

2

Energia e a Primeira Lei da Termodinâmica

▶ RESULTADOS DE APRENDIZAGEM

Quando você completar o estudo deste capítulo estará apto a...

- ▶ demonstrar conhecimento dos conceitos fundamentais relacionados à energia e à primeira lei da termodinâmica... incluindo energia interna, energia cinética e energia potencial; trabalho e potência; transferência de calor e modos de transferência de calor; taxa de transferência de calor; ciclo de potência; ciclo de refrigeração; e ciclo de bomba de calor.
- ▶ aplicar balanços de energia a sistemas fechados, modelando apropriadamente o caso em estudo e observando corretamente as convenções de sinais para o trabalho e a transferência de calor.
- ▶ realizar análises de energia para sistemas submetidos a ciclos termodinâmicos, avaliando, conforme o caso, as eficiências térmicas dos ciclos de potência e os coeficientes de desempenho dos ciclos de refrigeração e bomba de calor.

2.1 Revendo os Conceitos Mecânicos de Energia

A partir das contribuições de Galileu e outros, Newton formulou uma descrição geral dos movimentos dos objetos sob a influência de forças aplicadas. As leis do movimento de Newton, que fornecem a base para a mecânica clássica, conduzem aos conceitos de *trabalho*, *energia cinética* e *energia potencial*, os quais eventualmente levam a um conceito mais amplo de energia. A presente discussão se inicia com uma aplicação da segunda lei do movimento de Newton.

2.1.1 Trabalho e Energia Cinética

TOME NOTA...

Os símbolos em **negrito** indicam vetores. As magnitudes dos vetores são mostradas em fonte normal.

A curva na [Fig. 2.1](#) representa a trajetória percorrida por um corpo de massa m (um sistema fechado) movendo-se em relação aos eixos coordenados x - y mostrados. A velocidade do centro de massa do corpo é denotada por \mathbf{V} . Sobre o corpo atua uma força resultante \mathbf{F} , que pode variar em magnitude, de posição a posição, ao longo do caminho. A força resultante é decomposta em uma componente F_t tangente à trajetória e em uma componente F_n normal à

trajetória. O efeito da componente F_s é o de mudar a magnitude da velocidade, enquanto o efeito da componente F_n é o de mudar a direção da velocidade. Conforme ilustrado na Fig. 2.1, s é a posição instantânea do corpo medida ao longo da trajetória, a partir de algum ponto fixo indicado por 0. Uma vez que a magnitude de \mathbf{F} pode variar com a posição ao longo do caminho, as magnitudes de F_s e F_n são, em geral, funções de s .

Consideremos o corpo enquanto ele se move de $s = s_1$, em que a magnitude de sua velocidade é V_1 , para $s = s_2$, em que sua velocidade é V_2 . Para a presente discussão, admita que a única interação entre o corpo e sua vizinhança envolve a força \mathbf{F} . Pela segunda lei do movimento de Newton, a magnitude da componente F_s está relacionada com a variação da magnitude de \mathbf{V} por

$$F_s = m \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

Usando a regra da cadeia, a equação anterior pode ser escrita como

$$F_s = m \frac{dV}{ds} \frac{ds}{dt} = mV \frac{dV}{ds} \quad (2.2)$$

na qual $V = ds/dt$. Rearranjando a Eq. 2.2 e integrando de s_1 a s_2 , obtém-se

$$\int_{V_1}^{V_2} mV dV = \int_{s_1}^{s_2} F_s ds \quad (2.3)$$

A integral no lado esquerdo da Eq. 2.3 é calculada como se segue:

$$\int_{V_1}^{V_2} mV dV = \left. \frac{1}{2} mV^2 \right]_{V_1}^{V_2} = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) \quad (2.4)$$

energia cinética

A quantidade $\frac{1}{2}mV^2$ é a energia cinética, EC, do corpo. A energia cinética é uma grandeza escalar. A variação da energia cinética, ΔEC , do corpo é

$$\Delta EC = EC_2 - EC_1 = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \quad (2.5)$$

A integral no lado direito da Eq. 2.3 é o *trabalho* realizado pela força F_s quando o corpo se move de s_1 até s_2 ao longo da trajetória. O trabalho também é uma grandeza escalar.

Utilizando a Eq. 2.4, a Eq. 2.3 fica

$$\frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) = \int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F} \cdot ds \quad (2.6)$$

TOME NOTA...

O símbolo Δ significa sempre “o valor final menos o valor inicial”.

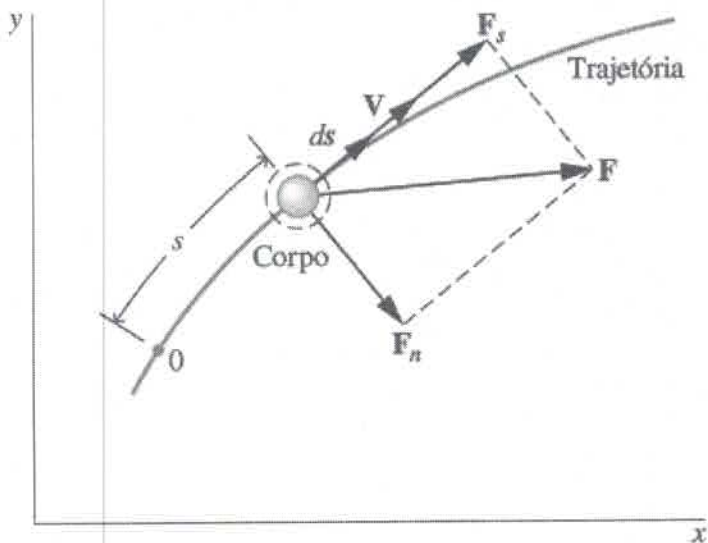


Fig. 2.1 Forças atuando sobre um sistema em movimento.



ENERGIA & MEIO AMBIENTE

Você já desejou saber o que acontece com a energia cinética quando você pisa no pedal do freio do seu carro em movimento? Esse tipo de questionamento fez com que engenheiros de automóveis chegassem ao veículo *elétrico híbrido*, que combina a frenagem *regenerativa*, baterias, um motor elétrico e um motor convencional. Quando os freios são aplicados em um veículo híbrido, parte de sua energia cinética é colhida e armazenada a bordo eletricamente para uso quando necessário. Por meio da frenagem regenerativa e de outras características inovadoras, os veículos híbridos alcançam uma quilometragem muito maior do que os veículos convencionais.

A tecnologia dos veículos híbridos está evoluindo com rapidez. Atualmente, tais veículos usam a eletricidade para complementar a potência do motor convencional, enquanto os futuros veículos híbridos *plug-in* usarão a potência de um motor menor para complementar a eletricidade. Os híbridos agora na estrada têm bateria suficiente a bordo para a aceleração de cerca de 20 milhas por hora (32,2 km/h) e, depois disso, auxiliam o motor quando necessário. Isso melhora o consumo de combustível, porém as baterias são recarregadas pelo motor – e nunca *plugadas*.

Os veículos híbridos *plug-in* alcançam uma economia de combustível ainda melhor. Em vez de confiar no motor para recarregar as baterias, a maioria da recarga será realizada a partir de uma tomada elétrica, enquanto o carro está estacionado – durante a noite, por exemplo. Isto permitirá que os carros obtenham a energia de que necessitam principalmente da rede elétrica e não por meio da bomba de combustível. A implantação generalizada da versão *plug-in* aguarda o desenvolvimento de uma nova geração de baterias e ultracapacitores (veja [Seção 2.7](#)).

Uma melhor economia de combustível não só permite que a nossa sociedade seja menos dependente do petróleo para atender às necessidades de transporte, mas também reduz a emissão de CO_2 dos veículos para a atmosfera. Cada galão de gasolina queimada pelo motor de um veículo produz cerca de 9 kg (20 lb) de CO_2 . Um veículo convencional produz várias toneladas de CO_2 por ano. Os veículos híbridos citados produzem muito menos. Contudo, como os híbridos usam a eletricidade da rede, um esforço maior deverá ser feito para reduzir as emissões das usinas de energia, incluindo mais energia eólica, energia solar e outras energias renováveis no mix nacional.

em que a expressão para o trabalho foi escrita em termos do produto escalar do vetor força \mathbf{F} pelo vetor deslocamento $d\mathbf{s}$. A Eq. 2.6 estabelece que o trabalho realizado pela força resultante sobre o corpo é igual à variação da sua energia cinética. Quando o corpo é acelerado pela força resultante, o trabalho realizado sobre o corpo pode ser considerado como uma *transferência* de energia para o corpo, *armazenada* sob a forma de energia cinética.

Pode-se atribuir um valor à energia cinética conhecendo-se apenas a massa do corpo e a magnitude da sua velocidade instantânea em relação a um sistema de coordenadas especificado, sem considerar como essa velocidade foi atingida. Assim, a *energia cinética é uma propriedade* do corpo. Como a energia cinética está associada ao corpo como um todo, ela é uma propriedade *extensiva*.

2.1.2 Energia Potencial

A Eq. 2.6 é o resultado principal da seção anterior. Oriunda da segunda lei de Newton, a equação fornece uma relação entre dois conceitos *definidos*: energia cinética e trabalho. Nesta seção ela é usada como ponto de partida para estender o conceito de energia. Para começar, dirija-se à Fig. 2.2, que mostra um corpo de massa m que se move verticalmente de uma altura z_1 até uma altura z_2 em relação à superfície da Terra. A figura mostra duas forças agindo sobre o sistema: uma força para baixo, em virtude da gravidade, com magnitude mg , e uma força vertical com magnitude R , que representa a resultante de todas as *outras* forças que agem sobre o sistema.

O trabalho realizado por cada força que atua sobre o corpo mostrado na Fig. 2.2 pode ser determinado pela definição dada anteriormente. O trabalho total é a soma algébrica desses valores individuais. De acordo com a Eq. 2.6, o trabalho total é igual à variação de energia cinética. Isto é,

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \int_{z_1}^{z_2} R dz - \int_{z_1}^{z_2} mg dz \quad (2.7)$$

Um sinal negativo é introduzido antes do segundo termo à direita, uma vez que a força gravitacional tem sentido contrário à orientação positiva de z .

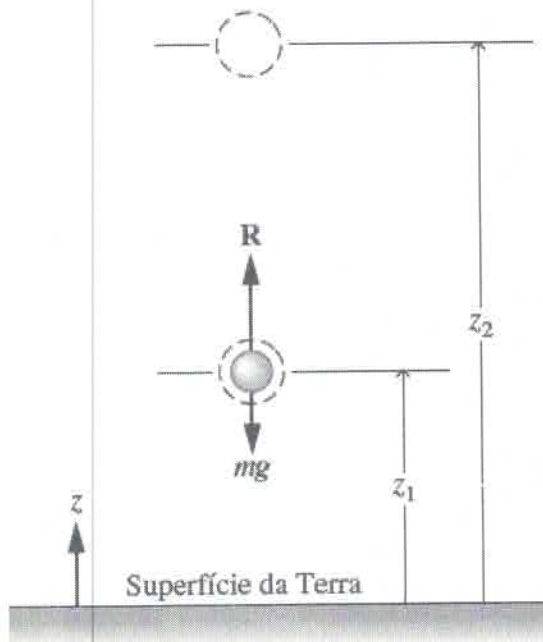


Fig. 2.2 Ilustração utilizada para apresentar o conceito de energia potencial.

TOME NOTA...

Ao longo deste livro, supõe-se que a aceleração da gravidade, g , pode ser considerada constante.

A primeira integral no lado direito da Eq. 2.7 representa o trabalho realizado pela força R sobre o corpo conforme ele se move verticalmente de z_1 até z_2 . A segunda integral pode ser calculada como se segue:

$$\int_{z_1}^{z_2} mg \, dz = mg(z_2 - z_1) \quad (2.8)$$

na qual a aceleração da gravidade foi considerada constante com a altura. Incorporando a Eq. 2.8 na Eq. 2.7 e rearranjando

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = \int_{z_1}^{z_2} R \, dz \quad (2.9)$$

energia potencial gravitacional

A quantidade mgz é a energia potencial gravitacional, EP. A *variação* na energia potencial gravitacional, ΔEP , é

$$\Delta EP = EP_2 - EP_1 = mg(z_2 - z_1) \quad (2.10)$$

A energia potencial está associada à força de gravidade e é, conseqüentemente, um atributo comum ao sistema composto pelo corpo e pela Terra. No entanto, a avaliação da força de gravidade como mg permite que a energia potencial gravitacional seja determinada para um dado valor de g , conhecendo-se apenas a massa do corpo e a sua altura. Sob esse ponto de vista, a energia potencial é considerada como uma *propriedade extensiva* do corpo. Ao longo de todo este livro, supõe-se que as diferenças de altura são pequenas o suficiente para que a força gravitacional possa ser considerada constante. Todavia, o conceito de energia potencial gravitacional pode ser formulado de modo a considerar a variação da força gravitacional com a elevação.

Para atribuir um valor à energia cinética ou à energia potencial de um sistema, é necessário definir um referencial e especificar um valor para a grandeza nesse referencial. Os valores da energia cinética e potencial são então determinados em relação a essa escolha arbitrária de referencial e ao valor de referência. Entretanto, como são necessárias somente as *variações* na energia cinética e potencial entre dois estados, essas especificações arbitrárias de referência se cancelam.

2.1.3 Unidades para a Energia

O trabalho possui unidade de força multiplicada pela distância. As unidades da energia cinética e da energia potencial são as mesmas do trabalho. No SI, a unidade da energia é o newton-metro, $N \cdot m$, denominada joule, J. Neste livro é conveniente utilizar-se o quilojoule, kJ. As unidades inglesas geralmente utilizadas para o trabalho, a energia cinética e a energia potencial são o pé-libra-força, $ft \cdot lbf$, e a unidade térmica britânica, Btu.

Quando um sistema está sujeito a um processo em que a energia cinética e a energia potencial variam, deve-se tomar um cuidado especial para obter um conjunto de unidades consistente.

► **POR EXEMPLO** para ilustrar o uso adequado das unidades nos cálculos de tais termos, considere um sistema com uma massa de 1 kg, cuja velocidade aumenta de 15 m/s para 30 m/s enquanto sua altura diminui de 10 m em um local em que $g = 9,7 \text{ m/s}^2$. Então

$$\begin{aligned}\Delta EC &= \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \\ &= \frac{1}{2}(1 \text{ kg}) \left[\left(30 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 - \left(15 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \right] \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= 0,34 \text{ kJ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta EP &= mg(z_2 - z_1) \\ &= (1 \text{ kg}) \left(9,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (-10 \text{ m}) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= -0,10 \text{ kJ}\end{aligned}$$

Para um sistema com uma massa de 1 lb (0,4 kg), cuja velocidade aumenta de 50 ft/s (15,2 m/s) para 100 ft/s (30,5 m/s) enquanto sua elevação diminui de 40 ft (12,2 m) em um local em que $g = 32,0 \text{ ft/s}^2$ ($9,7 \text{ m/s}^2$), temos

$$\begin{aligned}\Delta EC &= \frac{1}{2}(1 \text{ lb}) \left[\left(100 \frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^2 - \left(50 \frac{\text{ft}}{\text{s}}\right)^2 \right] \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,2 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right| \\ &= 0,15 \text{ Btu}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta EP &= (1 \text{ lb}) \left(32,0 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}\right) (-40 \text{ ft}) \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,2 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right| \\ &= -0,05 \text{ Btu} \ll \ll \ll \ll \ll\end{aligned}$$

2.1.4 Conservação de Energia em Mecânica

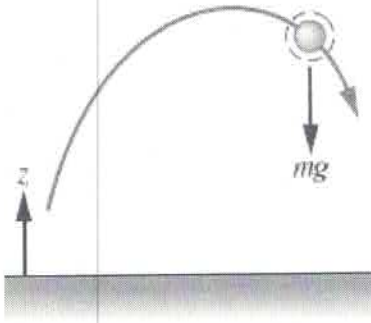
A Eq. 2.9 estabelece que o trabalho total realizado por todas as forças que atuam no corpo a partir de suas vizinhanças, à exceção da força gravitacional, é igual à soma das variações das energias cinética e potencial do corpo. Quando a força resultante causa um aumento na altura, uma aceleração no corpo ou ambos, o trabalho realizado pela força pode ser considerado uma *transferência* de energia *para* o corpo, no qual é armazenada como energia potencial gravitacional e/ou energia cinética. A noção de que *a energia se conserva* é a base dessa interpretação.

