Instituto Federal do Ceará – IFCE
Campus Itapipoca
Disciplina: Termodinâmica
Lista de Exercícios 03

Prof. Dr. F. A. Leandro Filho
Aluno(a): _____

Segunda Lei da Termodinâmica

Dados usuais, quando necessários: $R = 8{,}31\,\mathrm{J/(mol\,K)}$; $k_B = 1{,}38\cdot10^{-23}\,\mathrm{J/K}$; $c_{\text{água}} = 4{,}18\cdot10^{3}\,\mathrm{J/(kg\,K)}$; $L_f = 3{,}34\cdot10^{5}\,\mathrm{J/kg}$; $L_v = 2{,}26\cdot10^{6}\,\mathrm{J/kg}$. Considere reservatórios térmicos e processos quase estáticos quando isso for explicitado.

1. Enuncie os princípios de Kelvin–Planck e de Clausius para a segunda lei. Explique, em cada enunciado, qual processo é impossível.

2. Uma máquina térmica recebe calor Q_H de um reservatório quente, rejeita Q_C para um reservatório frio e realiza trabalho W. Escreva a conservação de energia para um ciclo e defina o rendimento térmico. Por que esse rendimento não pode ser igual a 100%?

3. Uma máquina recebe 2,4 kJ por ciclo de uma fonte a 600 K e rejeita 1,5 kJ para uma fonte a 300 K. Determine o trabalho por ciclo e o rendimento. Compare com o rendimento máximo possível entre essas temperaturas.

4. Uma usina térmica opera entre reservatórios a 800 K e 320 K. Calcule o rendimento de Carnot. Se a usina recebe $5{,}0\cdot10^{8}\,\mathrm{J}$ em um ciclo, determine o maior trabalho que poderia produzir e o calor mínimo rejeitado.

5. Um refrigerador retira 900 J de uma câmara fria e consome 300 J de trabalho por ciclo. Calcule seu coeficiente de desempenho (COP) e o calor cedido ao ambiente. Explique por que o COP pode ser maior que 1 sem violar a segunda lei.

6. Um refrigerador reversível opera entre 270 K e 300 K. Determine seu COP máximo. Quanto trabalho mínimo é necessário para retirar 1,0 kJ da região fria?

7. Um estudante afirma: “Se uma máquina recebe calor de uma única fonte, basta construir um mecanismo adequado para convertê-lo integralmente em trabalho em cada ciclo”. Avalie a afirmação com base na segunda lei e indique se ela viola Kelvin–Planck, Clausius ou ambos.

8. Classifique os processos como reversíveis ou irreversíveis e justifique: (a) expansão livre de um gás para o vácuo; (b) condução de calor entre corpos a temperaturas diferentes; (c) compressão quase estática sem atrito, seguida de retorno pelo mesmo caminho; (d) mistura espontânea de dois gases.

9. Explique por que a entropia é uma função de estado embora sua variação possa ser calculada usando um caminho reversível diferente do processo real. Escreva a relação que define dS para uma transferência reversível de calor.

Entropia

10. Um mol de gás ideal expande-se isotermicamente e de forma reversível de $V_i = 10\,\mathrm{L}$ para $V_f = 25\,\mathrm{L}$ a $300\,\mathrm{K}$. Calcule a variação de entropia do gás e o calor absorvido. O que ocorre com a entropia do reservatório que fornece esse calor?

11. Dois mols de gás ideal são aquecidos a volume constante de $300\,\mathrm{K}$ a $450\,\mathrm{K}$. Sendo $C_V = \frac{3}{2}R$, calcule ΔS do gás. Repita para um aquecimento a pressão constante, usando $C_P = \frac{5}{2}R$.

12. Uma barra de cobre de $0{,}80\,\mathrm{kg}$, com calor específico $385\,\mathrm{J/(kg\,K)}$, esfria de $400\,\mathrm{K}$ até $300\,\mathrm{K}$ em contato com um reservatório a $300\,\mathrm{K}$. Calcule a variação de entropia da barra, do reservatório e do conjunto. O processo é reversível?

13. $0{,}20\,\mathrm{kg}$ de gelo a $0\,^\circ\mathrm{C}$ funde completamente em contato com um reservatório a $10\,^\circ\mathrm{C}$. Calcule a variação de entropia do gelo e do reservatório e determine a variação de entropia total. Use $T_f = 273{,}15\,\mathrm{K}$ e $T_R = 283{,}15\,\mathrm{K}$.

