

# 4300159 - Física do Calor

## Lista 5: Mais sobre máquinas térmicas, segunda lei da termodinâmica e entropia

### Verdadeiro ou falso

1. Processos reversíveis são idealizações impossíveis de serem realizadas na prática.
2. A segunda lei da termodinâmica, no enunciado de Clausius, pode ser resumida como: *não existe um refrigerador ideal*.
3. O ciclo de Carnot, por ser reversível, pode ser operado em ambos os sentidos, como máquina térmica, ou como refrigerador.
4. A entropia de um sistema nunca pode diminuir.
5. A entropia de um sistema isolado nunca pode diminuir.
6. A entropia do universo nunca pode diminuir.
7. A variação de entropia de um sistema que sofre uma transformação cíclica é nula, mesmo que a transformação seja irreversível.

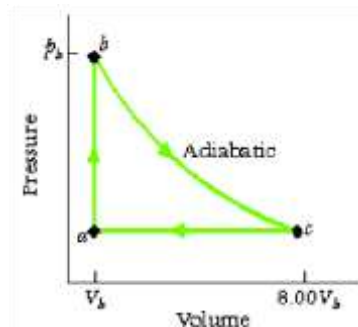
### Questões

1. Descreva as diferenças entre uma máquina térmica e um refrigerador.
2. Explique porque a máquina térmica mais eficiente possível deve ser reversível.
3. Cite os fatores mais importantes na redução da eficiência de uma máquina térmica em relação ao seu valor ideal.
4. Existe variação de entropia associada a movimentos puramente mecânicos?
5. Explique porque, em uma transformação reversível, a variação de entropia do universo (universo = sistema + vizinhanças) é nula.
6. Explique porque cada um dos processos seguintes é um exemplo do aumento da desordem ou da aleatoriedade: mistura de água quente com água fria, expansão livre de um gás, fluxo de calor irreversível e produção de calor por atrito mecânico. Existe aumento de entropia em todos esses casos? Por quê?
7. Se você roda um filme de trás para frente, é como se o sentido do tempo fosse invertido. No filme com tempo invertido, você veria processos que violam a conservação de energia? E a conservação do momento linear? Você veria processos que violam a segunda lei da termodinâmica? Em cada caso, dê exemplos caso haja violação.
8. Uma planta que cresce cria uma estrutura altamente organizada a partir de materiais simples como o ar, a água e alguns minerais. Isso viola a segunda lei da termodinâmica?

### Problemas

1. Um refrigerador absorve 5 kJ de energia de um reservatório frio e ejeta 8 kJ em um reservatório quente. (a) Ache o coeficiente de eficiência do refrigerador. (b) O refrigerador é reversível e pode operar como máquina térmica, entre os mesmos reservatórios térmicos. Qual o rendimento desta máquina térmica?
2. Uma máquina térmica, que opera entre dois reservatórios nas temperaturas  $T_q$  e  $T_f$ , tem rendimento de 30%. Operando como a máquina térmica, rejeita 140 J de calor no reservatório frio. Uma outra máquina, que opera entre os mesmos reservatórios, também rejeita 140 J no reservatório frio. Mostrar que se a segunda máquina tiver rendimento superior a 30%, as duas máquinas acopladas convenientemente poderiam violar o enunciado de Kelvin para a segunda lei da termodinâmica.

3. Uma máquina de Carnot opera como refrigerador entre dois reservatórios térmicos. A máquina recebe 50 J de trabalho para remover 100 J de calor do reservatório frio e ejetar 150 J de calor no reservatório quente, durante cada ciclo. O coeficiente de eficiência  $K = Q_f/W = 100/50 = 2$ . (a) Qual o rendimento da máquina de Carnot, quando opera como motor, entre os mesmos reservatórios? (b) Mostrar que nenhuma outra máquina, operando como refrigerador entre os mesmos reservatórios, poderia ter  $K$  maior que 2.
4. O que provoca maior efeito no aumento do rendimento de uma máquina de Carnot, uma elevação de 5 K na temperatura do reservatório quente, ou uma diminuição de 5 K na temperatura do reservatório frio?
5. Um refrigerador opera entre uma temperatura interna de 0 °C e uma temperatura ambiente de 20 °C. (a) Qual o maior coeficiente de eficiência que pode ter? (b) Se o interior do refrigerador for resfriado a -10 °C, qual o maior coeficiente de eficiência possível, admitindo que a temperatura ambiente continue a ser de 20 °C?
6. Uma máquina térmica opera com 1 mol de um gás ideal, que tem  $C_v = 3R/2$  e  $C_p = 5R/2$ , como fluido operante. O ciclo inicia em  $P_1 = 1$  atm e  $V_1 = 24,6$  L. O gás é aquecido a volume constante até  $P_2 = 2$  atm. Depois se expande a pressão constante até  $V_2 = 49,2$  L. Durante estas duas etapas, há absorção de calor pelo gás. O gás é então resfriado isocoricamente até sua pressão ser novamente 1 atm. Finalmente, é resfriado a pressão constante até atingir o estado inicial. Nas duas últimas etapas o gás rejeita calor. Todas as etapas são quase-estáticas e reversíveis. (a) Mostrar este ciclo num diagrama  $PV$ . Achar o trabalho efetuado, o calor fornecido e a variação da energia interna do gás em cada etapa do ciclo. (b) Achar o rendimento do ciclo.
7. Um mol de um gás monoatômico ideal, inicialmente com um volume de 10 L e uma temperatura de 300 K, é aquecido em volume constante até uma temperatura de 600 K, expandindo-se isotermicamente para sua pressão inicial e, finalmente, comprimindo-se isobaricamente até o estado inicial. (a) Calcule o calor fornecido ao sistema durante um ciclo. (b) Qual o trabalho líquido realizado pelo gás durante um ciclo? (c) Qual o rendimento deste ciclo?
8. Um mol de um gás ideal monoatômico é forçado a seguir o ciclo mostrado na figura abaixo. O processo  $bc$  é uma expansão reversível.  $P_b = 10$  atm,  $V_b = 1,0$  m<sup>3</sup> e  $V_c = 8,0$  m<sup>3</sup>. Calcule: (a) o calor absorvido pelo gás; (b) o calor rejeitado pelo gás; (c) o trabalho líquido realizado pelo gás e (d) o rendimento do ciclo.
9. Em cada ciclo, uma máquina de Carnot remove 100 J de energia de um reservatório a 400 K, efetua trabalho e descarrega calor em um reservatório a 300 K. (a) Calcular, em cada ciclo, a variação de entropia de cada reservatório. (b) mostrar que a variação da entropia do universo é nula nesse processo reversível.
10. Uma máquina térmica real, com eficiência termodinâmica de 60%, remove, em cada ciclo de operação, 100 J de um reservatório térmico a 400 K, efetua trabalho, e descarrega calor em um reservatório a 300 K. Calcular a variação de entropia de cada reservatório, em cada ciclo.
11. Dois moles de um gás ideal a  $T = 400$  K expandem-se isotérmica e quase-estaticamente de um volume inicial de 40 L até um volume final de 80 L. (a) Achar a variação de entropia do gás. (b) Qual a variação de entropia do universo neste processo?