A interpretação da Eq. 2.9 como uma expressão do princípio da conservação de energia pode ser reforçada, considerando o caso especial de um corpo sobre o qual a única força atuante é aquela resultante da gravidade. Desse modo, o lado direito da equação desaparece, e ela se reduz a

$$\frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(z_2 - z_1) = 0 \quad (2.11)$$

ou

$$\frac{1}{2}mV_2^2 + mgz_2 = \frac{1}{2}mV_1^2 + mgz_1$$



Sob essas condições, a soma das energias cinética e potencial gravitacional *permanece constante*. A Eq. 2.11 também ilustra o fato de que a energia pode ser *convertida* de uma forma em outra: para um objeto em queda, *apenas* sob a influência da gravidade, a energia potencial decresceria, enquanto a energia cinética aumentaria da mesma quantidade.

2.1.5 Comentário Final

A apresentação até agora tem se concentrado em sistemas para os quais as forças aplicadas afetam somente sua velocidade e sua posição globais. Entretanto, os sistemas de interesse em engenharia normalmente interagem com suas vizinhanças através de maneiras mais complexas, com variações em outras propriedades também. Para analisar tais sistemas, os conceitos de energia cinética e potencial sozinhos não são suficientes, nem basta o princípio rudimentar da conservação de energia introduzido nesta seção. Em termodinâmica, o conceito de energia é estendido de modo a levar em conta outras variações observadas, e o princípio da *conservação de energia* é ampliado para incluir uma maior variedade de tipos de interação entre os sistemas e suas vizinhanças. Tais generalizações têm como base a evidência experimental. Essas extensões do conceito de energia são desenvolvidas no restante do capítulo, começando pela próxima seção com uma discussão mais completa sobre trabalho.

2.2 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Trabalho

O trabalho W realizado por, ou sobre, um sistema avaliado em termos de forças e deslocamentos observáveis macroscopicamente é dado por

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (2.12)$$

Essa relação é importante em termodinâmica, e é usada, mais adiante, nesta seção, para calcular o trabalho realizado na compressão ou expansão de um gás (ou líquido), o alongamento de uma barra sólida e o estiramento de uma película líquida. Entretanto, a termodinâmica também lida com fenômenos fora do escopo da mecânica; assim, é necessário adotar uma interpretação mais ampla do trabalho, como a seguir.

definição termodinâmica de trabalho

Uma certa interação é classificada como trabalho se satisfizer o seguinte critério, que pode ser considerado como a definição termodinâmica de trabalho: *um sistema realiza trabalho sobre suas vizinhanças se o único efeito sobre tudo aquilo externo ao sistema puder ser o levantamento de um peso*. Note que o levantamento de um peso é, realmente, uma força que age através de uma distância; assim, o conceito de trabalho em termodinâmica é uma extensão natural do conceito de trabalho em mecânica. No entanto, o teste para sabermos se uma interação sob a forma de trabalho ocorreu não está na verificação de que a elevação de um peso realmente ocorreu ou de que uma força verdadeiramente agiu através de uma distância, mas se o único efeito *poderia ser considerado* como o levantamento de um peso.

► POR EXEMPLO considere a Fig. 2.3, que mostra dois sistemas denominados A e B. No sistema A, um gás é misturado por um agitador: o agitador realiza trabalho sobre o gás. Em princípio, o trabalho poderia ser calculado em termos das forças e dos movimentos na fronteira entre o ventilador e o gás. Essa avaliação do trabalho é consistente com a Eq. 2.12, na qual trabalho é o produto da força pelo deslocamento. Em contraste, considere o sistema B, que inclui apenas a bateria. Na fronteira do sistema B, forças e movimentos não são evidentes. Em seu lugar, há uma corrente elétrica i induzida por uma diferença de potencial elétrica existente entre os terminais a e b. O motivo pelo qual esse tipo de interação pode ser classificado como trabalho advém da definição termodinâmica de trabalho dada anteriormente: podemos imaginar que a corrente alimenta um motor elétrico *hipotético* que eleva um peso na vizinhança. ◀◀◀◀◀◀

Trabalho é um modo de transferir energia. Consequentemente, o termo trabalho não se refere ao que está sendo transferido entre sistemas ou ao que é armazenado dentro de um sistema. A energia é transferida e armazenada quando se realiza trabalho.

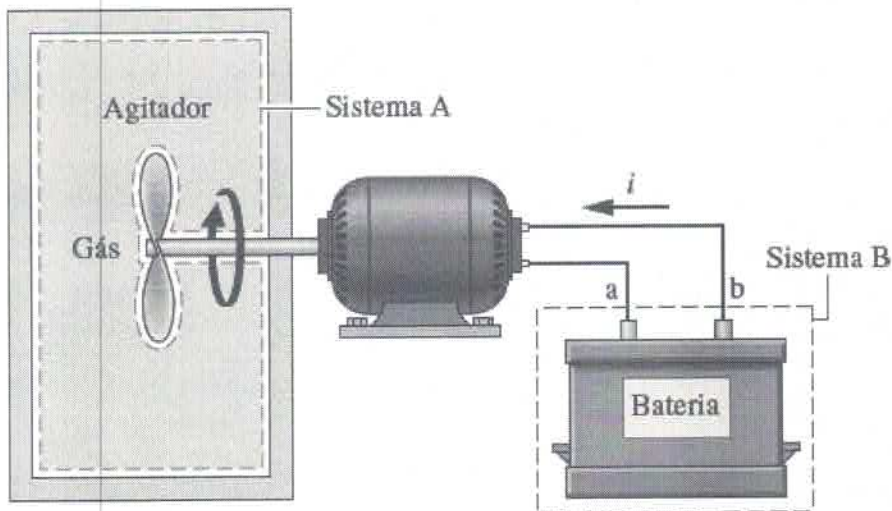


Fig. 2.3 Dois exemplos de trabalho.

2.2.1 Convenção de Sinais e Notação

A termodinâmica em engenharia está frequentemente preocupada com dispositivos tais como motores de combustão interna e turbinas, cujo propósito é realizar trabalho. Assim, em contraste com a abordagem geralmente seguida em mecânica é conveniente considerar trabalho como positivo. Isto é,

$W > 0$: trabalho realizado *pelo* sistema *sobre* as vizinhanças

$W < 0$: trabalho realizado *sobre* o sistema *pelos* vizinhanças

TOME NOTA...

O termo *trabalho* não se refere ao que está sendo transferido entre sistemas ou ao que está armazenado dentro dos sistemas. Energia é transferida e armazenada quando ocorre realização de trabalho.

convenção de sinais para trabalho

Esta convenção de sinais é utilizada ao longo deste livro. Em algumas situações, entretanto, é conveniente considerar o trabalho realizado *sobre* o sistema como positivo, como foi feito na discussão da [Seção 2.1](#). Para reduzir a possibilidade de algum equívoco nesses casos, o sentido no qual a energia é transferida é mostrado por uma seta no desenho representativo do sistema, e o trabalho é considerado positivo no sentido da seta.

trabalho não é uma propriedade

Para calcular a integral na Eq. 2.12, é necessário saber como as forças variam com o deslocamento. Essa informação realça uma ideia importante sobre o trabalho: o valor de W depende dos detalhes das interações que ocorrem entre o sistema e a vizinhança durante um processo, e não apenas dos estados inicial e final do sistema. Assim, o trabalho não é uma propriedade do sistema ou da vizinhança. Além disso, os limites de integração na Eq. 2.12 significam “do estado 1 ao estado 2”, e não podem ser interpretados como os *valores* do trabalho nesses estados. A noção de trabalho em um estado *não possui significado*; assim, o valor dessa integral nunca deve ser indicado como $W_2 - W_1$.



HORIZONTES

Máquinas em Nanoescala a Caminho

Engenheiros que trabalham no campo da nanotecnologia, a engenharia dos dispositivos de tamanho molecular, aguardam o momento em que possam ser fabricadas máquinas úteis em nanoescala capazes de se movimentar, de perceber e responder a estímulos tais como luz e som, entregando medicamentos no interior do corpo, realizando cálculos e numerosas outras funções que promovam o bem-estar humano. Esse assunto inspirou estudos biológicos de engenheiros sobre *máquinas* em nanoescala em organismos que realizam funções tais como criação e reparação de células, circulação de oxigênio e digestão de comida. Esses estudos produziram resultados positivos. Moléculas que imitam a função de dispositivos mecânicos têm sido fabricadas, incluindo engrenagens, rotores, roquetes, freios, chaves e estruturas semelhantes a ábacos. Um sucesso particular é o desenvolvimento dos motores moleculares que convertem luz em movimento linear ou de rotação. Embora os dispositivos produzidos até o momento sejam rudimentares, eles demonstram a viabilidade da construção de nanomáquinas, dizem os pesquisadores.

A diferencial do trabalho, δW , é chamada de *inexata* porque, em geral, a integral a seguir não pode ser calculada sem que sejam especificados os detalhes do processo

$$\int_1^2 \delta W = W$$

Por outro lado, a diferencial de uma propriedade é dita *exata* quando a variação de uma propriedade entre dois estados quaisquer não depende de maneira alguma dos detalhes do processo que ligam esses dois estados. Por exemplo, a variação do volume entre dois estados pode ser determinada pela integração da diferencial dV , sem considerar os detalhes do processo, como a seguir

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = V_2 - V_1$$

na qual V_1 é o volume *no* estado 1 e V_2 é o volume *no* estado 2. A diferencial de toda propriedade é exata. As diferenciais exatas são escritas utilizando-se o símbolo d . Para enfatizar a diferença entre diferenciais exatas e inexatas, a diferencial do trabalho é escrita como δW . O símbolo d também é usado para identificar outras diferenciais inexatas encontradas mais tarde.

2.2.2 Potência

potência

Muitas análises termodinâmicas preocupam-se com a taxa de tempo na qual a transferência de energia ocorre. A taxa de transferência de energia por meio de trabalho é denominada potência, e é representada por W . Quando uma

interação sob a forma de trabalho envolve uma força macroscopicamente observável, a taxa de transferência de energia sob a forma de trabalho é igual ao produto da força pela velocidade no ponto de aplicação da força

$$\dot{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{V} \quad (2.13)$$

Ao longo deste livro, para indicar uma taxa temporal, é colocado um ponto sobre o símbolo, como em \dot{W} . Em princípio, a Eq. 2.13 pode ser integrada do tempo t_1 até o tempo t_2 para obtermos o trabalho total realizado durante o intervalo de tempo

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \dot{W} dt = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F} \cdot \mathbf{V} dt \quad (2.14)$$

unidades de potência

A mesma convenção de sinal aplicada para \dot{W} é adotada para W . Como a potência é o trabalho realizado por unidade de tempo, ela pode ser expressa em termos de quaisquer unidades de energia e tempo. No SI, a unidade de potência é o J/s, e é chamada de watt. Neste livro, é geralmente empregado o quilowatt (kW). As unidades inglesas mais utilizadas para potência são ft · lbf/s, Btu/h e o *horsepower*, hp.

► POR EXEMPLO para ilustrar o uso da Eq. 2.13, vamos calcular a potência necessária para um ciclista, viajando a 20 milhas por hora, superar a força de arrasto imposta pelo ar ao seu redor. Essa força de *arrasto aerodinâmico* é dada por

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho V^2$$

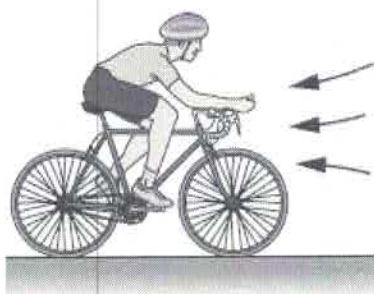
em que C_d é uma constante chamada de *coeficiente de arrasto*, A é a área frontal da bicicleta e do ciclista, e ρ é a massa específica do ar. Pela Eq. 2.13, a potência necessária é $F_d \cdot V$ ou

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \left(\frac{1}{2} C_d A \rho V^2 \right) V \\ &= \frac{1}{2} C_d A \rho V^3 \end{aligned}$$

Usando valores típicos: $C_d = 0,88$, $A = 3,9 \text{ ft}^2$ ($0,36 \text{ m}^2$) e $\rho = 0,075 \text{ lb/ft}^3$ ($1,2 \text{ kg/m}^3$), junto com $V = 20 \text{ mi/h} = 29,33 \text{ ft/s}$ e, além disso, convertendo as unidades para HP, a potência necessária é

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \frac{1}{2} (0,88) (3,9 \text{ ft}^2) \left(0,075 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \left(29,33 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)^3 \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,2 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ hp}}{550 \text{ ft} \cdot \text{lbf/s}} \right| \\ &= 0,183 \text{ hp} \lll \lll \lll \lll \end{aligned}$$

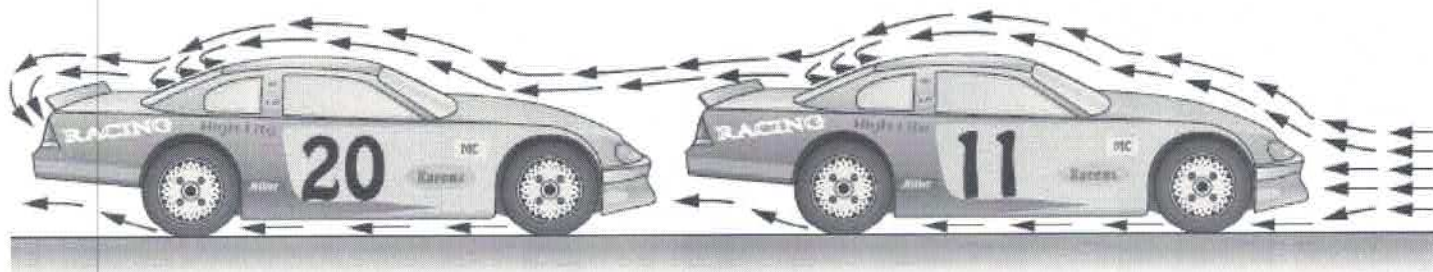
O arrasto pode ser reduzido através do conceito denominado *streamlining*, que considera a forma do objeto em movimento, e usando a técnica conhecida como *drafting* (veja o boxe a seguir).