14. Um recipiente termicamente isolado contém $0{,}50\,\mathrm{kg}$ de água a $80\,^\circ\mathrm{C}$ e $0{,}50\,\mathrm{kg}$ de água a $20\,^\circ\mathrm{C}$. Determine a temperatura final de equilíbrio e a variação de entropia total. Considere o calor específico constante.

15. Um gás ideal sofre expansão livre para o dobro do volume, partindo de um estado de equilíbrio. Determine Q, W e ΔU. Em seguida, calcule ΔS usando um caminho isotérmico reversível entre os mesmos estados e explique por que o resultado não é nulo.

16. Um sistema percorre um ciclo reversível e retorna ao estado inicial. Determine $\Delta S_{\text{sistema}}$ no ciclo. O calor líquido trocado precisa ser nulo? Relacione sua resposta à área no diagrama $p \times V$ e à segunda lei.

17. Dois corpos de mesma capacidade térmica C estão inicialmente a temperaturas absolutas T_1 e T_2, com $T_1 > T_2$, e são colocados em contato dentro de um invólucro isolado. Deduza a temperatura final e escreva uma expressão para a variação de entropia total. Mostre que ela é não negativa.

18. Uma máquina de Carnot opera entre 500 K e 250 K e recebe 1,2 kJ por ciclo. Determine o calor rejeitado, o trabalho produzido e as variações de entropia dos dois reservatórios. Verifique o balanço de entropia no ciclo.

19. Em uma descrição estatística, a entropia de Boltzmann é $S = k_B \ln \Omega$, em que Ω é o número de microestados compatíveis com um macroestado. Determine a diferença de entropia entre dois macroestados cujas multiplicidades são $\Omega_2 = 100\Omega_1$. Explique qual macroestado é mais provável se ambos tiverem a mesma energia.

20. Dois gases ideais diferentes, cada um com 1,0 mol, estão à mesma temperatura T em compartimentos iguais, separados por uma divisória. A divisória é removida e os gases se misturam sem alteração de temperatura. Calcule a variação de entropia de cada gás e a variação total. Por que a resposta seria diferente para gases idênticos?

21. Um mol de líquido vaporiza reversivelmente no ponto de ebulição normal, $T_b = 373\,\text{K}$. Sendo o calor latente molar de vaporização $L_v = 40{,}7\,\text{kJ/mol}$, calcule a variação de entropia do líquido e do vapor. Explique por que a variação de entropia do sistema é positiva.

Máquinas térmicas, Carnot e refrigeração

22. Uma máquina térmica recebe 1,8 kJ da fonte quente e rejeita 1,1 kJ à fonte fria em cada ciclo. Calcule o trabalho produzido e o rendimento.

23. Uma máquina recebe $Q_H = 4{,}0 \cdot 10^4\,\text{J}$ por ciclo e tem rendimento de 25%. Determine o trabalho por ciclo e o calor rejeitado.

24. Uma máquina térmica produz 750 J de trabalho por ciclo e rejeita 1,25 kJ à fonte fria. Determine o calor recebido da fonte quente e o rendimento.

25. Uma máquina de Carnot opera entre $T_H = 700\,\text{K}$ e $T_C = 350\,\text{K}$. Calcule seu rendimento máximo. Se receber 2,0 kJ por ciclo, determine o trabalho e o calor rejeitado.

26. Converta 127 °C e 27 °C para kelvins e determine o rendimento de Carnot entre essas fontes. Explique por que não se deve usar diretamente a razão entre temperaturas Celsius.

27. Uma máquina reversível tem rendimento de 40% e opera com fonte fria a 300 K. Determine a temperatura da fonte quente.

28. Uma máquina reversível opera entre uma fonte a 900 K e outra a 300 K. Que temperatura deve ter a fonte quente para que o rendimento aumente em 10 pontos percentuais, mantendo a fonte fria?

29. Uma máquina real opera entre 600 K e 300 K com rendimento igual a 60% do máximo de Carnot. Calcule o rendimento real e o trabalho produzido ao receber 5,0 kJ.

30. Um inventor afirma que sua máquina cíclica recebe 2,0 kJ de uma única fonte a 500 K e transforma tudo em trabalho. Identifique o enunciado da segunda lei violado e explique a impossibilidade.

31. Uma máquina opera entre reservatórios a 800 K e 400 K. Em um ciclo, recebe 1,6 kJ e produz 600 J de trabalho. Verifique se os dados são compatíveis com o limite de Carnot.

32. Em um ciclo de Carnot, a máquina recebe 900 J da fonte quente a 450 K. Determine a temperatura da fonte fria se o calor rejeitado for 600 J.

