm), V (l) e T (K) para cada vértice do diagrama. (b) Calcule o trabalho total realizado; (c) Calcule ΔU e ΔQ para cada etapa.
11. Um mol de um gás ideal, com $C_V = \frac{3}{2}R$, a 17°C , tem sua pressão reduzida à metade por um dos quatro processos seguintes: (i) a volume constante; (ii) isotermicamente; (iii) adiabaticamente; (iv) por expansão livre. Para um volume inicial V_i , calcule, para cada um dos quatro processos, o volume e a temperatura finais, ΔW e ΔU .
12. No método de Rüchhardt para medir $\gamma = C_P/C_V$ do ar, usa-se um grande frasco com um gargalo cilíndrico estreito de raio a , aberto para a atmosfera ($p_0 =$ pressão atmosférica), no qual se ajusta uma bolinha metálica de raio a e massa m . Na posição de equilíbrio O da bolinha, o volume de ar abaixo dela no frasco é V (Fig. P.3). (a) Calcule a força restauradora sobre a bolinha quando ela é empurrada de uma distância x para baixo a partir do equilíbrio, o movimento sendo suficientemente rápido para que o processo seja adiabático. Mostre que a bolinha executa um movimento harmônico simples e calcule o período τ em função de a , m , V , p_0 e γ . (b) Numa

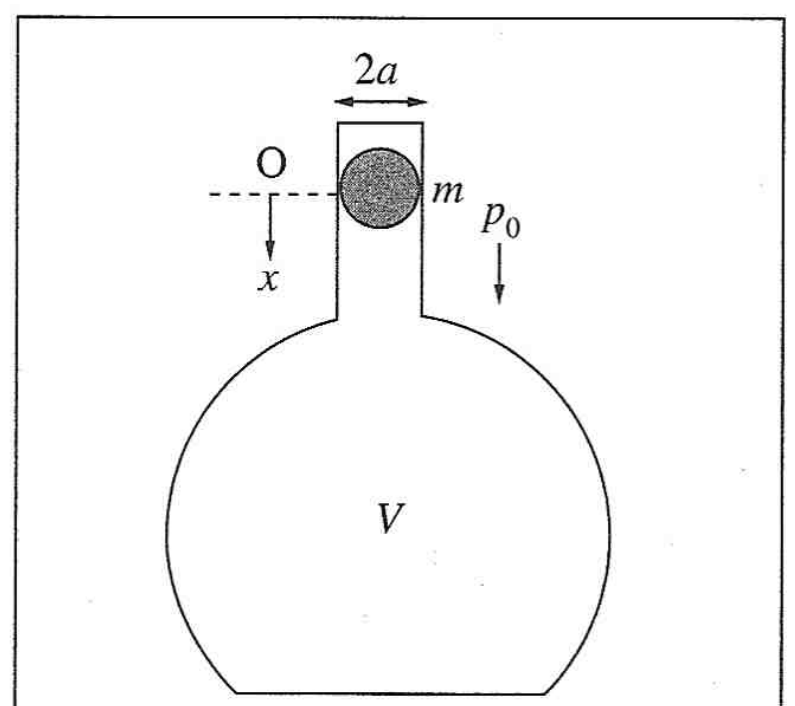


Figura P.3

experiência em que $a = 0,5$ cm, $m = 10$ g, $V = 5$ l, $p_0 = 1$ atm, o período observado é $\tau = 1,5$ s. Determine o valor correspondente de γ para o ar.

13. Um mol de um gás ideal, partindo das condições NTP, sofre: (i) uma compressão isotérmica até um volume de 5 l, seguida de (ii) uma expansão adiabática até retornar ao volume inicial, atingindo uma pressão final de 0,55 atm. (a) Calcule P ao fim da etapa (i) e T ao fim de (ii). (b) Calcule C_P e C_V , para este gás; (c) Calcule a variação total de energia interna; (d) Calcule o trabalho total realizado.

$$\Delta S^R \text{ (universo)} = \Delta S^R \text{ (gás)} + \Delta S^R \text{ (vizinhança)} = 0$$

(10.9.10)