Drafting

O *drafting* ocorre quando dois ou mais veículos ou indivíduos em movimento se alinham bem próximos para reduzir o efeito global do arrasto. O *drafting* é visto em eventos competitivos, tais como corridas de automóveis, corridas de bicicleta, patinação de velocidade e corridas olímpicas.

Estudos mostram que o fluxo de ar ao longo de um único veículo ou indivíduo em movimento é caracterizado por uma região de alta pressão na frente e uma região de baixa pressão atrás. A diferença entre essas pressões cria uma força, chamada de arrasto, impedindo o movimento. Durante o *drafting*, como pode ser visto no desenho a seguir, um segundo veículo (ou indivíduo) está estreitamente alinhado com outro e o ar escoava sobre o par quase como se fossem um único corpo, alterando assim a pressão entre eles e reduzindo o arrasto que cada corpo sofre. Enquanto os pilotos de corrida usam o *drafting* para aumentar a velocidade, aqueles que não praticam esse esporte competitivo geralmente visam reduzir as solicitações sobre seus corpos, mantendo a mesma velocidade.



2.2.3 Modelando o Trabalho de Expansão ou Compressão

Há várias maneiras pelas quais o trabalho pode ser realizado por ou sobre um sistema. No restante desta seção, vários exemplos serão considerados, começando com o importante caso do trabalho realizado quando ocorre a variação de volume de uma certa quantidade de um gás (ou líquido) devido a uma expansão ou compressão.

Vamos avaliar o trabalho realizado pelo sistema fechado ilustrado na Fig. 2.4, que consiste em um gás (ou líquido) contido em um conjunto cilindro-pistão à medida que o gás se expande. Durante o processo, a pressão do gás exerce uma força normal sobre o pistão. Considere p a pressão atuando na interface entre o gás e o pistão. A força exercida pelo gás sobre o pistão é simplesmente o produto pA , no qual A é a área da face do pistão. O trabalho realizado pelo sistema à medida que o pistão é deslocado de uma distância dx é

$$\delta W = pA dx \quad (2.15)$$

O produto $A dx$ na Eq. 2.15 é igual à variação de volume do sistema, dV . Assim, a expressão para o trabalho pode ser escrita como

$$\delta W = p dV \quad (2.16)$$

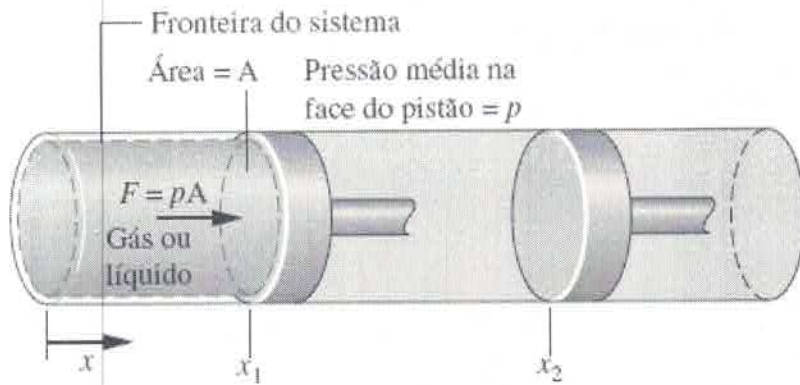


Fig. 2.4 Expansão ou compressão de um gás ou líquido.

Como dV é positivo quando o volume aumenta, o trabalho na fronteira móvel é positivo quando o gás se expande. Para uma compressão dV é negativo, assim como o trabalho calculado pela Eq. 2.16. Esses sinais estão de acordo com a convenção de sinais para o trabalho estabelecida anteriormente.

Para uma variação de volume de V_1 até V_2 , o trabalho é obtido através da integração da Eq. 2.16

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (2.17)$$

Embora a Eq. 2.17 seja deduzida para o caso de um gás (ou líquido) em um conjunto cilindro-pistão, ela pode ser aplicada a sistemas de *qualquer* forma, contanto que a pressão seja uniforme com a posição ao longo da fronteira móvel.

2.2.4 Trabalho de Expansão ou Compressão em Processos Reais

Não há exigência de que um sistema que passa por um processo esteja em equilíbrio *durante* o processo. Alguns ou todos os estados intermediários podem ser estados de não equilíbrio. Em muitos de tais processos, estamos limitados ao conhecimento do estado antes de o processo ocorrer e do estado após o fim do processo.

Normalmente, em um estado de não equilíbrio, as propriedades intensivas variam com a posição para um dado tempo. De modo semelhante, para uma determinada posição as propriedades intensivas podem variar com o tempo, algumas vezes de maneira caótica. Em certos casos, as variações espaciais e temporais das propriedades podem ser medidas, como ocorre para a temperatura, a pressão e a velocidade, ou obtidas por meio da solução das equações apropriadas, que são

em geral equações diferenciais.

A integração da Eq. 2.17 requer uma relação entre a pressão do gás *na fronteira móvel* e o volume do sistema. Entretanto, devido aos efeitos de não equilíbrio durante um processo *real* de expansão ou compressão, essa relação pode ser difícil, ou mesmo impossível, de ser obtida. No cilindro de um motor de automóvel, por exemplo, a combustão e outros efeitos de não equilíbrio dão lugar a não uniformidades por todo o cilindro. Consequentemente, se um transdutor de pressão fosse montado na cabeça do cilindro, o sinal de saída registrado poderia fornecer apenas uma aproximação para a pressão na face do pistão requerida pela Eq. 2.17. Além disso, mesmo quando a pressão medida é essencialmente igual àquela na face do pistão, pode existir uma escassez de dados para o gráfico pressão-volume, como ilustrado na Fig. 2.5. Ainda assim a integração da Eq. 2.17, baseada na curva ajustada aos dados, forneceria uma *estimativa plausível* para o trabalho. Veremos mais tarde que, nos casos em que a falta da relação pressão-volume necessária nos impede de calcular o trabalho através da Eq. 2.17, o trabalho poderá ser calculado de

modo alternativo a partir de um *balanço de energia* (Seção 2.5).

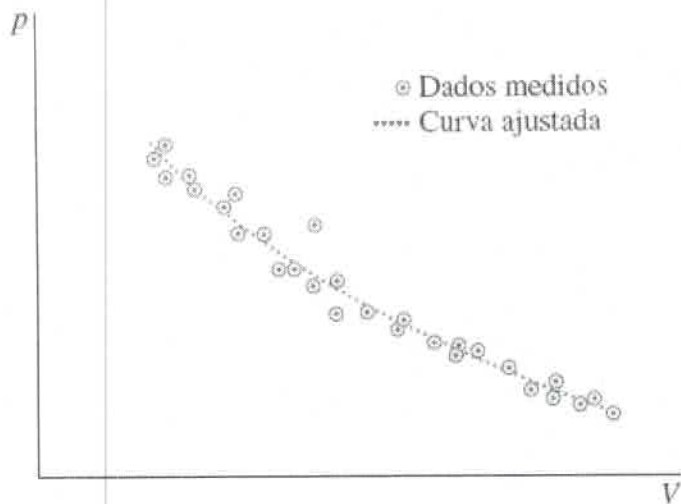


Fig. 2.5 Pressão na face do pistão *versus* volume do cilindro.

2.2.5 Trabalho de Expansão ou Compressão em Processos em Quase Equilíbrio

processo em quase equilíbrio

Os processos são algumas vezes modelados como um tipo idealizado de processo chamado de processo em quase equilíbrio (ou quase estático). Um processo em quase equilíbrio é aquele em que o afastamento do equilíbrio termodinâmico é no máximo infinitesimal. Todos os estados por onde o sistema passa, em um processo de quase equilíbrio, podem ser considerados estados de equilíbrio. Como os efeitos de não equilíbrio estão inevitavelmente presentes durante os processos reais, os sistemas de interesse para a engenharia podem, na melhor das hipóteses, se aproximar de um processo em quase equilíbrio, mas nunca realizá-lo. Ainda assim, o processo de quase equilíbrio exerce um papel em nosso estudo da termodinâmica aplicada à engenharia. Para detalhes, veja o boxe adiante.

Para analisar como um gás (ou líquido) poderia ser expandido ou comprimido de uma maneira em quase equilíbrio, considere a [Fig. 2.6](#), que mostra um sistema que consiste em um gás inicialmente em um estado de equilíbrio. Como ilustrado na figura, a pressão do gás é mantida completamente uniforme através de pequenas massas em repouso sobre o pistão que se movimenta livremente. Imagine que uma das massas seja removida, permitindo que o pistão se mova para cima à medida que o gás se expande ligeiramente. Durante essa expansão, o estado do gás se afastaria apenas ligeiramente do equilíbrio. Em algum momento, o sistema atingiria um novo estado de equilíbrio, no qual a pressão e todas as outras propriedades intensivas teriam novamente um valor uniforme. Além disso, se a massa fosse recolocada, o gás teria o seu estado inicial restaurado, enquanto mais uma vez o afastamento do equilíbrio seria pequeno. Se várias das massas fossem removidas uma após a outra, o gás passaria por uma sequência de estados de equilíbrio sem jamais se afastar do equilíbrio. No limite, à medida que os incrementos de massa fossem se tornando cada vez menores, o gás passaria por um processo de expansão em quase equilíbrio. Uma compressão em quase equilíbrio pode ser visualizada com considerações similares.

Massas infinitesimais removidas durante a expansão de um gás ou líquido

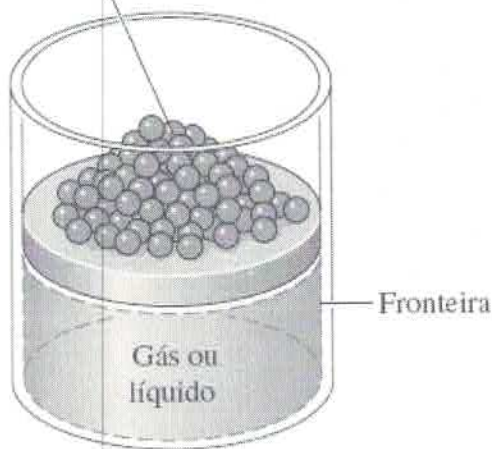


Fig. 2.6 Ilustração de uma expansão ou compressão em quase equilíbrio.

Usando o Conceito de Processo em Quase Equilíbrio

Nosso interesse no processo em quase equilíbrio se origina principalmente de duas considerações:

- ▶ Modelos termodinâmicos simples que fornecem no mínimo uma informação *qualitativa* sobre o comportamento de sistemas reais de interesse frequentemente podem ser desenvolvidos usando o conceito de processo em quase equilíbrio. Isso é semelhante ao uso de idealizações com o objetivo de simplificar a análise, tais como a massa pontual ou a polia sem atrito.
- ▶ O conceito de processo em quase equilíbrio contribui para a dedução das relações que existem entre as propriedades dos sistemas em equilíbrio (Caps. 3, 6 e 11).

A Eq. 2.17 pode ser aplicada para calcular o trabalho em processos de expansão ou compressão em quase equilíbrio. Para tais processos idealizados, a pressão p na equação é a pressão da quantidade total de gás (ou líquido) que passa pelo processo, e não apenas a pressão na fronteira móvel. A relação entre a pressão e o volume pode ser gráfica ou analítica. Vamos primeiro considerar uma relação gráfica.

Uma relação gráfica é mostrada no diagrama pressão-volume (diagrama p - V) da Fig. 2.7. Inicialmente, a face do pistão se encontra na posição x_1 , e a pressão do gás é p_1 ; ao final do processo de expansão em quase equilíbrio, a face do pistão está na posição x_2 , e a pressão é reduzida a p_2 . Em *cada* posição intermediária do pistão, a pressão uniforme em todo o gás é representada por um ponto no diagrama. A curva, ou *caminho*, que une os estados 1 e 2 no diagrama representa os estados de equilíbrio pelos quais o sistema passou durante o processo. O trabalho realizado pelo gás sobre o pistão durante a expansão é dado por $\int p dV$, que pode ser interpretado como a área sob a curva pressão *versus* volume. Assim, a área sombreada na Fig. 2.7 corresponde ao trabalho para o processo. Se o gás fosse *comprimido* de 2 para 1 ao longo do mesmo caminho no diagrama p - V , a *magnitude* do trabalho seria a mesma, mas o sinal seria negativo, indicando que para a compressão a transferência de energia foi do pistão para o gás.

A interpretação da área relativa ao trabalho em um processo de expansão ou compressão em quase equilíbrio permite uma demonstração simples da ideia de que o trabalho depende do processo. Isso pode ser verificado observando a Fig. 2.8. Suponha que um gás em um conjunto cilindro-pistão evolua de um estado inicial de equilíbrio 1 para um estado final de equilíbrio 2 por dois caminhos diferentes, denominados A e B na Fig. 2.8. Como a área abaixo de cada caminho representa o trabalho para aquele processo, o trabalho depende dos detalhes do processo definido pela curva correspondente e não apenas dos estados extremos. Usando o teste para uma propriedade apresentado na Seção 1.3.3, podemos concluir novamente (Seção 2.2.1) que o *trabalho não é uma propriedade*. O valor do trabalho depende da natureza do processo entre os estados inicial e final.

processo politrópico

A relação entre a pressão e o volume, ou a pressão e o volume específico, também pode ser descrita analiticamente. Um processo em quase equilíbrio descrito por $pV^n = \text{constante}$, ou $py^n = \text{constante}$, no qual n é uma constante, é chamado de processo politrópico. Outras formas analíticas para a relação pressão-volume também podem ser consideradas.

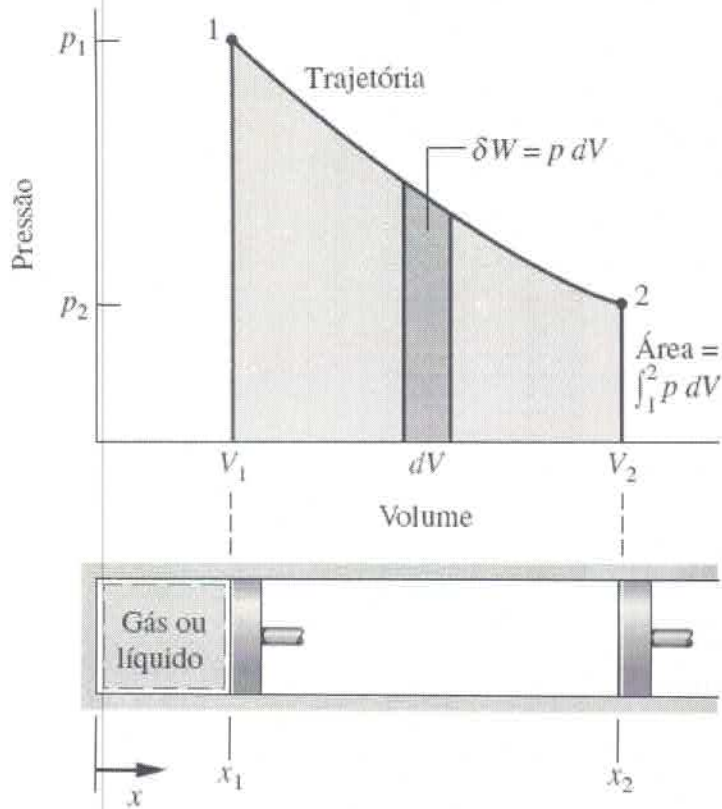


Fig. 2.7 Trabalho de um processo de expansão ou compressão em quase equilíbrio.