33. Uma máquina de Carnot opera entre T_C e $2T_C$. Determine seu rendimento em função de T_C e explique por que o resultado não depende do valor numérico de T_C.

34. Uma máquina reversível recebe $Q_H = 2{,}4\,\text{kJ}$ e tem rendimento de 50%. Determine a razão T_C/T_H e as variações de entropia dos reservatórios em um ciclo.

35. Uma usina recebe calor à taxa de 8,0 MW e opera entre 700 K e 300 K. Determine a potência máxima teórica e a potência real se o rendimento for 35%.

36. No diagrama $p \times V$ de uma máquina cíclica, o percurso é horário e delimita uma área de $2{,}5 \cdot 10^3$ J. Determine o trabalho líquido por ciclo e o calor líquido recebido. O que mudaria se o sentido fosse anti-horário?

37. Um ciclo de Carnot é composto por duas isotermas e duas adiabáticas reversíveis. Descreva a sequência das etapas de uma máquina térmica e indique em quais delas há troca de calor.

38. Em um ciclo de Carnot para gás ideal, compare as variações de energia interna nas etapas isotérmicas e adiabáticas. Em que etapas o gás recebe e rejeita calor?

39. Uma máquina cíclica recebe calor de duas fontes quentes e rejeita calor a uma fonte fria. Escreva o balanço de energia por ciclo e explique por que o rendimento depende da soma dos calores recebidos.

40. Duas máquinas térmicas operam entre os mesmos reservatórios. A máquina A é reversível e a máquina B é irreversível. Compare seus rendimentos e justifique a desigualdade.

41. Uma máquina absorve 500 J a 600 K e rejeita 350 J a 300 K por ciclo. Calcule a variação de entropia total dos reservatórios e classifique o ciclo como reversível, irreversível ou impossível.

42. Um refrigerador retira 1,2 kJ da câmara fria e recebe 400 J de trabalho. Calcule o COP e o calor liberado para o ambiente.

43. Um refrigerador tem COP igual a 3 e retira 900 J da região fria em cada ciclo. Determine o trabalho necessário e o calor transferido à região quente.

44. Um refrigerador de Carnot opera entre 260 K e 300 K. Calcule seu COP máximo. Quanto trabalho mínimo é necessário para retirar 2,0 kJ da câmara fria?

45. Uma bomba de calor reversível mantém uma sala a 295 K enquanto o ambiente está a 275 K. Determine o COP máximo de aquecimento e o trabalho mínimo para fornecer 5,0 kJ à sala.

46. Um refrigerador retira calor a uma taxa de 600 W e tem COP igual a 2,5. Determine a potência consumida e a taxa de calor rejeitada ao ambiente.

47. Uma geladeira retira $1{,}5 \cdot 10^6$ J de calor do interior e consome $5{,}0 \cdot 10^5$ J de energia elétrica durante certo intervalo. Determine o COP médio e o calor liberado à cozinha.

48. Explique por que uma geladeira ligada não resfria uma cozinha fechada quando sua porta permanece aberta. Considere também a energia elétrica fornecida ao compressor.

49. Uma máquina frigorífica transfere espontaneamente calor do reservatório frio para o quente sem receber trabalho. Qual princípio da segunda lei é violado? Descreva a alteração mínima necessária para tornar o processo possível.

50. Dois refrigeradores operam com a mesma temperatura interna, mas em cozinhas a temperaturas diferentes. Qual deles pode ter o maior COP de Carnot? Justifique sem substituir valores numéricos.

51. Uma bomba de calor fornece 12 kJ à fonte quente e absorve 9 kJ da fonte fria por ciclo. Determine o trabalho e o COP de aquecimento.

Variação de entropia e irreversibilidade

52. Diferencie transferência de calor reversível de calor trocado em um processo real. Por que ΔS do sistema não é, em geral, igual à integral de $\delta Q/T$ calculada ao longo do caminho real?

53. Um corpo de capacidade térmica constante C é aquecido reversivelmente de T_1 a T_2. Partindo da definição de entropia, obtenha uma expressão para ΔS e indique as unidades.

54. Uma peça de alumínio de 0,50 kg, com calor específico 900 J/(kg K), é aquecida reversivelmente de 280 K a 350 K. Calcule a variação de entropia.

55. Uma amostra de cobre de 1,0 kg esfria de 500 K a 300 K. Sendo $c = 385\,\mathrm{J/(kg\,K)}$, calcule sua variação de entropia.