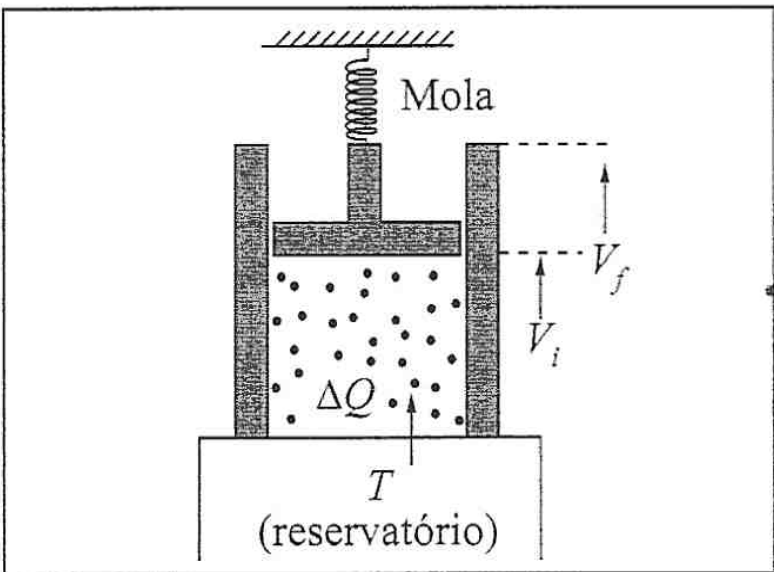


Figura 10.21 — Expansão reversível

O trabalho $W_{i \rightarrow f}$ na expansão reversível pode em princípio ser utilizado para levantar um peso ou para comprimir uma mola (Fig. 10.21), onde fica armazenado sob a forma de energia potencial e pode ser reconvertido em trabalho mecânico.

No processo irreversível de expansão livre, não há troca de calor com a vizinhança, de modo que ($I =$ irreversível)

$$\Delta S^I \text{ (vizinhança)} = 0$$

(10.9.11)

ao passo que

$$\Delta S^I \text{ (gás)} = \Delta S^R \text{ (gás)} = nR \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$$

(10.9.12)

pela (10.8.3). Logo,

$$\Delta S^I \text{ (universo)} = \Delta S^R \text{ (gás)} + \Delta S^I \text{ (vizinhança)} = \Delta S^R \text{ (gás)} > 0$$

(10.9.13)

e não é realizado trabalho na expansão livre ($W_{i \rightarrow f} = 0$).

Logo, no caso irreversível, é desperdiçada uma quantidade de trabalho [cf. (10.9.9), (10.9.12)]

$$W_{i \rightarrow f} = \Delta Q = T \Delta S^I \text{ (universo)}$$

(10.9.14)

que poderia ter sido utilizada se a transformação tivesse sido efetuada de forma reversível. O aumento de entropia do universo no processo irreversível reflete uma degradação de energia.

Considerações análogas se aplicam a outros processos irreversíveis. Na condução de calor, quando dois corpos em contato térmico equilibram sua temperatura, está havendo degradação de energia, pois poderíamos utilizar a diferença de temperatura para acionar um motor térmico, cujo rendimento seria máximo no caso reversível (máquina de Carnot). No caso de atrito, a dissipação de energia mecânica pela conversão em calor é óbvia.

Esta é a conexão entre a 2.ª lei da termodinâmica e os esforços no sentido de evitar o desperdício de energia (questão (v) da Seção 10.1).

No Capítulo 12, discutiremos a interpretação microscópica da entropia, que permite compreender de forma mais aprofundada a conexão entre a 2.ª lei da termodinâmica e o problema da “seta do tempo”.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO 10

1. Demonstre que duas adiabáticas nunca podem se cortar. *Sugestão:* Supondo que isto fosse possível, complete um ciclo com uma isoterma e mostre que a 2.ª lei da termodinâmica seria violada se um tal ciclo existisse.
2. Uma usina termoeletrica moderna opera com vapor de água superaquecido, a temperaturas da ordem de 500°C, e é resfriada com água de rio, tipicamente a 20°C. Devido a inúmeros tipos de perdas, a eficiência máxima que se consegue atingir na prática é da ordem de 40%. Que fração da eficiência máxima idealmente possível para esses valores isto representa?

3. Chama-se *coeficiente de desempenho* K de um refrigerador a razão Q_2/W , onde Q_2 é a quantidade de calor removida da fonte fria (congelador) e W o trabalho fornecido pelo compressor, por ciclo de refrigeração. (a) Para um refrigerador de Carnot ideal, exprima K em função das temperaturas T_1 e T_2 das fontes quente e fria, respectivamente. (b) Exprima K em função da eficiência da máquina de Carnot obtida operando o refrigerador em sentido inverso. (c) Um dado refrigerador doméstico tem coeficiente de desempenho 40% do ideal; o motor do compressor tem 220W de potência e o congelador é mantido a -13°C . Para uma temperatura ambiente de 27°C , qual é a quantidade de calor removida do congelador, em 15 min de funcionamento do motor? Que quantidade de gelo ela permitiria formar, partindo de água a uma temperatura próxima de 0°C ? O calor latente de fusão do gelo é 80 cal/g.

4. Um mol de um gás ideal diatômico ($\gamma = 7/5$) descreve o ciclo ABCDA (Fig. P.1), onde P é medido em bar e V em l. (a) Calcule a temperatura nos vértices. (b) Calcule a eficiência de um motor térmico operando segundo esse ciclo. (c) Compare o resultado (b) com a eficiência máxima ideal associada às temperaturas extremas do ciclo.