Trabalho_de_Comp
A.4 – Todas as Abas



Trabalho_de_Exp
A.5 – Todas as Abas

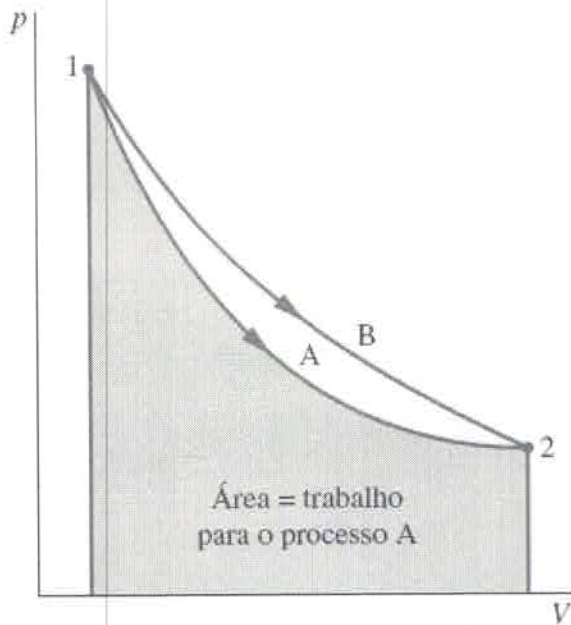


Fig. 2.8 Exemplo mostrando que o trabalho depende do processo.

O exemplo a seguir ilustra a aplicação da Eq. 2.17 em uma situação em que a relação entre a pressão e o volume durante uma expansão é descrita analiticamente por $pV^n = \text{constante}$.

EXEMPLO 2.1 ▶

Avaliando o Trabalho de Expansão

Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre a pressão e o volume é dada por

$$pV^n = \text{constante}$$

A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de $0,1 \text{ m}^3$ e o volume final é de $0,2 \text{ m}^3$. Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de **(a)** $n = 1,5$; **(b)** $n = 1,0$; **(c)** $n = 0$.

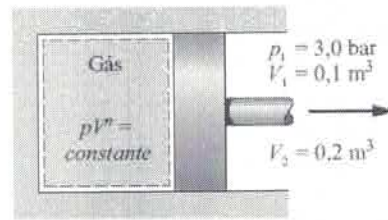
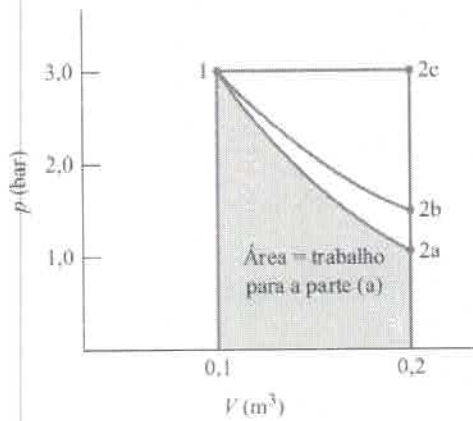
SOLUÇÃO

Dado: Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por uma expansão, na qual $pV^n = \text{constante}$.

Pede-se: Determinar o trabalho para (a) $n = 1,5$; (b) $n = 1,0$; (c) $n = 0$.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos: A relação p - V e os dados fornecidos para pressão e volume podem ser usados para construir o diagrama pressão-volume do processo correspondente.

1



Modelo de Engenharia:

1. O gás é um sistema fechado.
2. A fronteira móvel é o único modo de trabalho.
3. A expansão é um processo politrópico. 2

Fig. E2.1

Análise: Os valores pedidos para o trabalho são obtidos pela integração da Eq. 2.17 utilizando a relação pressão-volume dada.

(a) Introduzindo a relação $p = \text{constante}/V^n$ na Eq. 2.17 e realizando a integração

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\text{constante}}{V^n} \, dV$$

$$= \frac{(\text{constante})V_2^{1-n} - (\text{constante})V_1^{1-n}}{1-n}$$

A constante nesta expressão pode ser fornecida por qualquer um dos estados inicial ou final: $\text{constante} = p_1V_1^n = p_2V_2^n$. A expressão para o trabalho torna-se, então,

$$W = \frac{(p_2V_2^n)V_2^{1-n} - (p_1V_1^n)V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n} \quad (\text{a})$$

Esta expressão é válida para todos os valores de n , exceto $n = 1,0$. O caso $n = 1,0$ é tratado na parte (b).

Para calcular W , a pressão no estado 2 é necessária. Esta pode ser obtida usando $p_1V_1^n = p_2V_2^n$ que, através de uma manipulação, fornece

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n = (3 \text{ bar}) \left(\frac{0,1}{0,2} \right)^{1,5} = 1,06 \text{ bar}$$

Consequentemente,

$$W = \left(\frac{(1,06 \text{ bar})(0,2 \text{ m}^3) - (3)(0,1)}{1 - 1,5} \right) \left| \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| = +17,6 \text{ kJ}$$

(b) Para $n = 1,0$ a relação pressão-volume é $pV = \text{constante}$ ou $p = \text{constante}/V$. O trabalho é

$$W = \text{constante} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = (\text{constante}) \ln \frac{V_2}{V_1} = (p_1V_1) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{b})$$

Substituindo os valores

$$W = (3 \text{ bar})(0,1 \text{ m}^3) \left| \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \ln \left(\frac{0,2}{0,1} \right) = +20,79 \text{ kJ}$$

(c) Para $n = 0$, a relação pressão-volume reduz-se a $p = \text{constante}$, e a integral torna-se $W = p(V_2 - V_1)$, o que é um caso especial da expressão encontrada na parte (a). Substituindo os valores e convertendo as unidades, $W = +30 \text{ kJ}$.

4

1 Em cada caso, o trabalho para o processo pode ser interpretado como a área sob a curva que representa o processo no diagrama p - V correspondente. Observe que as áreas relativas a esses processos estão de acordo com os resultados numéricos.

2 A hipótese de um processo politrópico é significativa. Se a relação pressão-volume fornecida fosse obtida como um ajuste de dados experimentais referentes à pressão-volume, o valor de $\int p \, dV$ forneceria uma estimativa plausível para o trabalho apenas quando a pressão medida fosse essencialmente igual àquela exercida na face do pistão.

3 Observe o uso dos fatores de conversão de unidades aqui e na parte (b).

4 Em cada um dos casos considerados não é necessário identificar o gás (ou líquido) contido no interior do conjunto cilindro-pistão. Os valores calculados para W são determinados pelo caminho percorrido pelo processo e pelos estados inicial e final. Entretanto, se for desejável avaliar uma propriedade como a temperatura, tanto a natureza quanto a quantidade da substância devem ser fornecidas porque, então, seriam necessárias relações apropriadas entre as propriedades da substância em questão.



Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar a metodologia de solução de problemas.
- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- calcular o trabalho usando a Eq. 2.17.
- aplicar a relação pressão-volume dada por $pV^n = \text{constante}$.

Teste-Relâmpago

Calcule o trabalho, em kJ, para um processo em duas etapas que consiste em uma expansão com $n = 1,0$, de $p_1 = 3 \text{ bar}$, $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$ até $V = 0,15 \text{ m}^3$, seguido por uma expansão com $n = 0$, de $V = 0,15 \text{ m}^3$ até $V_2 = 0,2 \text{ m}^3$. **Resposta:** 22,16 kJ.

2.2.6 Outros Exemplos de Trabalho

Para ampliar nossa compreensão do conceito de trabalho, consideraremos agora sucintamente vários outros exemplos de trabalho.

Alongamento de uma Barra Sólida

Considere um sistema que consiste em uma barra sólida sob tração, como ilustrado na Fig. 2.9. A barra está fixa em $x = 0$, e uma força F é aplicada na extremidade oposta. A força é representada por $F = sA$, na qual A é a área da seção transversal da barra e s a *tensão normal que atua na extremidade* da barra. O trabalho realizado quando a extremidade da barra se move de uma distância dx é dado por $\delta W = -sA dx$. O sinal negativo é necessário porque o trabalho é realizado *sobre* a barra quando dx é positivo. O trabalho relativo à variação do comprimento de x_1 a x_2 é dado pela integração

$$W = - \int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx \quad (2.18)$$

A Eq. 2.18 para um sólido é equivalente à Eq. 2.17 para um gás submetido a uma expansão ou compressão.

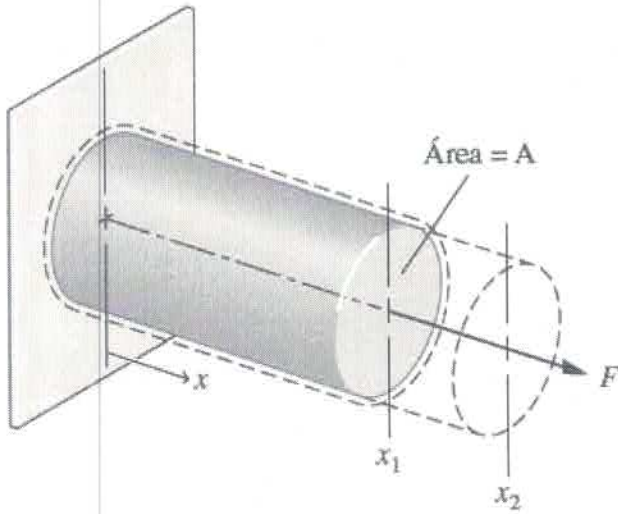


Fig. 2.9 Alongamento de uma barra sólida.

Estiramento de uma Película Líquida

A Fig. 2.10 mostra um sistema formado por uma película líquida suspensa em uma armação de arame. As duas superfícies da película suportam a fina camada líquida no interior da armação por meio do efeito da *tensão superficial*, resultante de forças microscópicas entre as moléculas próximas à interface líquido-ar. Essas forças originam uma força macroscópica perpendicular a qualquer linha na superfície. A força por unidade de comprimento através de uma linha como esta é a tensão superficial. Chamando a tensão superficial que *atua no arame móvel* de τ , a força F indicada na figura pode ser expressa por $F = 2l\tau$, na qual o fator 2 é introduzido porque duas películas superficiais agem no arame. Se o arame móvel é deslocado de dx , o trabalho é dado por $\delta W = -2lt dx$. O sinal negativo é necessário porque o trabalho é realizado *sobre* o sistema quando dx é positivo. Um deslocamento dx corresponde a uma alteração na área total das superfícies em contato com o arame, dada por $dA = 2l dx$, assim a expressão para o trabalho pode ser escrita alternativamente como $\delta W = -t dA$. O trabalho relativo a um aumento da área superficial, de A_1 até A_2 , é obtido pela integração da expressão

$$W = - \int_{A_1}^{A_2} \tau dA \quad (2.19)$$

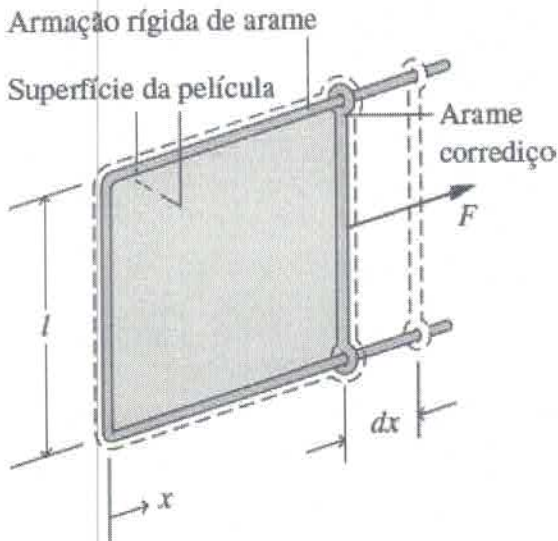
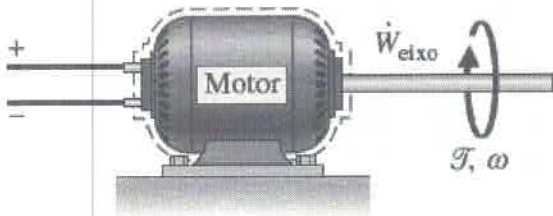


Fig. 2.10 Estiramento de uma película líquida.



Potência Transmitida por um Eixo

Um eixo giratório é um elemento de máquina frequentemente encontrado. Considere um eixo girando com uma velocidade angular ω e exercendo um torque \mathcal{J} na sua vizinhança. Seja esse torque expresso em termos de uma força tangencial F_t e raio R : $\mathcal{J} = F_t R$. A velocidade no ponto de aplicação da força é $V = R\omega$, no qual ω é expresso em raios por unidade de tempo. Usando essas relações e a Eq. 2.13, obtemos uma expressão para a *potência* transmitida do eixo para a vizinhança

$$\dot{W} = F_t V = (\mathcal{J}/R)(R\omega) = \mathcal{J}\omega \quad (2.20)$$

Um caso semelhante envolvendo um gás misturado por um agitador foi considerado na discussão da Fig. 2.3.

Potência Elétrica

A Fig. 2.11 mostra um sistema constituído por uma célula eletrolítica. A célula está conectada a um circuito externo através do qual passa uma corrente elétrica i . A corrente é induzida por uma diferença de potencial elétrico e existente entre os terminais denominados a e b. Esse tipo de interação pode ser classificado como trabalho, como foi considerado na discussão da Fig. 2.3.

A taxa de transferência de energia por meio de trabalho, ou potência, é

$$\dot{W} = -\mathcal{E}i \quad (2.21)$$

Uma vez que a corrente i é igual a dZ/dt , o trabalho pode ser expresso na forma diferencial como

$$\delta W = -\mathcal{E} dZ \quad (2.22)$$

sendo dZ a quantidade de carga elétrica que flui para o sistema. O sinal negativo que aparece nas Eqs. 2.21 e 2.22 é necessário para que a expressão fique de acordo com nossa convenção de sinais para o trabalho.

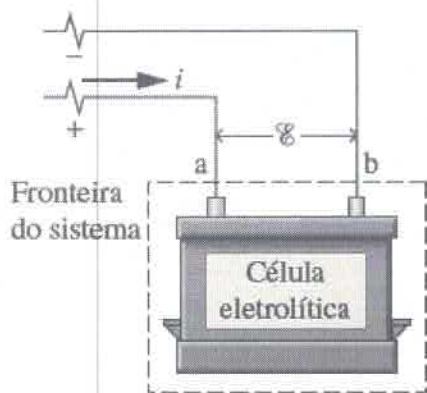


Fig. 2.11 Célula eletrolítica utilizada para discutir a potência.