56. Dois quilogramas de gelo fundem a 273 K. Use $L_f = 3{,}34 \cdot 10^5\ \mathrm{J/kg}$ para determinar a variação de entropia do gelo durante a fusão reversível.

57. Um quilograma de água vaporiza a 373 K. Use $L_v = 2{,}26 \cdot 10^6\ \mathrm{J/kg}$ e calcule a variação de entropia na mudança de fase reversível.

58. Uma massa de 0,40 kg de água a 350 K é colocada em contato com um reservatório a 300 K. Calcule a variação de entropia da água, do reservatório e do universo. Use $c = 4{,}18 \cdot 10^3\ \mathrm{J/(kg\,K)}$.

59. Misturam-se, em um recipiente isolado, 0,30 kg de água a 20 °C com 0,20 kg de água a 80 °C. Determine a temperatura final e a variação de entropia total.

60. Um mol de gás ideal é aquecido de 300 K a 600 K em um recipiente rígido. Calcule ΔS usando $C_V = \frac{3}{2}R$.

61. Dois mols de gás ideal são aquecidos de 250 K a 400 K sob pressão constante. Calcule ΔS usando $C_P = \frac{5}{2}R$.

62. Três mols de gás ideal expandem-se isotermicamente e reversivelmente a 350 K, de V_i para $4V_i$. Calcule a variação de entropia do gás.

63. Um mol de gás ideal é comprimido isotermicamente e reversivelmente a 300 K até que seu volume se reduza a um terço do inicial. Determine ΔS do gás e o calor trocado.

64. Um gás ideal se expande livremente no vácuo, em um recipiente isolado, de V_i para $3V_i$. Determine Q, W e ΔU. Em seguida, calcule ΔS usando um caminho isotérmico reversível equivalente.

65. Um gás ideal sofre expansão adiabática reversível. Determine a variação de entropia do gás e explique por que a temperatura pode mudar mesmo com $\Delta S = 0$.

66. Um sistema executa um ciclo reversível. Determine a variação de entropia do sistema e explique por que as somas separadas de calor recebido e rejeitado não precisam ser nulas.

67. Um sistema executa um ciclo irreversível entre dois estados e retorna ao estado inicial. Determine ΔS do sistema no ciclo e enuncie a desigualdade que deve ser satisfeita para o sistema mais o ambiente.

68. Dois reservatórios a 500 K e 300 K trocam irreversivelmente 1,0 kJ de calor, do quente para o frio. Calcule a variação de entropia total.

69. Uma parede separa duas salas com ar a temperaturas diferentes. Explique o sinal da taxa inicial de produção de entropia durante a condução de calor e indique quando essa taxa tende a zero.

70. Um bloco de 2,0 kg, com capacidade térmica específica 500 J/(kg K), resfria de 400 K a 300 K em contato com um reservatório a 300 K. Calcule a entropia gerada.

71. Uma quantidade de calor $Q = 2{,}0\,\text{kJ}$ é transferida de um reservatório a 500 K para outro a 250 K. Calcule as variações de entropia dos reservatórios e a entropia gerada.

72. Um corpo de capacidade térmica C passa de T para $2T$. Compare a variação de entropia com a transferência de calor dividida pela temperatura inicial. Explique por que essas grandezas não são iguais.

73. Um gás ideal passa do estado (T_i, V_i) ao estado (T_f, V_f). A partir de um caminho reversível isotérmico seguido de um processo isocórico, obtenha uma expressão para ΔS usando C_V.

74. Repita a questão anterior usando um caminho isobárico seguido de um processo isotérmico e mostre que a variação de entropia calculada independe do caminho escolhido.

75. Uma amostra de gás ideal vai de A a B por dois caminhos. Em um deles recebe 500 J de calor e realiza 200 J de trabalho. O outro caminho é irreversível. O que é possível afirmar sobre ΔU e ΔS nos dois caminhos?

76. Uma máquina de Carnot opera entre 600 K e 300 K e recebe 1,8 kJ da fonte quente. Calcule o calor rejeitado, o trabalho e as variações de entropia das fontes.

77. Um refrigerador real retira 2,0 kJ de uma câmara a 270 K e rejeita 2,8 kJ para a cozinha a 300 K. Calcule o trabalho e a variação de entropia total das fontes. O desempenho é compatível com a segunda lei?

78. Um sistema recebe calor de um reservatório a temperatura variável. Explique como calcular a variação de entropia do reservatório se sua capacidade térmica for constante e sua temperatura mudar de T_i para T_f.