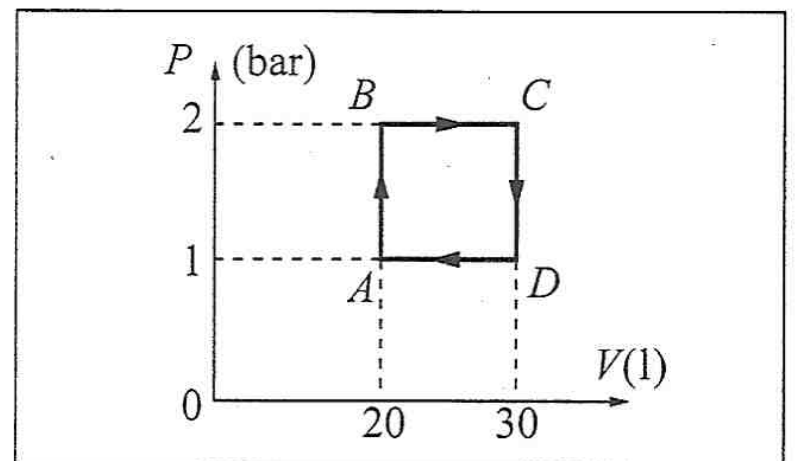


Figura P.1

5. Um gás ideal com $\gamma = 5/3$ sofre uma expansão isotérmica em que seu volume aumenta de 50%, seguida de uma contração isobárica até o volume inicial e de aquecimento, a volume constante, até a temperatura inicial. (a) Calcule o rendimento deste ciclo. (b) Compare o resultado com o rendimento de um ciclo de Carnot que opere entre as mesmas temperaturas extremas.

6. Um gás ideal de coeficiente adiabático γ é submetido ao ciclo ABCA da Fig. P.2, onde AB é um segmento de reta. (a) Calcule o rendimento. (b) Mostre que ele é menor do que o rendimento de um ciclo de Carnot operando entre as mesmas temperaturas extremas.

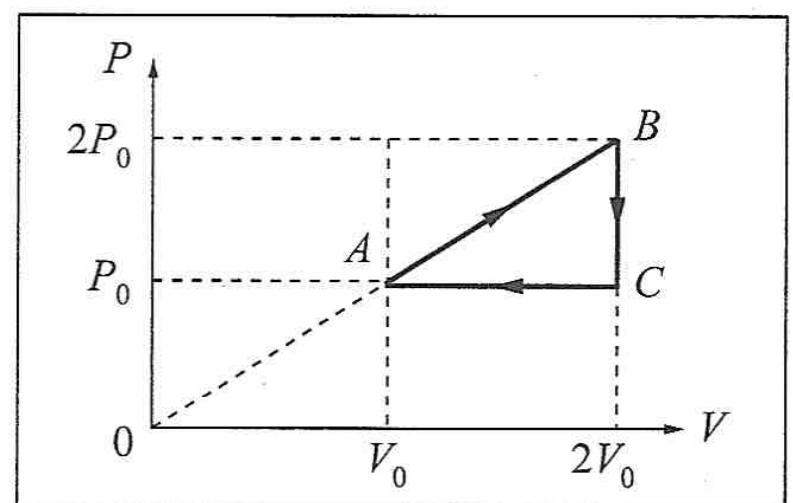


Figura P.2

7. Numa máquina térmica, o agente é um gás ideal de coeficiente adiabático γ , que executa o ciclo da Fig. P.3, onde BC é uma adiabática e CA uma isoterma. (a) Calcule o rendimento em função de r e γ . (b) Exprima o resultado em função da razão $\rho = T_1/T_2$ entre as temperaturas extremas. (c) Para $\gamma = 1,4$ e $r = 2$, qual é a razão entre o rendimento obtido e o rendimento de um ciclo de Carnot que opere entre T_1 e T_2 ?