Trabalho Devido à Polarização ou Magnetização

Vamos a seguir nos referir de modo sucinto aos tipos de trabalho que podem ser realizados em sistemas no interior de campos elétricos ou magnéticos, conhecidos como trabalho de polarização e magnetização, respectivamente. Do ponto de vista microscópico, dipolos elétricos no interior de dielétricos resistem à mudança de orientação e, portanto, o trabalho é realizado quando eles são alinhados por um campo elétrico. Do mesmo modo, dipolos magnéticos resistem à mudança de orientação, e o trabalho é realizado em certos materiais quando sua magnetização é alterada. A polarização e a magnetização dão origem a variações detectáveis *macroscopicamente* no momento dipolar total à medida que as partículas que compõem o material são realinhadas. Nesses casos, o trabalho está associado a forças impostas no sistema global por campos em suas vizinhanças. As forças que atuam no material no interior do sistema são chamadas de *forças de corpo*. Para essas forças, o deslocamento apropriado a ser utilizado no cálculo do trabalho é o deslocamento da matéria sobre a qual as forças de corpo atuam.

TOME NOTA...

Quando a potência é calculada em termos de watt e a unidade de corrente é o ampère (uma unidade básica do SI), a unidade de potencial elétrico é o volt, definido como 1 watt por ampère.

2.2.7 Outros Exemplos de Trabalho em Processos em Quase Equilíbrio

Outros sistemas, além de um gás ou um líquido em um conjunto cilindro-pistão, podem também ser considerados como sistemas submetidos a processos do tipo quase equilíbrio. Para aplicarmos o conceito de processo em quase equilíbrio em qualquer desses casos, é necessário considerar uma *situação ideal*, em que as forças externas que atuam sobre o sistema podem variar tão pouco que o desequilíbrio resultante é infinitesimal. Como consequência, o sistema passa por um processo sem jamais afastar-se do equilíbrio termodinâmico de maneira significativa.

O alongamento de uma barra sólida e o estiramento de uma película superficial líquida podem ser prontamente visualizados como ocorrências em quase equilíbrio, por analogia direta com o caso do cilindro-pistão. Para a barra na Fig. 2.9, a força externa pode ser aplicada de maneira que ela difira apenas levemente da força oposta interna. A tensão normal é então essencialmente uniforme ao longo da seção reta e pode ser determinada como uma função do comprimento instantâneo: $s = s(x)$. Da mesma maneira, para a película líquida mostrada na Fig. 2.10, a força externa pode ser aplicada à armação de arame móvel de modo que a força difira apenas levemente da força oposta no interior da película. Durante este processo, a tensão superficial é essencialmente uniforme ao longo de toda a película superficial e está relacionada à área instantânea: $\mathcal{J} = t(A)$. Em cada um desses casos, uma vez conhecida a relação funcional necessária, pode-se calcular o trabalho utilizando-se a Eq. 2.18 ou 2.19, respectivamente, em termos de propriedades do sistema como um todo à medida que ele passa por estados de equilíbrio.

TOME NOTA...

Alguns leitores podem optar por adiar a leitura das Seções 2.2.7 e 2.2.8 e seguir direto para a [Seção 2.3](#), na qual o conceito de energia é estendido.

Pode-se imaginar também outros sistemas submetidos a processos em quase equilíbrio. Por exemplo, é possível visualizar uma bateria sendo carregada ou descarregada em quase equilíbrio ajustando a diferença de potencial entre os terminais, de forma a ser ligeiramente maior ou menor do que um potencial ideal chamado de *força eletromotriz* da bateria (fem). A transferência de energia através de trabalho para a passagem de uma quantidade diferencial de carga *para* a bateria, dZ , é dada pela relação

$$\delta W = -\mathcal{E} dZ \quad (2.23)$$

Nessa equação \mathcal{E} representa a fem da bateria, uma propriedade intensiva da bateria, e não apenas a diferença de potencial entre os terminais, como na Eq. 2.22.

Considere a seguir um material dielétrico no interior de um *campo elétrico uniforme*. A transferência de energia por meio de trabalho do campo quando a polarização é levemente aumentada é

$$\delta W = -\mathbf{E} \cdot d(V\mathbf{P}) \quad (2.24)$$

em que o vetor \mathbf{E} é a intensidade do campo elétrico no interior do sistema, o vetor \mathbf{P} é o momento do dipolo elétrico por unidade de volume e V é o volume do sistema. Uma equação similar para a transferência de energia por meio de trabalho de um *campo magnético uniforme* quando a magnetização é levemente aumentada é

$$\delta W = -\mu_0 \mathbf{H} \cdot d(V\mathbf{M}) \quad (2.25)$$

na qual o vetor \mathbf{H} é a intensidade do campo magnético no interior do sistema, o vetor \mathbf{M} é o momento do dipolo magnético por unidade de volume e μ_0 é uma constante, a permeabilidade do vácuo. O sinal negativo que aparece nas três últimas equações está de acordo com nossa convenção de sinais estabelecida anteriormente para o trabalho: W recebe o sinal negativo quando a transferência de energia é *para* o sistema.

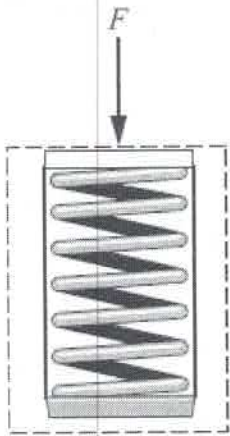
2.2.8 Forças e Deslocamentos Generalizados

A semelhança entre as expressões para o trabalho em processos de quase equilíbrio consideradas até agora é um fato que pode ser observado. Em cada caso, a expressão para o trabalho é escrita sob a forma de uma propriedade intensiva e a diferencial de uma propriedade extensiva. Isso é mostrado pela seguinte expressão, que permite que um ou mais desses modos de trabalho esteja presente em um processo

$$\delta W = p dV - \sigma d(Ax) - \tau dA - \mathcal{E} dZ - \mathbf{E} \cdot d(V\mathbf{P}) - \mu_0 \mathbf{H} \cdot d(V\mathbf{M}) + \dots \quad (2.26)$$

em que as reticências representam outros produtos de uma propriedade intensiva pela diferencial de uma propriedade extensiva relacionada, responsáveis pela realização de trabalho. Por causa da noção de que o trabalho é um produto de força por deslocamento, a propriedade intensiva nessas relações é às vezes chamada de força “generalizada”, e a propriedade extensiva é chamada de um deslocamento “generalizado”, embora as quantidades que compõem as expressões para o trabalho possam não trazer à mente forças e deslocamentos factíveis.

Devido à restrição fundamental de quase equilíbrio, a Eq. 2.26 não representa todos os tipos de trabalho de interesse prático. Um exemplo é dado por um agitador que agita um gás ou líquido considerado como sistema. Sempre que qualquer ação de cisalhamento ocorrer, o sistema necessariamente passa por estados de não equilíbrio. Para percebermos de modo mais completo as implicações do conceito de um processo em quase equilíbrio é necessário considerar a segunda lei da termodinâmica; portanto este conceito é discutido de novo no [Cap. 5](#), após a apresentação da segunda lei.



2.3 Ampliando Nosso Conhecimento sobre Energia

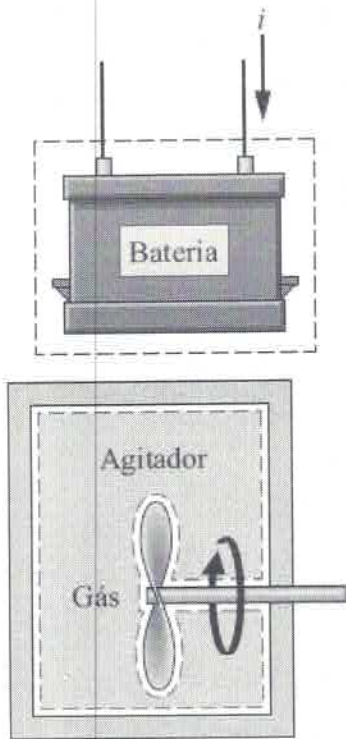
O objetivo desta seção é usar nosso profundo conhecimento sobre trabalho, obtido na [Seção 2.2](#), para ampliar nossa compreensão sobre a energia de um sistema. Em particular, consideramos a energia *total* de um sistema, que inclui a energia cinética, a energia potencial gravitacional e outras formas de energia. Os exemplos a seguir ilustram algumas dessas formas de energia. Muitos outros exemplos poderiam ser apresentados sobre a mesma ideia.

Quando se realiza trabalho para comprimir uma mola, armazena-se energia no interior da mola. Quando uma bateria é carregada, a energia armazenada em seu interior aumenta. E no momento em que um gás (ou líquido), inicialmente em um estado de equilíbrio em um reservatório fechado e isolado, é agitado com vigor e colocado em repouso até atingir um estado final de equilíbrio, a energia do gás aumenta durante o processo. De acordo com a discussão sobre trabalho na [Seção 2.2](#), pode-se pensar em outras maneiras em que o trabalho realizado sobre sistemas aumente a energia armazenada nesses sistemas – como o trabalho relacionado com a magnetização, por exemplo. Em cada um desses exemplos, a variação da energia do sistema não pode ser atribuída a variações na energia cinética ou potencial gravitacional *global* do sistema, dada pelas Eqs. 2.5 e 2.10, respectivamente. A variação de energia pode ser explicada em termos de *energia interna*, como é apresentado a seguir.

energia interna

Na termodinâmica aplicada à engenharia, considera-se que a variação da energia total de um sistema é composta de três contribuições *macroscópicas*. Uma é a variação da energia cinética, associada ao movimento do sistema *como um todo* em relação a um sistema de eixos coordenados externo. Outra é a variação da energia potencial gravitacional, associada à posição do sistema *como um todo* no campo gravitacional terrestre. Todas as outras variações de energia são reunidas na energia interna do sistema. Assim como a energia cinética e a energia potencial gravitacional, a *energia interna é uma propriedade extensiva* do sistema, como o é a energia total.

A energia interna é representada pelo símbolo U , e a variação de energia interna em um processo é $U_2 - U_1$. A energia interna específica é simbolizada por u ou u dependendo de ser expressa por unidade de massa ou em base molar, respectivamente.



A variação total de energia de um sistema é

$$E_2 - E_1 = (U_2 - U_1) + (EC_2 - EC_1) + (EP_2 - EP_1) \quad (2.27a)$$

ou

$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP \quad (2.27b)$$

Todas as quantidades na Eq. 2.27 são expressas em termos das unidades de energia apresentadas anteriormente.

Energia_Total
A.6 - Aba a



A identificação da energia interna como uma forma macroscópica de energia é um passo significativo no desenvolvimento em questão, pois separa o conceito de energia em termodinâmica daquele da mecânica. No Cap. 3 aprenderemos a calcular variações de energia interna em casos de importância prática envolvendo gases, líquidos e sólidos utilizando dados empíricos.

interpretação microscópica da energia interna para um gás

Para melhorar nossa compreensão sobre energia interna, considere um sistema que frequentemente encontraremos nas seções subsequentes deste livro, um sistema constituído de um gás contido em um tanque. Vamos desenvolver uma interpretação microscópica da energia interna pensando na energia atribuída aos movimentos e às configurações das moléculas individuais, átomos e partículas subatômicas que compõem a matéria no sistema. As moléculas do gás movem-se de um lado para o outro, encontrando outras moléculas ou as paredes do recipiente. Parte da energia interna do gás é a energia cinética de *translação* das moléculas. Outras contribuições para a energia interna incluem a energia cinética devida à *rotação* das moléculas em relação aos seus centros de massa e a energia cinética

outros dispositivos que produzem trabalho na saída a partir de uma entrada de energia por meio de transferência de calor. Para tais aplicações era conveniente considerar tanto o trabalho produzido quanto a entrada de energia por transferência de calor como quantidades positivas.

Modos_de_TC

A.7 – Aba a



o calor não é uma propriedade

A quantidade de calor transferida depende dos detalhes do processo, e não apenas dos estados inicial e final. Assim, do mesmo modo que o trabalho, o calor não é uma propriedade, e sua diferencial é escrita como δQ . A quantidade de energia transferida por calor durante um processo é dada pela integral

$$Q = \int_1^2 \delta Q \quad (2.28)$$

na qual os limites de integração significam “do estado 1 ao estado 2” e não se referem aos valores do calor nesses estados. Assim como para o trabalho, a noção de “calor” em um estado não tem sentido, e a integral *nunca* deve ser calculada como $Q_2 - Q_1$.

taxa de transferência de calor

A taxa de transferência de calor líquida é representada por \dot{Q} . A princípio, a quantidade de energia transferida sob a forma de calor durante um período de tempo pode ser calculada integrando-se do tempo t_1 ao tempo t_2

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (2.29)$$

Para realizar a integração, é necessário saber como a taxa de transferência de calor varia com o tempo.

Em alguns casos é conveniente utilizar o *fluxo de calor*, \dot{q} , que é a taxa de transferência de calor por unidade de área de superfície do sistema. A taxa líquida de transferência de calor, \dot{Q} , está relacionada ao fluxo de calor \dot{q} pela integral

$$\dot{Q} = \int_A \dot{q} dA \quad (2.30)$$

em que A representa a área na fronteira do sistema na qual ocorre a transferência de calor.

As unidades para a transferência de calor Q e a taxa de transferência de calor \dot{Q} são as mesmas apresentadas antes para W e \dot{W} , respectivamente. As unidades para o fluxo de calor são as da taxa de transferência de calor por unidade de área: kW/m^2 ou $\text{Btu/h} \cdot \text{ft}^2$.

adiabático

A palavra adiabático significa que *não há transferência de calor*. Assim, se um sistema passa por um processo que não envolve transferência de calor com sua vizinhança esse processo é chamado de *processo adiabático*.



Pesquisadores médicos descobriram que um aumento gradual da temperatura do tecido canceroso para 41-45°C leva a uma maior eficiência da quimioterapia e da radioterapia para alguns pacientes. Diferentes abordagens podem ser usadas, incluindo o aumento da temperatura do corpo inteiro com dispositivos de aquecimento e, de modo mais seletivo, por meio de feixes de micro-ondas ou ultrassom sobre o tumor ou órgão afetado. As especulações sobre o motivo do aumento de temperatura ser benéfico variam. Alguns dizem que isso ajuda a radioterapia a penetrar certos tumores mais facilmente por meio da dilatação dos vasos sanguíneos. Outros acham que isso ajuda a radioterapia em virtude do aumento da quantidade de oxigênio nas células do tumor, fazendo com que elas fiquem mais receptivas à radiação. Os pesquisadores informam que é necessário um estudo adicional antes que seja estabelecida a eficácia dessa abordagem e os mecanismos por meio dos quais os resultados positivos são alcançados.

2.4.2 Modos de Transferência de Calor

Métodos baseados em experimentos estão disponíveis para avaliar a transferência de energia sob a forma de calor. Esses métodos identificam dois mecanismos básicos de transferência: *condução* e *radiação térmica*. Além disso, relações empíricas estão disponíveis para avaliar a transferência de energia que envolve um modo *combinado* chamado *convecção*. Uma breve descrição de cada um desses modos é dada a seguir. Considerações mais detalhadas são deixadas para um curso de transferência de calor aplicado à engenharia, no qual esses tópicos são estudados em profundidade.

