Lista de exercícios 5 - Física do Calor - Turmas: 2023142 e 2023147

E-mail: monitoriafc2023@gmail.com.

26 de Maio de 2023

1. Um motor a Diesel produz 2200 J de trabalho mecânico e rejeita 4300 J de calor em cada ciclo.
   a) Qual deve ser a quantidade de calor a ser fornecida para a máquina em cada ciclo?
   Solução: O trabalho total realizado por uma máquina térmica é dado por

$$W = |Q_H| - |Q_C|. \tag{1}$$

Logo, a quantidade de calor fornecida para a máquina é

$$|Q_H| = W + |Q_C| \implies |Q_H| = 2200 \text{ J} + 4300 \text{ J} = 6500 \text{ J}. \tag{2}$$

b) Qual é a eficiência térmica da máquina?
Solução: A eficiência para uma máquina térmica é dada por

$$e = \frac{W}{|Q_H|}. \tag{3}$$

Assim,

$$e = \frac{2200 \text{ J}}{6500 \text{ J}} \approx 0.34 = 34\%. \tag{4}$$

2. Um motor a gasolina produz uma potência igual a 180 kW. Sua eficiência é 28%.
   a) Qual é a quantidade de calor fornecida para a máquina por segundo?
   Solução: A potência é calculada através de

$$pot = \frac{W}{\Delta t}, \tag{5}$$

onde Δt é o intervalo de tempo gasto para a máquina realizar o trabalho W. Assim,

$$W = (180 \text{ kW})(1s) = (180 \times 10^3 \text{ W})(1s). \tag{6}$$

Mas, 1 watt = 1 J/s. Logo,

$$W = 180 \times 10^3 \text{ J}. \tag{7}$$

Da equação (3), temos então que a quantidade de calor fornecida para a máquina por segundo é:

$$|Q_H| = \frac{W}{e} = \frac{180 \times 10^3 \text{ J}}{0.28} = 6.43 \times 10^5 \text{ J}. \tag{8}$$

b) Qual é o calor rejeitado pela máquina por segundo?
Solução: Temos, diretamente da equação (1), que

$$|Q_C| = |Q_H| - W = 6.43 \times 10^5 \text{ J} - 1.80 \times 10^5 \text{ J} = 4.63 \times 10^5 \text{ J}. \tag{9}$$

3. Um refrigerador de Carnot opera entre dois reservatórios de temperaturas de 320 K e 270 K.
   a) Se em cada ciclo o refrigerador recebe 415 J de calor do reservatório a 270 K, qual é a quantidade de calor em joules transferida para o reservatório a 320 K?
   Solução: A transferência de calor na máquina de Carnot é dada por

$$\frac{Q_C}{Q_H} = -\frac{T_C}{T_H}. \tag{10}$$

Assim, a quantidade Q_H de calor transferida para o reservatório é

$$Q_H = -\frac{T_H}{T_C} Q_C = -\left(\frac{320\ \text{K}}{270\ \text{K}}\right)(415\ \text{J}) = -492\ \text{J}. \tag{11}$$

b) Se o refrigerador executa 165 ciclos em cada minuto, qual é a potência necessária para operar o refrigerador?
Solução: Vamos, primeiramente, calcular o trabalho realizado em cada ciclo. Temos,

$$|W| = |Q_H| - |Q_C| = 492\ \text{J} - 415\ \text{J} = 77\ \text{J}. \tag{12}$$

Logo, em 165 ciclos, temos $|W| = (77\ \text{J})(165) = 12705$ J. Assim, a potência, pela equação (5) será igual a

$$pot = \frac{12705\ \text{J}}{60\ \text{s}} \approx 212\ \text{W}. \tag{13}$$

c) Qual é o coeficiente de desempenho do refrigerador?
Solução: O coeficiente de desempenho é calculado através da equação

$$K = \frac{|Q_C|}{|W|}. \tag{14}$$

O coeficiente, então, será

$$K = \frac{415\ \text{J}}{77\ \text{J}} \approx 5.4\ \text{J}. \tag{15}$$

4. Um bloco de gelo de $15,0$ Kg a 0 °C se liquefaz a 0 °C dentro de uma sala grande com uma temperatura de 20 °C. Considere o gelo e a sala um sistema isolado e suponha que a sala seja grande o bastante para que a variação de temperatura possa ser desprezada.
a) A liquefação do gelo é reversível ou irreversível? Explique usando raciocínio físico simples e sem recorrer a nenhuma equação.
Solução: Irreversível, pois nunca aconteceria do calor fluir espontaneamente da água para a sala resultando em um congelamento da água.
b) Calcule a variação de entropia total do sistema durante esse processo. Comente se esse resultado é compatível ou não com a sua resposta à parte a).
Solução: A variação da entropia total é será