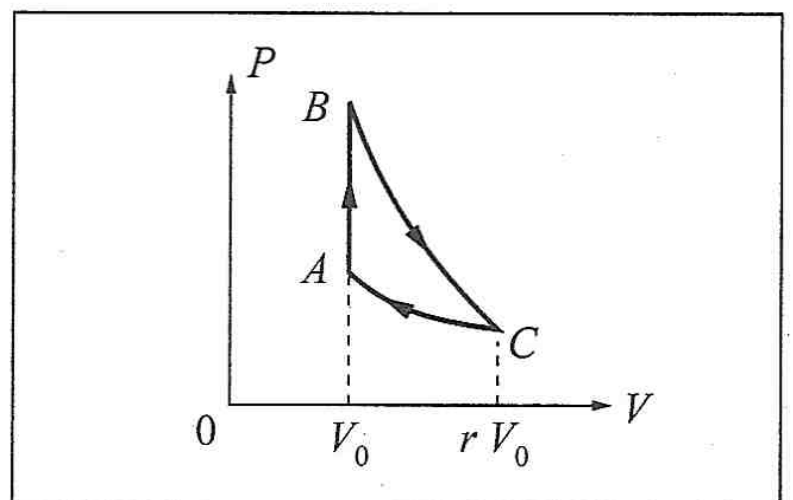


Figura P.3

8. A Fig. P.4, onde AB e CD são adiabáticas, representa o *ciclo de Otto*, esquematização idealizada do que ocorre num motor a gasolina de 4 tempos: AB representa a compressão rápida (adiabática) da mistura de ar com vapor de gasolina, de um volume inicial V_0 para V_0/r ($r \equiv$ taxa de compressão); BC representa o aquecimento a volume constante devido à ignição; CD é a expansão adiabática dos gases aquecidos, movendo o pistão; DA simboliza a queda de pressão associada à exaustão dos gases da combustão. A mistura é tratada como um gás ideal de coeficiente adiabático γ . (a) Mostre que o rendimento do ciclo é dado por

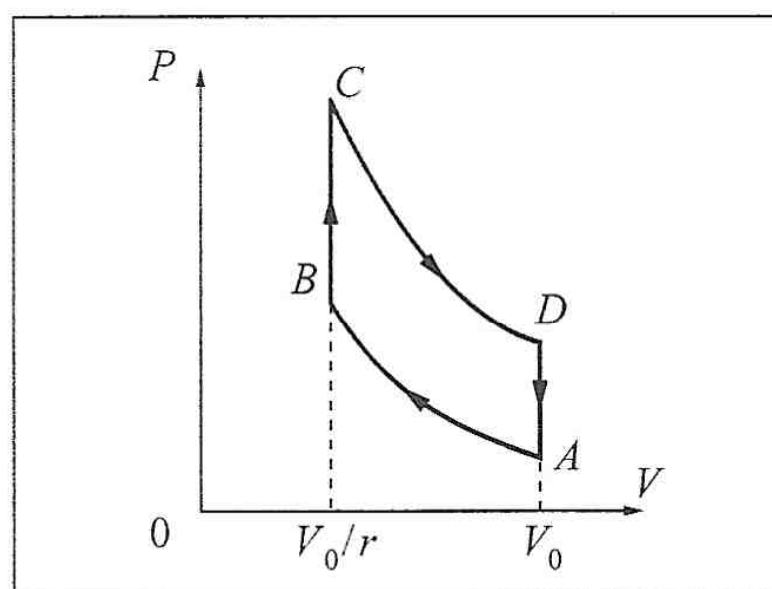


Figura P.4

$$\eta = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = 1 - \left(\frac{1}{r} \right)^{\gamma-1}$$

- (b) Calcule η para $\gamma = 1,4$ e $r = 10$ (compressão máxima permissível para evitar pré-ignição).

9. O *ciclo Diesel*, representado na Fig. P.5, onde AB e CD são adiabáticas, esquematiza o que ocorre num motor Diesel de 4 tempos. A diferença em relação ao ciclo de Otto (Problema 8) é que a taxa $r_c = V_0/V_1$ de compressão adiabática é maior, aquecendo mais o ar e permitindo que ele inflame o combustível injetado sem necessidade de uma centelha de ignição: isto ocorre a pressão constante, durante o trecho BC ; a taxa de expansão adiabática associada a CD é $r_e = V_0/V_2$ (a) Mostre que o rendimento do ciclo Diesel é dado por

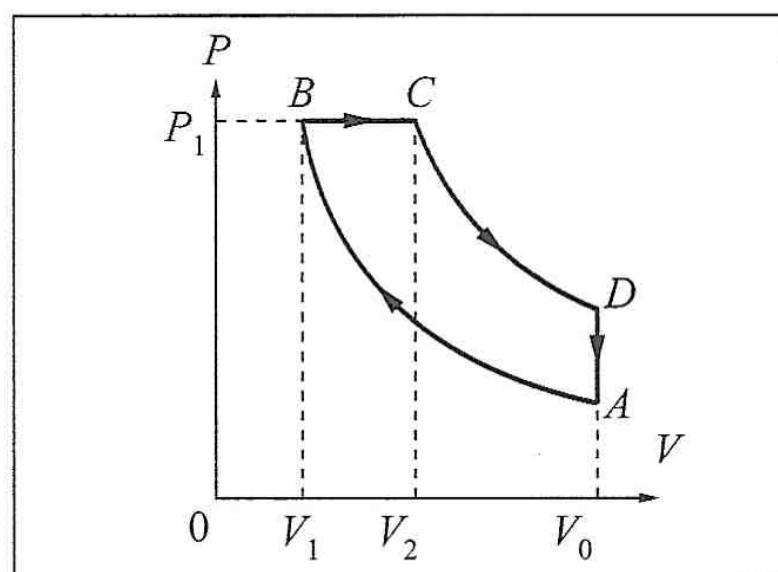


Figura P.5

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} \right) = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{1}{r_e} \right)^{\gamma} - \left(\frac{1}{r_c} \right)^{\gamma}}{(1/r_e) - (1/r_c)}$$

- (b) Calcule η para $r_c = 15$, $r_e = 5$, $\gamma = 1,4$. (c) Compare o resultado com o rendimento de um ciclo de Carnot entre as mesmas temperaturas extremas.