79. Um processo transfere calor reversivelmente de uma fonte a T_H para outra a T_C. Determine a condição para que a variação total de entropia seja nula e interprete o resultado.

80. Uma máquina térmica cíclica recebe calor de duas fontes, a T_1 e T_2, e rejeita calor para uma fonte a T_C. Escreva a desigualdade de Clausius para esse ciclo e explique quando ocorre a igualdade.

81. Um gás ideal inicialmente ocupa uniformemente uma sala isolada. Imagine que, espontaneamente, passe a ocupar apenas um décimo do volume, sem troca de calor nem realização de trabalho. Determine ΔT e ΔS do gás e julgue se o processo pode ocorrer espontaneamente.

82. Uma amostra de gás ideal tem $C_V = \tfrac{3}{2}nR$ e sofre uma transformação em que a temperatura dobra e o volume quadruplica. Calcule ΔS e indique se o sinal depende do

número de mols.

83. Um processo real leva um sistema de A a B. Explique como usar um caminho reversível auxiliar para calcular ΔS, mesmo sem conhecer a transferência de calor real em cada etapa.

Interpretação estatística da entropia

84. Diferencie microestado e macroestado usando cinco partículas distribuídas entre as metades esquerda e direita de uma caixa. Dê um exemplo de cada descrição.

85. Cinco partículas distinguíveis podem ocupar dois lados de uma caixa. Quantos microestados existem no total? Quantos correspondem ao macroestado $(N_L, N_R) = (3, 2)$?

86. Oito partículas distinguíveis estão distribuídas entre duas regiões. Calcule as multiplicidades dos macroestados $(8, 0)$, $(6, 2)$ e $(4, 4)$ e identifique o mais provável.

87. Para N partículas distinguíveis em duas regiões, escreva a multiplicidade em função de N_L e N_R. Explique qual distribuição é mais provável quando as regiões são equivalentes.

88. Calcule a multiplicidade de um macroestado com 10 partículas em que 7 estão à esquerda e 3 à direita. Compare-a com a multiplicidade do macroestado inverso.

89. Um macroestado tem $\Omega = 1$ microestado e outro tem $\Omega = 64$. Calcule a diferença entre suas entropias de Boltzmann.

90. Dois macroestados de mesma energia têm multiplicidades $\Omega_A = 24$ e $\Omega_B = 2400$. Determine a razão entre suas probabilidades e a diferença de entropia.

91. Um sistema tem 10^{20} microestados acessíveis. Escreva sua entropia estatística em função de k_B e determine a variação de entropia se o número de microestados aumentar por um fator 10.

92. Uma moeda equilibrada é lançada 20 vezes. Compare a multiplicidade dos resultados com 10 caras e 10 coroas com a multiplicidade do resultado de 20 caras. Expresse as multiplicidades por coeficientes binomiais e interprete.

93. Seis partículas distinguíveis podem ocupar três caixas. Quantos microestados existem? Quantos correspondem à distribuição $(2, 2, 2)$, desconsiderando a ordem dentro de cada caixa?

94. Um sistema passa de um macroestado com multiplicidade Ω_i para outro com multiplicidade $\Omega_f = 5\Omega_i$. Calcule ΔS e indique qual dos estados tem maior probabilidade se os microestados forem equiprováveis.

95. Explique por que o macroestado de maior multiplicidade é o mais provável, embora cada microestado individual tenha a mesma probabilidade.

96. Relacione o aumento de entropia de um sistema isolado com o aumento do número de microestados compatíveis com sua descrição macroscópica.

97. Uma transformação microscópica pode ocorrer tanto no sentido direto quanto no inverso, mas só um sentido é observado espontaneamente em escala macroscópica. Explique essa afirmação em termos de multiplicidade e probabilidade.

98. Onze partículas distinguíveis ocupam duas regiões equivalentes. Calcule a multiplicidade do macroestado com 6 partículas à esquerda e 5 à direita. Compare-a com a do macroestado inverso.

99. Dois macroestados têm multiplicidades $\Omega_1 = 120$ e $\Omega_2 = 720$. Calcule $S_2 - S_1$ em função de k_B e determine a razão entre as probabilidades dos macroestados, se todos os microestados forem equiprováveis.

100. Doze posições distinguíveis podem estar ocupadas ou vazias, com exatamente quatro ocupadas. Quantos microestados são compatíveis com esse macroestado? Escreva a entropia de Boltzmann correspondente.

"A vida é bela, apesar de tudo."
(Amélie Poulain)