Condução

lei de Fourier

A transferência de energia por *condução* pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases. A condução pode ser imaginada como a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as partículas adjacentes que são menos energéticas, devido a interações entre as partículas. A taxa temporal de transferência de energia por condução é quantificada macroscopicamente pela *lei de Fourier*. Como uma aplicação elementar, considere a [Fig. 2.12](#), que mostra uma parede plana de espessura L em regime permanente, na qual a temperatura $T(x)$ varia linearmente com a posição x . Pela lei de Fourier, a taxa de transferência de calor através de qualquer plano normal à direção x , \dot{Q}_x , é proporcional à área da parede, A , e ao gradiente de temperatura na direção x , dT/dx :

$$\dot{Q}_x = -\kappa A \frac{dT}{dx} \tag{2.31}$$

em que a constante de proporcionalidade k é uma propriedade chamada de *condutividade térmica*. O sinal negativo é uma consequência da transferência de energia no sentido *decrecente* da temperatura.

► POR EXEMPLO no caso da [Fig. 2.12](#) a temperatura varia linearmente; assim, o gradiente de temperatura é

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} (< 0)$$

e a taxa de transferência de calor na direção x é, então,

$$\dot{Q}_x = -\kappa A \left[\frac{T_2 - T_1}{L} \right] \lll \lll \lll \lll \lll$$

Os valores para a condutividade térmica são dados na Tabela A-19 para materiais usuais. As substâncias com valores elevados de condutividade térmica, como o cobre, são boas condutoras, e aquelas com baixas condutividades (cortiça e espuma de poliestireno) são boas isolantes.

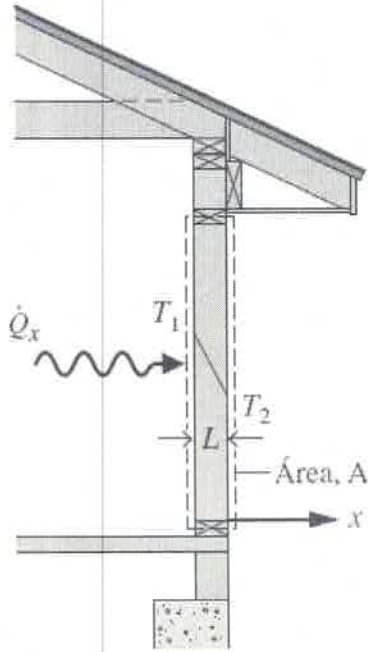


Fig. 2.12 Ilustração da lei de Fourier da condução de calor.

Modos_de_TC

A.7 – Aba b



Radiação

lei de Stefan-Boltzmann

A *radiação térmica* é emitida pela matéria como resultado de mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas no seu interior. A energia é transportada por ondas eletromagnéticas (ou fótons). Diferente da condução, a radiação térmica não necessita de nenhum meio para propagar-se, e pode até mesmo ocorrer no vácuo. As superfícies sólidas, os gases e os líquidos emitem, absorvem e transmitem radiação térmica em vários graus. A taxa na qual a energia é emitida, \dot{Q}_e , a partir de uma superfície de área A é quantificada macroscopicamente por uma forma modificada da lei de Stefan-Boltzmann

$$\dot{Q}_e = \epsilon \sigma A T_b^4 \quad (2.32)$$

que mostra que a radiação térmica está associada à quarta potência da temperatura absoluta da superfície, T_b . A emissividade, ϵ , é uma propriedade da superfície que indica a eficiência da superfície irradiante ($0 \leq \epsilon \leq 1,0$), e σ é a constante de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 = 0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°R}^4$$

Em geral, a taxa líquida de transferência de energia por radiação térmica entre duas superfícies envolve relações entre as propriedades das superfícies, suas orientações, em relação uma à outra, a extensão na qual o meio de

propagação espalha, emite e absorve radiação térmica, e outros fatores. Um caso especial que ocorre frequentemente é a troca de radiação entre uma superfície à temperatura T_b e uma superfície circunvizinha muito maior a T_s , como mostra a Fig. 2.13. A taxa líquida de troca radiante entre a superfície menor, cuja área é A e a emissividade é e , e a superfície circunvizinha muito maior é

$$\dot{Q}_e = \epsilon \sigma A [T_b^4 - T_s^4] \quad (2.33)$$

Modos de TC
A.7 – Aba d

A

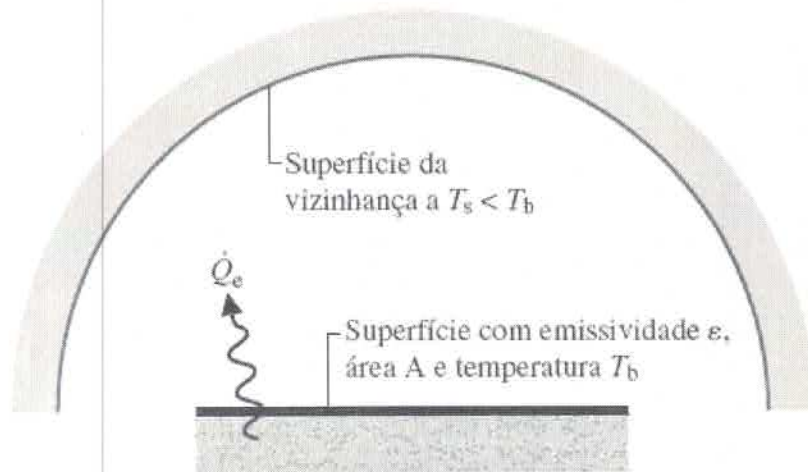


Fig. 2.13 Troca líquida de radiação.

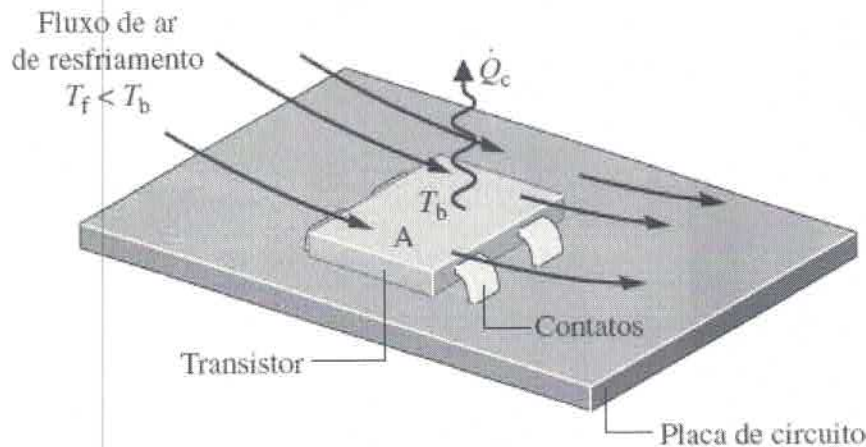


Fig. 2.14 Ilustração da lei do resfriamento de Newton.

Convecção

A transferência de energia entre uma superfície sólida a uma temperatura T_b e um gás ou líquido adjacente em movimento a uma outra temperatura T_f tem um papel importante no desempenho de muitos dispositivos de interesse prático. Essa transferência é usualmente denominada *convecção*. Como ilustração, considere a Fig. 2.14, em que $T_b > T_f$. Nesse caso, a energia é transferida *no sentido indicado pela seta* devido aos efeitos combinados da condução no ar e do movimento global do ar. A taxa de transferência de energia da superfície para o ar pode ser quantificada pela

seguinte expressão empírica:

$$\dot{Q}_c = hA(T_b - T_f) \quad (2.34)$$

lei do resfriamento de Newton

conhecida como lei do resfriamento de Newton. Na Eq. 2.34, A é a área da superfície, e o fator de proporcionalidade h é chamado de *coeficiente de transferência de calor*. Em aplicações subsequentes da Eq. 2.34 um sinal negativo pode ser introduzido no lado direito em conformidade com a convenção de sinais para transferência de calor apresentada na [Seção 2.4.1](#).

O coeficiente de transferência de calor *não* é uma propriedade termodinâmica. Ele é um parâmetro empírico que incorpora, na relação da transferência de calor, a natureza do padrão de escoamento próximo à superfície, as propriedades do fluido e a geometria. Quando ventiladores ou bombas provocam o movimento de um fluido, o valor do coeficiente de transferência de calor é geralmente maior do que quando ocorrem movimentos relativamente lentos induzidos por variação de massa específica. Essas duas categorias gerais são chamadas de *convecção forçada* e *livre* (ou natural), respectivamente. A [Tabela 2.1](#) fornece valores típicos para o coeficiente de transferência de calor para a convecção forçada e livre.

Modos_de_TC

A.7 – Aba c



TABELA 2.1

Valores Típicos do Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

Aplicações	h ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	h ($\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}$)
Convecção livre		
Gases	2–25	0,35–4,4
Líquidos	50–1000	8,8–180
Convecção forçada		
Gases	25–50	4,4–44
Líquidos	50–20.000	8,8–3500

2.4.3 Comentários Finais

O primeiro passo em uma análise termodinâmica é definir o sistema. Só depois da especificação da fronteira do sistema é possível considerar as interações de calor com a vizinhança, pois estas são *sempre* avaliadas na fronteira do sistema.

Na conversa diária o termo *calor* é frequentemente utilizado quando o termo *energia* seria mais correto termodinamicamente. Por exemplo, alguém poderia ouvir: “Por favor, feche a porta ou o ‘calor’ será perdido”. Em *termodinâmica*, o calor refere-se apenas a um meio particular através do qual a energia é transferida. Ele não se refere ao que está sendo transferido entre os sistemas ou ao que é armazenado nos sistemas. A energia é transferida e armazenada, não o calor.

Algumas vezes a transferência de energia sob a forma de calor para ou a partir de um sistema pode ser desprezada. Isso poderia ocorrer por diversas razões relacionadas aos mecanismos para a transferência de calor discutidos anteriormente. Uma delas poderia ser que os materiais que cercam o sistema são bons isolantes, ou que a transferência de calor não seria significativa porque há uma pequena diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança. Uma terceira razão seria não haver uma área superficial suficiente para permitir que uma transferência de calor significativa ocorra. Quando a transferência de calor é desprezada, uma ou mais dessas considerações se aplica.

Nas discussões a seguir o valor de Q é fornecido ou é uma incógnita na análise. Quando Q é fornecido pode-se considerar que o valor foi determinado pelos métodos apresentados. Se Q não é conhecido, o seu valor é usualmente calculado através do *balanço de energia*, discutido em seguida.

TOME NOTA...

O termo *calor* não se refere ao que está sendo transferido entre sistemas ou ao que está armazenado dentro dos sistemas. Energia é transferida e armazenada quando ocorre transferência de calor.

2.5 Contabilizando a Energia: Balanço de Energia para Sistemas Fechados

primeira lei da termodinâmica

Conforme nossas discussões anteriores indicaram, os *únicos caminhos* para variar a energia de um sistema fechado são através da transferência de energia por meio de trabalho ou de calor. Além disso, com base nos experimentos de Joule e outros, um aspecto fundamental do conceito de energia é que a *energia se conserva*; chamamos esse fato de primeira lei da termodinâmica. Para mais detalhes sobre a primeira lei, veja o boxe a seguir.

Os Experimentos de Joule e a Primeira Lei

Em experimentos clássicos conduzidos no início do século XIX, Joule estudou processos através dos quais um sistema fechado passa de um estado de equilíbrio a outro. Em particular, ele considerou processos que envolvem interações de trabalho, mas não interações de calor, entre o sistema e sua vizinhança. Qualquer desses processos é um *processo adiabático*, de acordo com a discussão da [Seção 2.4.1](#).

Com base em seus experimentos, Joule deduziu que o valor do trabalho líquido é o mesmo para *todos* os processos adiabáticos entre dois estados de equilíbrio. Em outras palavras, o valor do trabalho líquido realizado por ou sobre um sistema fechado que passa por um processo adiabático entre dois estados dados *depende somente dos estados inicial e final*, e não dos detalhes do processo adiabático.

Se o trabalho líquido é o mesmo para todos os processos adiabáticos em sistemas fechados entre os estados inicial e final, pode-se concluir da definição de propriedade ([Seção 1.3](#)) que o trabalho líquido para tais processos é a variação de alguma propriedade do sistema. Essa propriedade é chamada de *energia*.

Com base no argumento de Joule, a *variação de energia* entre dois estados é *definida* por

$$E_2 - E_1 = -W_{ad} \quad (a)$$

em que o símbolo E denota a energia de um sistema e W_{ad} representa o trabalho líquido para *qualquer* processo adiabático entre os dois estados. O sinal negativo antes do termo do trabalho está de acordo com a convenção de sinais para o trabalho, estabelecida previamente. Por fim, observe que como qualquer valor arbitrário E_1 pode ser atribuído à energia de um sistema em um dado estado 1, nenhum significado especial pode ser associado ao valor da energia no estado 1 ou em *qualquer* outro estado. Somente as *variações* de energia de um sistema possuem significado.

A discussão precedente é baseada em provas experimentais, a começar pelos experimentos de Joule. Em razão das incertezas experimentais inevitáveis não é possível provar através de medidas que o trabalho líquido é *exatamente* o mesmo para *todos* os processos adiabáticos entre os mesmos estados inicial e final. Entretanto, evidências experimentais apoiam essa conclusão e, portanto, adota-se como um princípio fundamental que o trabalho é realmente o mesmo. Esse princípio é uma formulação alternativa da *primeira lei*, e foi usado pelos cientistas e engenheiros subsequentes como um trampolim para o desenvolvimento do conceito de *conservação de energia* e do *balanço de energia* como os conhecemos hoje.

Resumindo os Conceitos de Energia

Todos os aspectos de energia apresentados neste livro até o momento podem ser resumidos através de:

$$\left[\begin{array}{c} \text{variação da quantidade} \\ \text{de energia contida no} \\ \text{sistema durante um} \\ \text{certo intervalo de} \\ \text{tempo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{quantidade líquida de} \\ \text{energia transferida para} \\ \text{dentro através da} \\ \text{fronteira do sistema por} \\ \text{transferência de calor} \\ \text{durante o intervalo de tempo} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{quantidade líquida de} \\ \text{energia transferida para} \\ \text{fora através da} \\ \text{fronteira do sistema por} \\ \text{trabalho durante o} \\ \text{intervalo de tempo} \end{array} \right]$$

Essa declaração é apenas um balanço contábil para a energia, um balanço de energia. Ele requer que em qualquer processo para um sistema fechado a energia do sistema aumente ou diminua de uma quantidade igual à quantidade líquida de energia transferida através da fronteira.

A expressão *quantidade líquida* usada no enunciado do balanço de energia deve ser interpretada com cuidado, já que pode haver transferências de energia por meio de calor ou trabalho em muitas posições diferentes da fronteira de um sistema. Em alguns locais as transferências de energia podem ser para o sistema, enquanto em outros são para fora do sistema. Os dois termos no lado direito são responsáveis pelos resultados líquidos de todas as transferências de energia por meio de calor e de trabalho, respectivamente, que ocorrem durante o intervalo de tempo considerado.

balanço de energia

O balanço de energia pode ser descrito pela expressão

$$E_2 - E_1 = Q - W \quad (2.35a)$$

Introduzindo a Eq. 2.27, uma forma alternativa é dada por

$$\Delta EC + \Delta EP + \Delta U = Q - W \quad (2.35b)$$

que mostra que uma transferência de energia através da fronteira do sistema resulta em uma variação de uma ou mais formas macroscópicas de energia: energia cinética, energia potencial gravitacional e energia interna. Todas as referências anteriores relativas à energia como uma quantidade que se conserva estão incluídas como casos especiais

das expressões da Eq. 2.35.