10. O *ciclo de Joule*, representado na Fig. P.6, onde AB e CD são adiabáticas, é uma idealização do que ocorre numa turbina a gás: BC e DA representam respectivamente aquecimento e resfriamento a pressão constante; $r = P_B/P_A$ é a taxa de compressão. (a) Mostre que o rendimento do ciclo de Joule é dado por

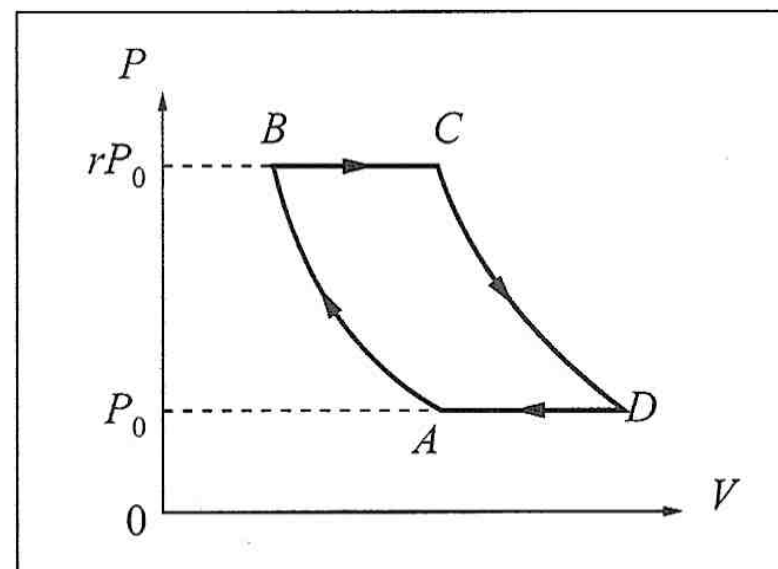


Figura P.6

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

- (b) Calcule o rendimento para $r = 10$.

11. O ciclo da Fig. P.7 é formado por isotermas de temperaturas T_1 (BC), T_3 (DE) e T_2 (FA), e pelas adiabáticas AB, CD e EF. As taxas de expansão isotérmicas V_C/V_B e V_E/V_D , são ambas iguais a r . Calcule o rendimento do ciclo e mostre que é menor do que o rendimento de um ciclo de Carnot entre as mesmas temperaturas extremas.