$$\Delta S = \Delta S_{gelo} + \Delta S_{sala}. \tag{16}$$

Tanto o gelo quanto a sala estão em temperatura constante e, nesse caso, $\Delta S = Q/T$. O calor de transição de fase de fusão do gelo é dado por $Q = mL_f$. Por conservação de energia, o calor da sala será $Q = -mL_f$. Para o gelo, $L_f = 334 \times 10^3$ J/kg. Logo,

$$\Delta S = \frac{mL_f}{T_{gelo}} - \frac{mL_f}{T_{sala}} = \frac{(15.0\ \text{kg})(334 \times 10^3\ \text{J/kg})}{273\ \text{K}} - \frac{15.0\ \text{kg})(334 \times 10^3\ \text{J/kg})}{293\ \text{K}} \approx 1250\ \text{J/K}. \tag{17}$$

Esse resultado é consistente com a letra a), pois $\Delta S > 0$ para processos irreversíveis.

5. A Figura 1 mostra um ciclo reversível a que é submetido $1,00$ mol de um gás monoatômico ideal. O volume $V_c = 8,00\ V_b$. O processo bc é uma expansão adiabática, com $p_b = 10,0$ atm e $V_b = 1,00 \times 10^{-3}$ m^3. Para o ciclo, determine
a) A energia fornecida ao gás em forma de calor.
Solução: A energia é adicionada em forma de calor durante parte do processo de a até b, que ocorre a volume constante V_b. Assim, $Q_{adi} = nC_V \Delta T$. Como o gás é monoatômico ideal, $C_V = 3R/2$ e pela lei dos gases ideais, temos que

$$\Delta T = \frac{\Delta pV}{nR} = \frac{1}{nR}(p_b - p_a)V_b. \tag{18}$$

Assim,

$$Q_{adi} = \frac{3}{2}(p_b - p_a)V_b. \tag{19}$$

Como V_b e p_b foram dados, devemos encontrar p_a. No entanto, a pressão em a e em c é a mesma e os pontos b e c estão conectados por um processo adiabático. Assim, vale a relação $p_c V_c{}^\gamma = p_b V_b{}^\gamma$. Como o gás é monoatômico, $\gamma = 5/3$. Portanto,

$$p_a = p_c = \left(\frac{V_b}{V_c}\right)^\gamma p_b = \left(\frac{1}{8.00}\right)^{5/3} (1.013 \times 10^6 \text{ Pa}) = 3.167 \times 10^4 \text{ Pa}. \tag{20}$$

A energia adicionada como calor é

$$Q_{adi} = \frac{3}{2}(1.013 \times 10^6 \text{ Pa} - 3.167 \times 10^4 \text{ Pa})(1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 1.47 \times 10^3 \text{ J}. \tag{21}$$

b) A energia liberada pelo gás em forma de calor.
Solução: A energia é liberada pelo gás durante parte do processo do ponto c ao ponto a, que ocorre a pressão constante, ou seja, $Q_{lib} = nC_P\Delta T$. Da relação dos gases ideais, temos que

$$\Delta T = \frac{P\Delta V}{nR} = \frac{1}{nR}(V_a - V_c)p_a. \tag{22}$$

Portanto,

$$Q_{lib} = \frac{5}{2}(V_a - V_c)p_a. \tag{23}$$

Note que $V_a - V_c = V_a - 8.00\ V_a = -7.00\ V_a$. Temos então,

$$Q_{lib} = \frac{5}{2}(-7.00)(1,00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)(3.167 \times 10^4 \text{ Pa}) = -5.54 \times 10^2 \text{ J}. \tag{24}$$

c) O trabalho líquido realizado pelo gás.
Solução: A variação de energia interna em um ciclo fechado é zero. Logo, pela primeira lei,

$$W = Q = Q_{adi} + Q_{lib} = 1.47 \times 10^3 \text{ J} - 5.54 \times 10^2 \text{ J} = 9.18 \times 10^2 \text{ J}. \tag{25}$$

d) A eficiência do ciclo.
Solução: A eficiência é

$$e = \frac{W}{Q_{adi}} = \frac{9.18 \times 10^2 \text{ J}}{1.47 \times 10^3 \text{ J}} = 0.624 = 62.4\%. \tag{26}$$

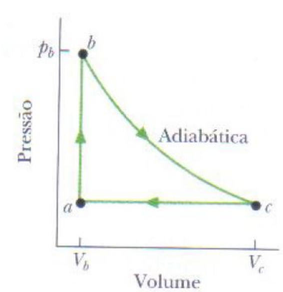

Figura 1: Problema 5.