Observe que os sinais algébricos antes dos termos de calor e trabalho das expressões relativas à Eq. 2.35 são diferentes. Isso é consequência da convenção de sinais adotada anteriormente. Um sinal negativo aparece antes de W porque a transferência de energia por meio de trabalho *do* sistema *para* a vizinhança é considerada positiva. Um sinal positivo aparece antes de Q porque este é considerado positivo quando a transferência de energia por calor ocorre *da* vizinhança *para* o sistema.

Bal_de_Energia_Sis_Fechados

A.8 – Todas as Abas



BIOCONEXÕES

A energia requerida pelos animais para viverem é oriunda da oxidação da comida ingerida. Com frequência, falamos que a comida é *queimada* no corpo humano. Essa é uma expressão apropriada, porque os experimentos mostram que quando a comida é queimada com oxigênio em uma câmara, aproximadamente é liberada a mesma energia de quando a comida é oxidada no corpo. Assim como ocorre com o dispositivo experimental perfeitamente isolado apresentado na Fig. 2.15, que corresponde a um *calorímetro* a volume constante.

Uma amostra de comida, pesada com cuidado, é colocada na câmara de um calorímetro junto com oxigênio (O_2). Toda a câmara se encontra submersa no banho de água do calorímetro. Os conteúdos da câmara são, então, inflamados eletricamente, oxidando completamente a amostra de comida. A energia liberada durante a reação no interior da câmara resulta em um aumento da temperatura do calorímetro. Com o aumento de temperatura medido, a energia liberada pode ser calculada através de um balanço de energia, considerando o calorímetro como sistema. Esse é o valor da caloria da amostra de comida, informado usualmente em termos de quilocaloria (kcal), como pode ser visto no item “calorias” nos rótulos dos alimentos.

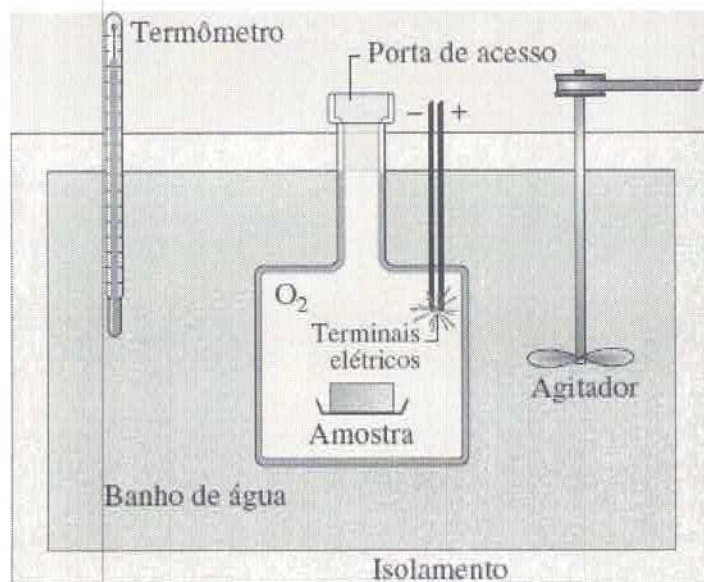


Fig. 2.15 Calorímetro a volume constante.

2.5.1 Aspectos Importantes do Balanço de Energia

Várias formas especiais de balanço de energia podem ser escritas. Por exemplo, o balanço de energia na forma diferencial é

$$dE = \delta Q - \delta W \quad (2.36)$$

sendo que dE é a diferencial da energia, uma propriedade. Como Q e W não são propriedades, suas diferenciais são escritas como δQ e δW , respectivamente.

balanço de energia na forma de taxa temporal

O balanço de energia na forma de taxa temporal é

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.37)$$

A forma da taxa do balanço de energia expressa em palavras é

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa de variação} \\ \text{temporal da energia} \\ \text{contida no sistema} \\ \text{no tempo } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{taxa líquida de} \\ \text{transferência de} \\ \text{calor para dentro} \\ \text{no tempo } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{taxa líquida na} \\ \text{qual a energia está} \\ \text{sendo transferida} \\ \text{para fora por} \\ \text{trabalho no tempo } t \end{array} \right]$$

Como a taxa temporal de variação de energia é dada por

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dEC}{dt} + \frac{dEP}{dt} + \frac{dU}{dt}$$

A Eq. 2.37 pode ser expressa alternativamente como

$$\frac{dEC}{dt} + \frac{dEP}{dt} + \frac{dU}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.38)$$

As Eqs. 2.35 a 2.38 fornecem formas alternativas para o balanço de energia que são pontos de partida convenientes para a aplicação do princípio da conservação da energia a sistemas fechados. No [Cap. 4](#) o princípio da conservação de energia é expresso sob formas adequadas para a análise em volumes de controle. Quando aplicarmos o balanço de energia em *qualquer* das suas formas, é importante tomar cuidado com os sinais e unidades e fazer a distinção cuidadosa entre taxas e quantidades. Além disso, é importante reconhecer que a localização da fronteira do sistema pode ser relevante para determinar se uma transferência de energia específica será considerada como calor ou trabalho.

► **POR EXEMPLO** considere a [Fig. 2.16](#), na qual são mostrados três sistemas alternativos que incluem uma quantidade de gás (ou líquido) em um recipiente rígido, bem isolado. Na [Fig. 2.16a](#) o próprio gás é o sistema. Conforme a corrente passa através da placa de cobre há uma transferência de energia da placa de cobre para o gás. Já que essa transferência de energia ocorre como resultado de uma diferença de temperatura entre a placa e o gás, ela é classificada como transferência de calor. Em seguida, considere a [Fig. 2.16b](#), na qual a fronteira é desenhada de modo a incluir a placa de cobre. Conclui-se, da definição termodinâmica de trabalho, que a transferência de energia que ocorre conforme a corrente atravessa a fronteira desse sistema deve ser considerada como trabalho. Por fim, na [Fig. 2.16c](#) a fronteira está localizada de maneira que nenhuma energia é transferida através dela por meio de calor ou trabalho. ◀◀◀◀◀◀

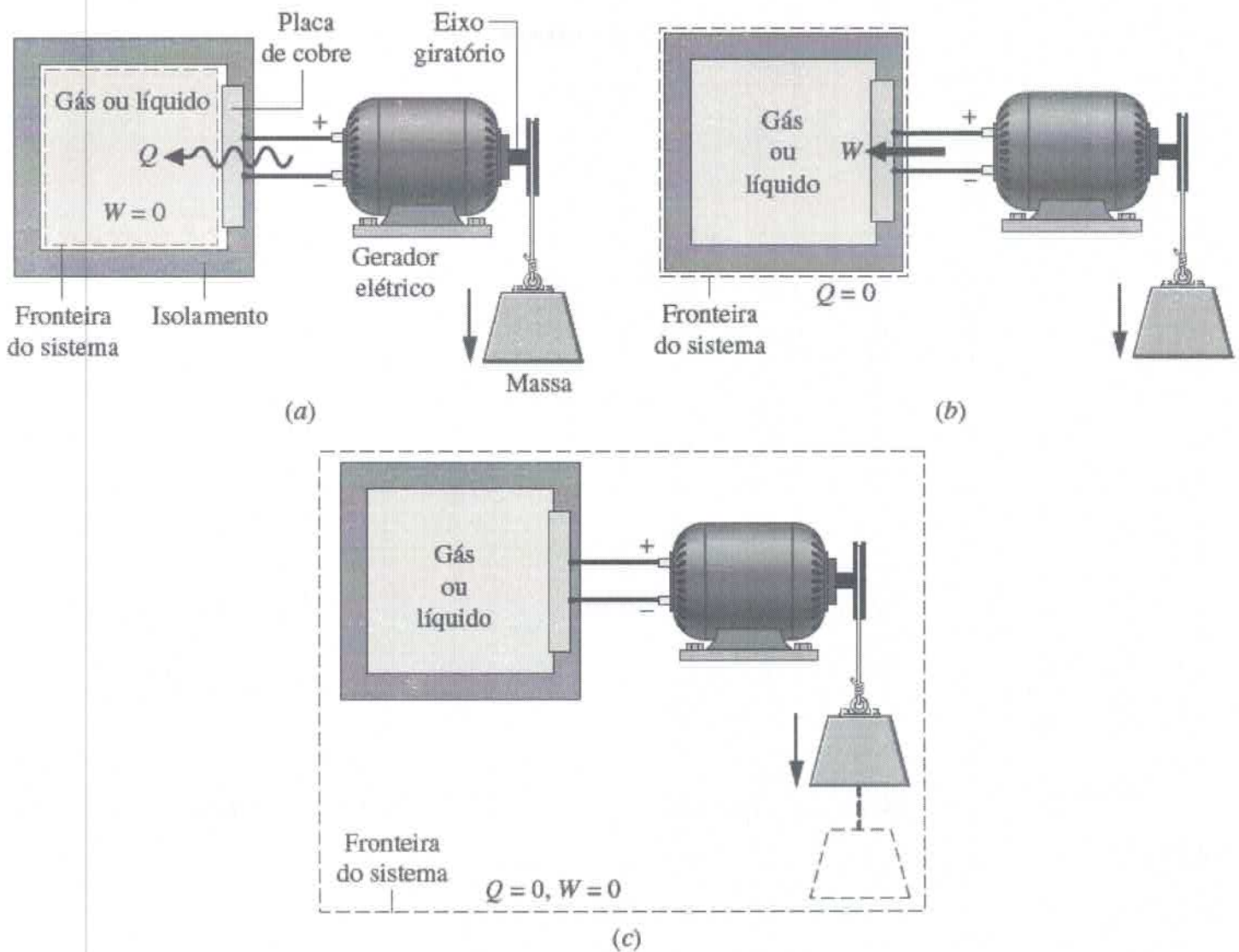


Fig. 2.16 Escolhas alternativas para a fronteira de um sistema.

Comentários Finais

Até agora, tivemos o cuidado de enfatizar que as quantidades simbolizadas por W e Q nas equações anteriores são responsáveis por transferências de *energia* e não por transferências de trabalho e calor, respectivamente. Os termos trabalho e calor indicam *meios* diferentes pelos quais a energia é transferida, e não *o que* é transferido. Entretanto, por economia de expressão nas discussões subsequentes, W e Q são com frequência referidos simplesmente como transferência de trabalho e calor, respectivamente. Essa maneira de falar mais informal é bastante usada na prática de engenharia.

TOME NOTA...

Os termos *trabalho* e *calor* indicam formas de transferência de energia. No entanto, informalmente refere-se a W e Q como *trabalho realizado* e *calor transferido*.

Os cinco exemplos fornecidos nas Seções 2.5.2 a 2.5.4 trazem ideias importantes sobre energia e o balanço de energia. Eles devem ser estudados com cuidado, e abordagens similares devem ser usadas para resolver os problemas do final do capítulo. Neste livro, a maioria das aplicações do balanço de energia não envolverá variações significativas de energia cinética ou potencial. Assim, para acelerar as soluções dos muitos exemplos subsequentes e

dos problemas ao final do capítulo indicaremos no enunciado do problema que estas variações podem ser desprezadas. Se isso não estiver explícito no enunciado do problema você deve decidir, com base no problema em estudo, qual a melhor maneira de lidar com os termos de energia cinética e potencial no balanço de energia.

2.5.2 Utilizando o Balanço de Energia: Processos em Sistemas Fechados

Os dois exemplos a seguir ilustram o uso do balanço de energia para processos em sistemas fechados. Nesses exemplos são fornecidos dados para a energia interna. No Cap. 3 aprenderemos como obter a energia interna e outros dados de propriedades termodinâmicas, utilizando tabelas, gráficos e programas de computador.

EXEMPLO 2.2 ▶

Resfriando um Gás em um Cilindro-Pistão

Um conjunto cilindro-pistão contém 0,4 kg de um certo gás. O gás está sujeito a um processo no qual a relação pressão-volume é

$$pV^{1,5} = \text{constante}$$

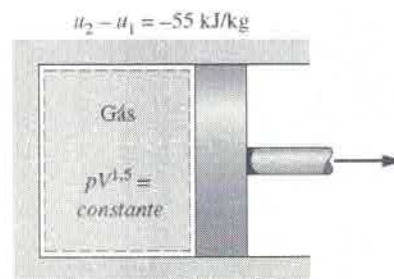
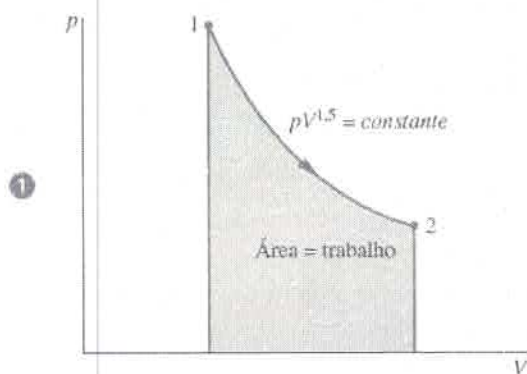
A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de 0,1 m³ e o volume final é de 0,2 m³. A variação da energia interna específica do gás no processo é $u_2 - u_1 = -55$ kJ/kg. Não há variação significativa da energia cinética ou potencial. Determine a transferência de calor líquida para o processo, em kJ.

SOLUÇÃO

Dado: Um gás em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo de expansão para o qual são especificadas a relação pressão-volume e a variação da energia interna específica.

Pede-se: Determine a transferência de calor líquida para o processo.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O gás é um sistema fechado.
2. O processo é descrito por $pV^{1,5} = \text{constante}$.
3. Não há variação da energia cinética ou potencial do sistema.

Fig. E2.2

Análise: Um balanço de energia para o sistema fechado toma a forma

$$\Delta E_C^0 + \Delta E_P^0 + \Delta U = Q - W$$

na qual os termos das energias cinética e potencial tornam-se nulos pela hipótese 3. Então, escrevendo ΔU em termos das energias internas específicas o balanço de energia se torna

$$m(u_2 - u_1) = Q - W$$

em que m é a massa do sistema. Resolvendo para Q

$$Q = m(u_2 - u_1) + W$$

O valor do trabalho para esse processo é determinado na parte (a) da solução do Exemplo 2.1: $W = +17,6$ kJ. A variação da energia interna é obtida utilizando-se os dados fornecidos

$$m(u_2 - u_1) = 0,4 \text{ kg} \left(-55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = -22 \text{ kJ}$$

Substituindo os valores

$$\textcircled{2} \quad Q = -22 + 17,6 = -4,4 \text{ kJ}$$

1 A relação fornecida entre a pressão e o volume permite que o processo seja representado pelo caminho mostrado no diagrama correspondente. A área sob a curva representa o trabalho. Como não são propriedades, os valores do trabalho e da transferência de calor dependem dos detalhes do processo e não podem ser determinados a partir dos estados inicial e final somente.

2 O sinal negativo para o valor de Q significa que uma quantidade líquida de energia foi transferida do sistema para a vizinhança por transmissão de calor.

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- aplicar o balanço de energia a um sistema fechado.

Teste-Relâmpago

Se o gás percorre um processo no qual $pV = \text{constante}$ e $\Delta u = 0$, determine a transferência de calor, em kJ, mantendo fixos a pressão inicial e os volumes fornecidos. **Resposta:** 20,79 kJ.