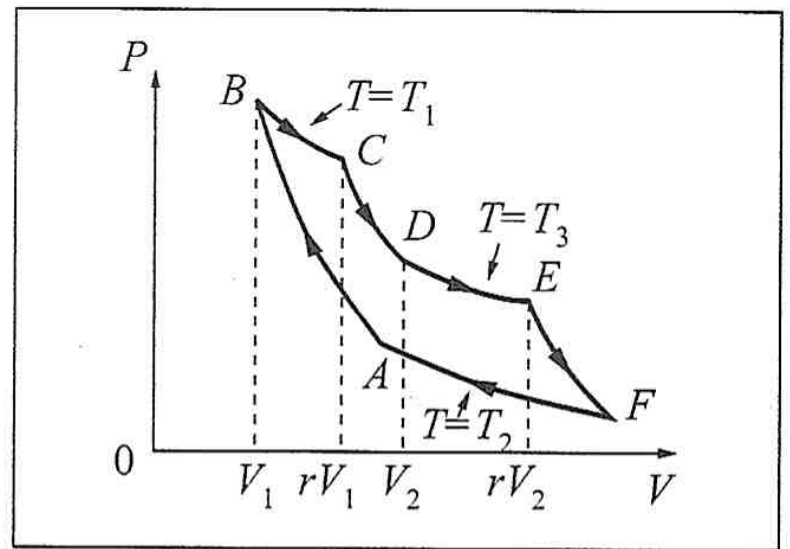


Figura P.7

12. A partir dos dados fornecidos no Problema 2 do Cap. 8, calcule a entropia molar s do NaCl a baixas temperaturas, $T \ll T_D$, onde T_D é a temperatura de Debye (para um sólido a baixas temperaturas, $C_V \approx C_P$). Tome $s = 0$ para $T = 0$.
13. Um fluido é submetido a um ciclo reversível. Se o ciclo é representado por um diagrama no plano (T, S) , onde S é a entropia do fluido, (a) Mostre que o trabalho associado ao ciclo é dado por $W = \oint TdS$, a área orientada por ele compreendida. (b) Represente um ciclo de Carnot para um gás ideal no plano (T, S) . Verifique o resultado da parte (a) neste caso. (c) Calcule o rendimento η do ciclo de Carnot da parte (b) diretamente a partir do diagrama (T, S) .
14. Um quilograma de gelo é removido de um congelador a -15°C e aquecido, até converter-se totalmente em vapor, a 100°C . Qual é a variação de entropia deste sistema? O calor específico do gelo é de $0,5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$; o calor latente de fusão do gelo é de $79,6 \text{ cal/g}$, e o calor latente de vaporização da água é de $539,6 \text{ cal/g}$.
15. Dois litros de ar ($\gamma = 1,4$), nas condições normais de temperatura e pressão, sofrem uma expansão isobárica até um volume 50% maior, seguida de um resfriamento a volume constante até baixar a pressão a $0,75 \text{ atm}$. De quanto varia a entropia deste sistema?
16. Um recipiente de paredes adiabáticas contém 2 l de água a 30°C . Coloca-se nele um bloco de 500 g de gelo. (a) Calcule a temperatura final do sistema. Tome 80 cal/g para o calor latente de fusão do gelo. (b) Calcule a variação de entropia do sistema.
17. Um litro de água, inicialmente a 100°C , é totalmente vaporizado: (a) em contato com um reservatório térmico a 100°C ; (b) em contato com um reservatório térmico a 200°C . O calor latente de vaporização da água é de $539,6 \text{ cal/g}$. Calcule a variação total de entropia do universo devida exclusivamente ao processo de vaporização, nos casos (a) e (b), e relacione os resultados com a reversibilidade ou não do processo.
18. Um cilindro contendo 1 kg de He a 150 atm , em equilíbrio térmico com o ambiente a 17°C , tem um pequeno vazamento através do qual o gás escapa para a atmosfera, até que o tanque se esvazia por completo do hélio. Qual é a variação de entropia do gás hélio? Que quantidade de trabalho é desperdiçada por este processo?
19. Uma chaleira contém 1 l de água em ebulição. Despeja-se toda a água numa piscina, que está à temperatura ambiente de 20°C . (a) De quanto variou a entropia da água da chaleira? (b) De quanto variou a entropia do universo?

20. Chama-se energia livre (de Helmholtz) de um sistema a função de estado $F = U - TS$, onde U é a energia interna e S a entropia do sistema. Esta função desempenha um papel importante nas transformações *isotérmicas*, tais como as que se produzem à temperatura ambiente. Mostre que, numa transformação isotérmica, (a) Se a transformação é reversível, o trabalho W realizado pelo sistema é igual ao decréscimo de F ; (b) No caso *irreversível*, W é menor que este decréscimo, de modo que o decréscimo de F dá a *energia máxima disponível* para realizar trabalho. (c) Mostre que, numa expansão livre, o decréscimo de F dá o trabalho desperdiçado.

covolume b é $\sim 0,15\%$ a $0,3\%$ do volume total, o que está de acordo com a estimativa anterior (pág. 242) de que o volume ocupado pelas moléculas num gás, nessas condições, é $\lesssim 10^{-3}$ do volume total. A partir do valor experimental de b , pode-se obter o diâmetro efetivo $d = 2r_0$ das moléculas do gás, com o auxílio da (11.7.4).

A magnitude a/v^2 da copressão (11.7.6), que mede o efeito das forças atrativas de coesão, é também da ordem de $0,3\%$ da pressão total para o ar nas condições NTP. Como ela é proporcional a v^{-2} ou seja, a P^2 (para T constante), é fácil ver que ela se torna uma fração considerável da pressão total para $P \sim 10^2$ atm; os desvios da lei dos gases perfeitos tornam-se grandes nestas condições.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO 11