6. Um gás ideal (1,0 mol) é a substância de trabalho em uma máquina térmica que descreve o ciclo mostrado na Figura 2. Os processos BC e DA são reversíveis e adiabáticos.
a) O gás é monoatômico, diatômico ou poliatômico?
Solução: Como o processo $D \to A$ é adiabático, podemos escrever

$$p_D V_D{}^\gamma = p_A V_A{}^\gamma \implies \frac{p_0}{32}(8\ V_0)^\gamma = p_0 V_0{}^\gamma. \tag{27}$$

Assim, temos que

$$8^\gamma = 32 \implies \gamma = 5/3. \tag{28}$$

Logo, o gás é monoatômico.
b) Qual é a eficiência da máquina?
Solução: O calor que entra na máquina é absorvido durante o processo $A \to B$, ou seja,

$$Q_H = nC_P\Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)(T_B - T_A). \tag{29}$$

Note que, utilizando a equação dos gases ideais, temos que a temperatura no ponto A é

$$T_A = \frac{p_0V_0}{nR}. \tag{30}$$

No ponto B,

$$T_B = 2\frac{p_0V_0}{nR}, \tag{31}$$

ou seja, $T_B = 2T_A$. Assim, da equação (29), temos

$$Q_H = nC_P\Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)T_A\left(\frac{T_B}{T_A} - 1\right) = nRT_A\left(\frac{5}{2}\right)(2-1) = p_0V_0\left(\frac{5}{2}\right). \tag{32}$$

O calor que sai da máquina é liberado durante o processo $C \to D$. Logo,

$$Q_C = nC_P\Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)(T_D - T_C). \tag{33}$$

As temperaturas nos pontos C e D são

$$T_C = \frac{p_0V_0}{2nR}, \tag{34}$$

$$T_D = \frac{p_0V_0}{4nR}, \tag{35}$$

o que implica que $T_C = 2T_D$. Assim, da equação (33) e usando o fato que $T_D = \frac{1}{4}T_A$, temos

$$Q_C = nC_P\Delta T = n\left(\frac{5}{2}R\right)T_D\left(1 - \frac{T_C}{T_D}\right) = nRT_D\left(\frac{5}{2}\right)(1-2) = -\frac{1}{4}p_0V_0\left(\frac{5}{2}\right). \tag{36}$$

Temos, finalmente, que

$$e = 1 - \left|\frac{Q_C}{Q_H}\right| = 0.75 = 75\%. \tag{37}$$

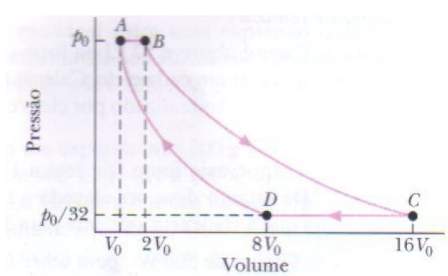

Figura 2: Problema 6.

7. A Figura 3 mostra uma máquina de Carnot que trabalha entre as temperaturas $T_1 = 400$ K e $T_2 = 150$ K e alimenta um refrigerador de Carnot que trabalha entre as temperaturas $T_3 = 325$ K e $T_4 = 225$ K. Qual é a razão Q_3/Q_1?

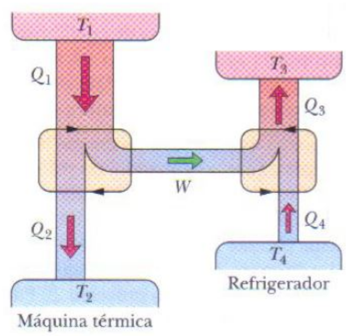

Figura 3: Problema 7.

Solução: A eficiência da máquina térmica é definida como $e = W/Q_1$. Mas, a eficiência da máquina de carnot é

$$e_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \tag{38}$$

Podemos então escrever,

$$\frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \tag{39}$$

O coeficiente de desempenho do refrigerador é definido como $K = Q_4/W$. No entanto, o coeficiente de desempenho para um refrigerador de carnot é

$$K_c = \frac{T_4}{T_3 - T_4}. \tag{40}$$

Podemos então escrever

$$\frac{Q_4}{W} = \frac{T_4}{T_3 - T_4}. \tag{41}$$

Note que $Q_4 = Q_3 - W$, então

$$\frac{Q_3 - W}{W} = \frac{T_4}{T_3 - T_4}. \tag{42}$$

O trabalho realizado pela máquina é o mesmo utilizado pelo refrigerador. Assim, resolvendo equação (39) para W, temos que $W = (T_1 - T_2)Q_1/T_1$. Substituindo W na equação (42), temos