12. Um sistema, ao passar de um estado  $A$  para outro  $B$ , absorve reversivelmente 200 J de calor de um reservatório a 300 K e rejeita reversivelmente 100 J de calor para um reservatório a 200 K. Durante este processo, o sistema efetua 50 J de trabalho. (a) Qual a variação da energia interna do sistema? (b) Qual a variação de entropia do sistema? (c) Qual a variação de entropia do universo? (d) Se o sistema passa do estado  $A$  para o estado  $B$ , por um processo não-reversível, como se alterariam as respostas em (a), (b) e (c)?
13. Dois moles de um gás ideal, originalmente a  $T = 400\text{K}$  e  $V = 40\text{ L}$ , sofrem uma expansão livre até duplicar o volume. (a) Qual é a variação de entropia do gás? (b) Qual é a variação de entropia do universo?
14. Se 500 J de calor forem conduzidos de um reservatório a 400 K para outro a 300 K, qual a variação de entropia do universo?
15. Uma máquina térmica opera em ciclo entre reservatórios térmicos a 400 K e 200 K. A máquina absorve 1000 J de calor do reservatório quente e efetua 200 J de trabalho, em cada ciclo. (a) Qual o rendimento desta máquina? (b) Achar a variação de entropia da máquina, de cada reservatório térmico e do universo em cada ciclo. (c) Qual seria o rendimento de uma máquina de Carnot operando entre esses mesmos reservatórios? (d) Qual o trabalho que poderia ser feito, por ciclo, por uma máquina de Carnot que absorvesse 1000 J de calor do reservatório quente? (e) Mostrar que a diferença entre o trabalho feito pela máquina de Carnot e o trabalho feito pela máquina original é  $T_1 \Delta S_u$ , onde  $\Delta S_u$  é a variação de entropia do universo.
16. Uma máquina de Carnot opera entre um reservatório quente a 320 K e um reservatório frio a 260 K. (a) Se a máquina absorve 500 J de calor no reservatório quente, determine o trabalho que esta máquina pode fornecer. (b) Se a máquina estiver funcionando como um refrigerador, quanto trabalho deve ser fornecido para que ela retire 1000 J do reservatório frio?
17. Um objeto de massa  $m_1$ , calor específico  $c_1$  e temperatura  $T_1$  é colocado em contato com um segundo objeto de massa  $m_2$ , calor específico  $c_2$  e temperatura  $T_2 > T_1$ . Por causa disso, a temperatura do primeiro objeto aumenta até  $T$  e a temperatura do segundo objeto diminui para  $T'$ , quando eles são separados. (a) Mostre que o aumento de entropia no sistema é dado por
- $$\Delta S = m_1 c_1 \ln \frac{T}{T_1} + m_2 c_2 \ln \frac{T'}{T_2}$$
- e mostre que a conservação de energia exige que
- $$m_1 c_1 (T - T_1) = m_2 c_2 (T_2 - T').$$
- (b) Mostre que a variação de entropia  $\Delta S$ , considerada função de  $T$ , torna-se máxima quando  $T = T'$ , que é precisamente a condição de equilíbrio termodinâmico. (c) Discuta o resultado da parte b considerando a ideia de que a entropia indica o grau de desordem de um sistema.
18. Na falta do que fazer, um aluno de física mergulha uma extremidade de certa barra de cobre na água fervendo a 100 °C, e a outra extremidade em uma mistura de água e gelo a 0 °C. Os lados das barras são isolados. Depois que o estado estacionário é atingido na barra, ocorre a fusão de 0,160 kg de gelo em certo intervalo de tempo. Para este intervalo de tempo, calcule (a) a variação de entropia da água que estava fervendo; (b) a variação de entropia da mistura de água e gelo; (c) a variação de entropia da barra de cobre; (d) a variação total de entropia do sistema.