1. Um feixe molecular de oxigênio, contendo 10^{10} moléculas/cm³ de velocidade média 500m/s, incide sobre uma placa segundo um ângulo de 30° com a normal à placa. Calcule a pressão exercida pelo feixe sobre a placa, supondo as colisões perfeitamente elásticas.
2. Um dos vácuos mais elevados que podem ser produzidos corresponde a uma pressão de 10^{-12} mm/Hg. Nesta pressão, a 27°C , quantas moléculas de ar por cm³ ainda permanecem?
3. Um gás é submetido a uma expansão isotérmica reversível num recipiente cilíndrico munido de um pistão de área A e massa M . O pistão desloca-se na direção x com velocidade constante u . Tem-se $u \ll v_{\text{qm}}$ e $M \gg m$, onde v_{qm} é a velocidade quadrática média das moléculas, cuja massa é m . Suponha as colisões das moléculas com o pistão perfeitamente elásticas num referencial que se move com o pistão. (a) Mostre que, no referencial do laboratório (onde o cilindro está em repouso), as colisões com o pistão não são perfeitamente elásticas, calculando a perda de energia cinética de uma molécula que colide com o pistão com componente x da velocidade $v_x > 0$ (no resultado, despreze u em confronto com v_x). (b) Some sobre todas as moléculas e mostre que a perda total de energia cinética é igual ao trabalho realizado na expansão do gás.
4. Calcule o número médio de moléculas por cm³ e o espaçamento médio entre as moléculas: (a) em água líquida, (b) em vapor de água a 1 atm e 100°C (tratado como gás ideal). (c) No caso (b), calcule a velocidade média quadrática das moléculas.
5. Um kg de ar é composto de 232 g de oxigênio, 755 g de nitrogênio e 13 g de outros gases. Para ar nas condições normais de temperatura e pressão, calcule as pressões parciais exercidas pelo oxigênio e pelo nitrogênio.
6. Um recipiente de 10 l contém 7 g de nitrogênio gasoso, à pressão de 4,8 atm e à temperatura de 1.800 K. A essa temperatura, uma porcentagem x das moléculas de nitrogênio encontram-se dissociadas em átomos. Calcule x .
7. A temperatura na superfície da Lua chega a atingir 127°C . Calcule a velocidade quadrática média do hidrogênio molecular a essa temperatura e compare-a com a velocidade de escape da superfície da Lua. Que conclusão pode ser tirada dessa comparação?
8. A velocidade do som num gás (que pode ser tratado como ideal) é 0,683 vezes a velocidade quadrática média das moléculas do gás nas mesmas condições de temperatura e pressão. Qual é o número de átomos por molécula do gás?

9. Considere uma partícula esférica de $0,5 \mu\text{m}$ de raio e densidade $1,2 \text{ g/cm}^3$, como as que foram utilizadas por Jean Perrin em experiências para determinação do número de Avogadro. Uma tal partícula, em suspensão num líquido, adquire um movimento de agitação térmica que satisfaz à lei de equipartição da energia. De acordo com esta lei, qual seria a velocidade quadrática média da partícula em suspensão à temperatura de 27°C ?
10. (a) Calcule o expoente adiabático $\gamma = C_p/C_v$ para um gás diatômico a uma temperatura elevada, tal que uma fração x das moléculas se encontram dissociadas em átomos. Verifique que o resultado se reduz aos casos limites esperados quando não há dissociação ou quando ela é total. (b) Se o valor observado é $\gamma = 1,5$, qual é a porcentagem de dissociação x ?
11. Coloca-se 1 g de hidrogênio e 1 g de hélio num recipiente de 10 l, a uma temperatura de 27°C . (a) Qual é a pressão? (b) Calcule os calores específicos molares C_v e C_p , bem como $\gamma = C_p/C_v$, para a mistura gasosa.
12. Um gás é formado de moléculas diatômicas de momento de inércia $I = 6 \times 10^{-39} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$. Calcule a velocidade angular de rotação quadrática média de uma molécula do gás em torno de um eixo perpendicular à linha que une os centros dos dois átomos, nas condições normais de temperatura e pressão.
13. O livre percurso médio em hélio gasoso a 1 atm e 15°C é de $1,862 \times 10^{-5} \text{ cm}$. (a) Calcule o diâmetro efetivo de um átomo de hélio. (b) Estime o número médio de colisões por segundo que um átomo de hélio sofre nestas condições.
14. O diâmetro efetivo da molécula de CO_2 é $\approx 4,59 \times 10^{-8} \text{ cm}$. Qual é o livre percurso médio de uma molécula de CO_2 para uma densidade de $4,91 \text{ kg/m}^3$?
15. Sejam P_C , v_C e T_C as constantes críticas de um gás de Van der Waals (pág. 263). Mostre que, se exprimirmos a equação de Van der Waals em termos das *variáveis reduzidas* $\pi = P/P_C$, $\omega = v/v_C$ e $\tau = T/T_C$, ela assume uma forma *universal*, ou seja, a mesma para todas as substâncias.
16. Calcule o trabalho realizado por um gás de Van der Waals numa expansão isotérmica à temperatura T , passando do volume molar v_i para v_f .
17. A partir da tabela da pág. 265, tratando o hélio gasoso como um gás de Van der Waals, calcule o diâmetro efetivo de um átomo de hélio. Compare o resultado com aquele obtido no Problema 13. Discuta a razão da concordância ou discrepância.
18. A pressão crítica e a temperatura crítica observadas para o CO_2 são, respectivamente, $P_C = 73,0 \text{ atm}$ e $T_C = 304,1 \text{ K}$. (a) Calcule as constantes de Van der Waals a e b para o CO_2 . (b) Calcule a densidade crítica ρ_C para o CO_2 pela equação de Van der Waals e compare-a com o valor observado de $0,46 \text{ g/cm}^3$. (c) Se o CO_2 fosse um gás ideal, a que pressão seria preciso submeter 1 mol de CO_2 para que ocupasse o volume de 0,5 l à temperatura de 0°C ? (d) Qual seria a pressão necessária na situação (c) considerando o CO_2 como um gás de Van der Waals? (e) Em (d), que fração da pressão total é devida à interação entre as moléculas do gás?