$$\frac{T_4}{T_3 - T_4} = \frac{Q_3 T_1}{(T_1 - T_2)Q_1} - 1. \tag{43}$$

Resolvendo para Q_3/Q_1,

$$\frac{Q_3}{Q_1} = \left(\frac{T_4}{T_3 - T_4} + 1\right)\left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{T_3}{T_3 - T_4}\right)\left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) = \frac{1 - (T_2/T_1)}{1 - (T_4/T_3)}. \tag{44}$$

Substituindo os valores para as temperaturas, encontramos $Q_3/Q_1 = 2.03$.

8. 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?
Solução: A variação da entropia é calculada a partir de

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T}. \tag{45}$$

Para a água, inicialmente em forma do gelo, à $T = -20$ °C $= 253$ K até gelo a $T = 0$ °C $= 273$ K,

$$\Delta S = mc_{gelo} \int_{253}^{273} \frac{dT}{T} = mc_{gelo} \ln\left(\frac{273}{253}\right). \tag{46}$$

Do gelo à $T = 273$ K até água a $T = 273$ K,

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{mL_f}{273\ \mathrm{K}}. \tag{47}$$

Da água a $T = 273$ K até água a $T = 40\ ^\circ\mathrm{C} = 313$ K,

$$\Delta S = mc_{água} \int_{273}^{313} \frac{dT}{T} = mc_{água} \ln\left(\frac{313}{273}\right). \tag{48}$$

Logo, a variação da entropia total será a soma das variações das entropias de cada processo, ou seja,

$$\Delta S = m\left[c_{gelo}\ln\left(\frac{273}{253}\right) + \frac{L_f}{273\ \mathrm{K}} + c_{água}\ln\left(\frac{313}{273}\right)\right] = 1.18 \times 10^3\ \mathrm{J/K}. \tag{49}$$

9. 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 de entropia do gás?
Solução: Como V é constante, $W = 0$. Então, pela primeira lei, $dU = dQ = \frac{3}{2}nRdT$. Pela equação (45), temos

$$\int_{T_i}^{T_f} \frac{(3nR/2)dT}{T} = \frac{3}{2}nR\ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right) = \frac{3}{2}(1.00\ \mathrm{mol})\left(8.31\frac{J}{\mathrm{mol}\cdot \mathrm{K}}\right)\ln\left(\frac{400}{300}\right) = 3.59\ \mathrm{J/K}. \tag{50}$$

10. 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 $539,6$ cal/g. Calcule a variação total de entropia do sistema devido exclusivamente ao processo de vaporização nos casos a) e b) e relacione os resultados com a reversibilidade ou não do processo.
Solução: Podemos escrever a variação de entropia do sistema como

$$\Delta S_{sistema} = \Delta S_{reservatório} + \Delta S_{água}. \tag{51}$$

Como a água está a $T = 100 + 273 = 373$ K, a variação de entropia no seu processo de vaporização é

$$\Delta S_{água} = \frac{\Delta Q}{T} = 1447\frac{\mathrm{cal}}{K}. \tag{52}$$

Para encontrar a variação de entropia no reservatório basta efetuar cálculos similares. No caso a) a temperatura do reservatório é igual à temperatura da água e, portanto, fica claro que $\Delta S_{reservatório} = -\Delta S_{água}$ (Pois é o reservatório que cede calor a água, logo, a variação de entropia é negativa). Deste modo, $\Delta S_{sistema} = 0$ e o processo é reversível. No caso b), que é um processo irreversível, a variação de entropia do reservatório a $T = 200 + 273 = 473$ K será

$$\Delta S_{reservatório} = -1141\frac{\mathrm{cal}}{K}. \tag{53}$$

A variação de entropia do sistema será

$$\Delta S_{sistema} = 1447\frac{\mathrm{cal}}{K} - 1141\frac{\mathrm{cal}}{K} = 306\frac{\mathrm{cal}}{K}. \tag{54}$$

Referências

[1] D. Halliday, R. Resnick, and K. S. Krane. *Physics, Volume 2.* John Wiley & Sons, 2010.

[2] H. M. Nussenzveig. *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor*, volume 2. Editora Blucher, 2018.

[3] F. SEARS, M. ZEMANSKY, and I. Física. *Termodinâmica e Ondas. 12ª Edição.* Person, 2008.