PROBLEMAS DO CAPÍTULO 12

1. Ao nível do mar, a composição volumétrica da atmosfera é: 12% de oxigênio e 78% de nitrogênio (há 1% de outros gases, principalmente argônio). Suponha (embora não seja uma boa aproximação!) que a temperatura do ar não variasse com a altitude, e que seu valor fosse de 10°C . Neste caso, qual seria a composição volumétrica da atmosfera a 10km de altitude? (Tome 1 unidade de massa atômica = $1,66 \times 10^{-27}$ kg).
2. Considere um gás hipotético para o qual a função $F(v)$ de distribuição de velocidades [definida na Seção 12.2(d)] tivesse a forma indicada na Fig. P.1. Calcule em função de v_0 : (a) A constante de normalização A (fig.). (b) Os valores de $\langle v \rangle$, v_p e v_{qm} para esta distribuição.

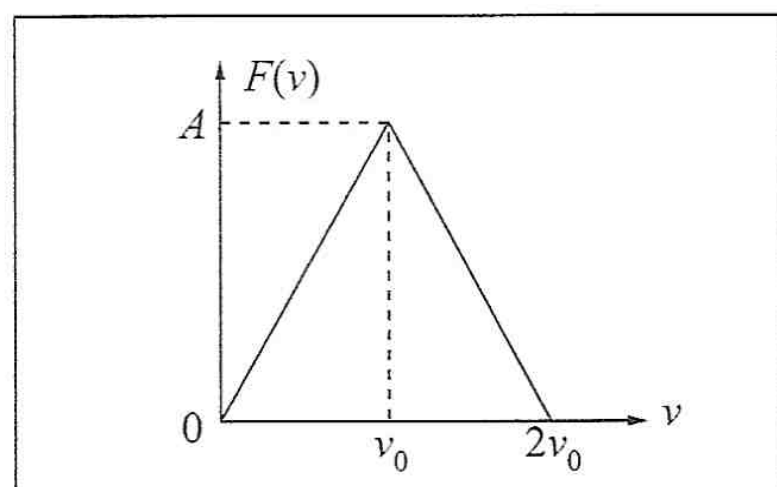


Figura P.1

3. Para um gás ideal em equilíbrio térmico, qual é a fração das moléculas cujas velocidades diferem em menos de 1% da velocidade mais provável v_p ? Note que (Fig. 12.7) podemos tomar $\Delta v \approx dv$ neste caso.
4. Para um gás ideal em equilíbrio térmico, calcule o valor médio da magnitude de um componente da velocidade de uma molécula (numa direção qualquer). Compare-o com $\langle v \rangle$.
5. Calcule a razão R entre $\langle \frac{1}{v} \rangle$ e $\frac{1}{\langle v \rangle}$ para um gás ideal em equilíbrio térmico.
6. Ache: (a) a função de distribuição em energia $F(E)$, tal que $F(E) dE$ é a fração das moléculas com energia entre E e $E + dE$, para um gás ideal em equilíbrio térmico à temperatura T . A partir dela, calcule: (b) A energia média $\langle E \rangle$, comparando o resultado com $\frac{1}{2} m v_{qm}^2$; (c) a energia mais provável E_p , comparando o resultado com $\frac{1}{2} m v_p^2$.
7. Num feixe molecular, a densidade de corrente (número médio de moléculas por unidade de área e tempo), para moléculas com velocidades entre v e $v + dv$, é dada pela (12.3.3). Calcule v_p e E_p para as moléculas do feixe, comparando os resultados com os valores correspondentes v'_p e E'_p dentro do forno do qual o feixe é extraído.
8. Um gás ideal, cujas moléculas têm massa m , está em equilíbrio térmico à temperatura T dentro de uma ultracentrífuga de raio R que gira com velocidade angular ω . (a) Ache a razão $\rho(R)/\rho(0)$ da densidade do gás junto às paredes à densidade no eixo da ultracentrífuga (Sugestão: use o conceito de "potencial centrífugo" discutido na Seção 1.4). (b) Calcule o valor numérico dessa razão se o gás é oxigênio, $T = 300$ K, $R = 10$ cm e a frequência de rotação é 10^3 rps.
9. Considere um gás ideal de N moléculas, em equilíbrio num recipiente de volume V . Calcule: (a) a probabilidade p_1 de encontrar todas as moléculas concentradas num volume $V/3$ (macroestado 1); (b) a probabilidade p_2 de encontrá-las todas num volume $2V/3$ (macroestado 2); (c) A probabilidade p de encontrar $N/3$ moléculas em $V/3$ e as demais no volume restante; (d) a diferença de entropia $\Delta S = S_2 - S_1$ entre os estados 1 e 2; (e) os valores numéricos de p_1 , p_2 e p para $N = 9$.