No próximo exemplo retomamos a discussão da Fig. 2.16, considerando dois sistemas alternativos. Esse exemplo ressalta a necessidade de levar em conta corretamente as interações de calor e trabalho que ocorrem na fronteira, assim como a variação de energia.

EXEMPLO 2.3 ▶

Considerando Sistemas Alternativos

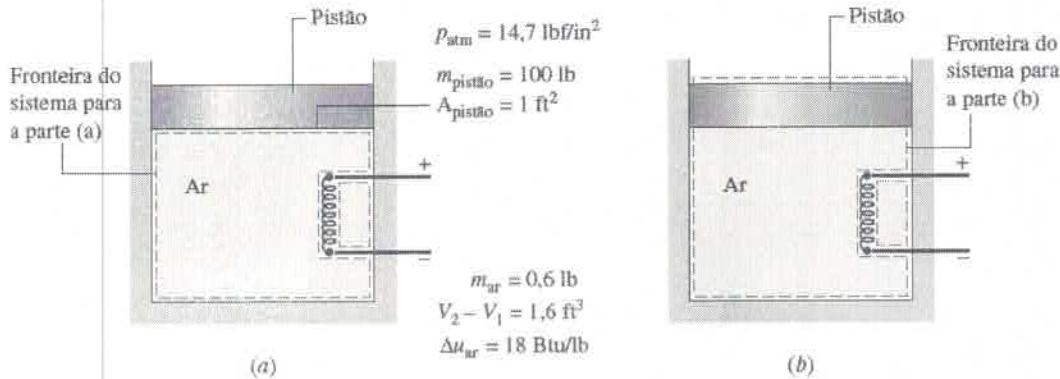
Ar está contido em um conjunto cilindro-pistão vertical equipado com uma resistência elétrica. A atmosfera exerce uma pressão de $14,7 \text{ lbf/in}^2$ ($101,3 \text{ kPa}$) no topo do pistão, que possui uma massa de 100 lb ($45,4 \text{ kg}$) e cuja área da face é de 1 ft^2 ($0,09 \text{ m}^2$). Uma corrente elétrica passa através da resistência e o volume de ar aumenta lentamente de $1,6 \text{ ft}^3$ ($0,04 \text{ m}^3$), enquanto sua pressão permanece constante. A massa do ar é $0,6 \text{ lb}$ ($0,27 \text{ kg}$) e sua energia interna específica aumenta de 18 Btu/lb ($41,9 \text{ kJ/kg}$). O ar e o pistão estão em repouso no início e no fim do processo. O material do cilindro-pistão é um composto cerâmico e, portanto, um bom isolante. O atrito entre o pistão e a parede do cilindro pode ser desprezado, e a aceleração da gravidade é $g = 32,0 \text{ ft/s}^2$ ($9,7 \text{ m/s}^2$). Determine a transferência de calor da resistência para o ar, em Btu, para um sistema composto de **(a)** apenas ar, **(b)** ar e pistão.

SOLUÇÃO

Dado: São fornecidos dados relativos ao ar contido em um conjunto cilindro-pistão vertical equipado com uma resistência elétrica.

Pede-se: Considerando cada um dos dois sistemas alternativos, determinar a transferência de calor da resistência para o ar.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

- Dois sistemas fechados são considerados, como ilustrado nos diagramas.
- A única transferência de calor significativa é da resistência para o ar, durante a qual o ar se expande lentamente e sua pressão permanece constante.
- Não há variação líquida na energia cinética; a variação da energia potencial do ar é desprezível, e já que o material do pistão é um bom isolante, a energia interna do pistão não é afetada pela transferência de calor.
- O atrito entre o pistão e a parede do cilindro é desprezível.
- A aceleração da gravidade é constante; $g = 32,0 \text{ ft/s}^2$.

Fig. E2.3

Análise: (a) Considerando o ar como o sistema, o balanço de energia, Eq. 2.35, reduz-se, com a hipótese 3, a

$$(\Delta E C^0 + \Delta E P^0 + \Delta U)_{ar} = Q - W$$

Ou, resolvendo para Q

$$Q = W + \Delta U_{ar}$$

Para esse sistema, o trabalho é realizado pela força da pressão p que atua no *fundo* do pistão conforme o ar se expande. Com a Eq. 2.17 e a hipótese de pressão constante

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1)$$

Para determinar a pressão p , usamos um balanço de forças no pistão sem atrito que se move lentamente. A força para cima, exercida pelo ar sobre o *fundo* do pistão, é igual ao peso do pistão mais a força para baixo da atmosfera que atua no *topo* do pistão. Assim

$$p A_{pistão} = m_{pistão} g + p_{atm} A_{pistão}$$

Resolvendo para p e inserindo os valores

$$p = \frac{m_{\text{pistão}} g}{A_{\text{pistão}}} + p_{\text{atm}}$$
$$= \frac{(100 \text{ lb})(32,0 \text{ ft/s}^2) \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,2 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} \right| + 14,7 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}}{1 \text{ ft}^2} = 15,4 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$$

Assim, o trabalho é

$$W = p(V_2 - V_1)$$
$$= \left(15,4 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \right) (1,6 \text{ ft}^3) \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right| = 4,56 \text{ Btu}$$

Com $\Delta U_{\text{ar}} = m_{\text{ar}}(\Delta u_{\text{ar}})$, a transferência de calor é

$$Q = W + m_{\text{ar}}(\Delta u_{\text{ar}})$$
$$= 4,56 \text{ Btu} + (0,6 \text{ lb}) \left(18 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) = 15,36 \text{ Btu}$$

(b) Considere a seguir um sistema composto pelo ar e pelo pistão. A variação de energia do sistema global é a soma das variações de energia do ar e do pistão. Assim, o balanço de energia, Eq. 2.35, é dado por

$$(\Delta CE^0 + \Delta EP^0 + \Delta U)_{\text{ar}} + (\Delta CE^0 + \Delta EP + \Delta U^0)_{\text{pistão}} = Q - W$$

em que os termos indicados se cancelam pela hipótese 3. Resolvendo para Q

$$Q = W + (\Delta EP)_{\text{pistão}} + (\Delta U)_{\text{ar}}$$

Para esse sistema, trabalho é realizado no *topo* do pistão à medida que este empurra a atmosfera vizinha. Aplicando a Eq. 2.17

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p_{\text{atm}}(V_2 - V_1)$$
$$= \left(14,7 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \right) (1,6 \text{ ft}^3) \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right| = 4,35 \text{ Btu}$$

A variação de altura, Δz , necessária para calcular a variação de energia potencial do pistão, pode ser encontrada a partir da variação do volume do ar e da área da face do pistão

$$\Delta z = \frac{V_2 - V_1}{A_{\text{pistão}}} = \frac{1,6 \text{ ft}^3}{1 \text{ ft}^2} = 1,6 \text{ ft}$$

Então, a variação da energia potencial do pistão é

$$\begin{aligned}
 (\Delta EP)_{\text{pistão}} &= m_{\text{pistão}} g \Delta z \\
 &= (100 \text{ lb}) \left(32,0 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right) (1,6 \text{ ft}) \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,2 \text{ lb} \cdot \text{ft}/\text{s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right| = 0,2 \text{ Btu}
 \end{aligned}$$

Finalmente,

$$\begin{aligned}
 Q &= W + (\Delta EP)_{\text{pistão}} + m_{\text{ar}} \Delta u_{\text{ar}} \\
 &= 4,35 \text{ Btu} + 0,2 \text{ Btu} + (0,6 \text{ lb}) \left(18 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) = 15,35 \text{ Btu}
 \end{aligned}$$

1 2 Arredondando o valor obtido, observa-se que ele concorda com o resultado da parte (a).

1 Embora o valor de Q seja o mesmo para cada sistema, observe que os valores de W diferem. Observe, também, que as variações de energia diferem dependendo do sistema, que pode ser constituído apenas pelo ar ou pelo ar e o pistão.

2 Para o sistema da parte (b), o seguinte *balanço de energia* apresenta a contabilidade completa da transferência de energia por meio de calor para o sistema:

Energia que Entra por Transferência de Calor

15,35 Btu

Disposição da Energia que Entra

- Energia armazenada

Energia interna do ar 10,8 Btu (70,4%)

Energia potencial do pistão 0,2 Btu (1,3%)

- Energia que sai por trabalho 4,35 Btu (28,3%)

15,35 Btu (100%)

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir sistemas fechados alternativos e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- calcular o trabalho usando a Eq. 2.17.
- aplicar o balanço de energia a um sistema fechado.

desenvolver um balanço de energia.

Teste-Relâmpago

Qual a variação da energia potencial do ar, em Btu? **Resposta:** $1,23 \times 10^{-3}$ Btu.

2.5.3 Utilizando o Balanço da Taxa de Energia: Operação em Regime Permanente

Um sistema está em regime permanente se nenhuma das suas propriedades varia ao longo do tempo (Seção 1.3). Muitos dispositivos operam em regime permanente ou próximo do regime permanente, significando que as variações das propriedades com o tempo são pequenas o suficiente para serem ignoradas. Os dois exemplos a seguir ilustram a aplicação da equação da energia sob a forma de taxa a sistemas fechados em regime permanente.

EXEMPLO 2.4 ▶

Avaliando as Taxas de Transferência de Energia de uma Caixa de Redução em Regime Permanente

Durante uma operação em regime permanente, uma caixa de redução recebe 60 kW através do eixo de entrada e fornece potência através do eixo de saída. Considerando a caixa de redução como sistema, a taxa de transferência de energia por convecção é

$$\dot{Q} = -hA(T_b - T_f)$$

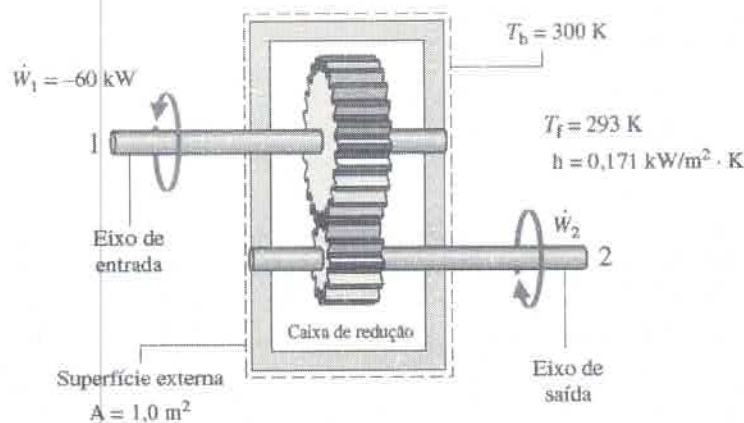
em que $h = 0,171 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ é o coeficiente de transferência de calor, $A = 1,0 \text{ m}^2$ é a área da superfície externa da caixa de redução, $T_b = 300 \text{ K}$ (27°C) é a temperatura da superfície externa e $T_f = 293 \text{ K}$ (20°C) é a temperatura do ar da vizinhança longe das imediações da caixa de câmbio. Para a caixa de engrenagens, calcule a taxa de transferência de calor e a potência fornecida através do eixo de saída, ambas em kW.

SOLUÇÃO

Dado: Uma caixa de redução opera em regime permanente com uma potência de entrada conhecida. Uma expressão para a taxa de transferência de calor da superfície externa também é conhecida.

Pede-se: Determine a taxa de transferência de calor e a potência fornecida através do eixo de saída, ambas em kW.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. A caixa de redução é um sistema fechado em regime permanente.
2. Para a caixa de redução, o modo de transferência de calor dominante é a convecção.

Fig. E2.4

Análise: Utilizando a expressão dada para \dot{Q} junto com os dados conhecidos, a taxa de energia transferida por meio

de calor é

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= -hA(T_b - T_f) \\ &= -\left(0,171 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right)(1,0 \text{ m}^2)(300 - 293) \text{ K} \\ &= -1,2 \text{ kW}\end{aligned}$$

O sinal negativo para \dot{Q} indica que a energia é *retirada* da caixa de redução por transferência de calor.

O balanço da taxa de energia, Eq. 2.37, em regime permanente, reduz-se a

$$\frac{dE^0}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \quad \text{ou} \quad \dot{W} = \dot{Q}$$

O símbolo \dot{W} representa a potência *líquida* do sistema. A potência líquida é a soma de \dot{W}_1 com a potência de saída \dot{W}_2

$$\dot{W} = \dot{W}_1 + \dot{W}_2$$

Com essa expressão para \dot{W} o balanço da taxa de energia torna-se

$$\dot{W}_1 + \dot{W}_2 = \dot{Q}$$

Resolvendo para \dot{W}_2 inserindo $\dot{Q} = -1,2 \text{ kW}$ e $\dot{W}_1 = -60 \text{ kW}$, no qual o sinal negativo é necessário porque o eixo de entrada traz energia *para* o sistema, temos

$$\begin{aligned}\dot{W}_2 &= \dot{Q} - \dot{W}_1 \\ &= (-1,2 \text{ kW}) - (-60 \text{ kW}) \\ &= +58,8 \text{ kW}\end{aligned}$$

O sinal positivo para \dot{W}_2 indica que a energia é transferida do sistema, através do eixo de saída, como esperado.

De acordo com a convenção de sinais para a taxa de transferência de calor no balanço da taxa de energia (Eq. 2.37), a Eq. 2.34 é escrita com um sinal negativo: \dot{Q} é negativo desde que T_b seja maior do que T_f .

As propriedades de um sistema em regime permanente não variam com o tempo. A energia E é uma propriedade, mas a transferência de calor e o trabalho não são propriedades.

Para esse sistema, a transferência de energia por trabalho ocorre em dois locais distintos, e o sinal associado aos seus valores é diferente.

No regime permanente, a taxa de transferência de calor da caixa de redução é responsável pela diferença entre a potência de entrada e de saída. Isso pode ser resumido pelo seguinte “balanço” da taxa de energia em termos das *magnitudes*:

Saída	Entrada
60 k W (eixo de entrada)	58,8 k W (eixo de saída) 1,2 W k (transferência de calor)
Total: 60 kW	60 kW

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- calcular a taxa de energia transferida por convecção.
- aplicar o balanço da taxa de energia para uma operação em regime permanente.
- desenvolver um balanço da taxa de energia.

Teste-Relâmpago

Considerando uma emissividade de 0,8 e que $T_s = T_f$, use a Eq. 2.33 para determinar a taxa líquida na qual a energia é irradiada da superfície externa da caixa de redução, em kW. **Resposta:** 0,03 kW.

EXEMPLO 2.5 ▶

Determinando a Temperatura da Superfície de um Chip de Silício em Regime Permanente

Um chip de silício medindo 5 mm de lado e 1 mm de espessura está inserido num substrato cerâmico. Em regime permanente, o chip tem uma potência elétrica de entrada de 0,225 W. A superfície superior do chip está exposta a um refrigerante cuja temperatura é de 20°C. O coeficiente de transferência de calor para a convecção entre o chip e o refrigerante é $150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Se a transferência de calor por condução entre o chip e o substrato for desprezível, determine a temperatura da superfície do chip, em °C.

SOLUÇÃO

Dado: A superfície superior de um chip de silício de dimensões conhecidas é exposta a um refrigerante. A potência elétrica de entrada e o coeficiente de transferência de calor por convecção são conhecidos.

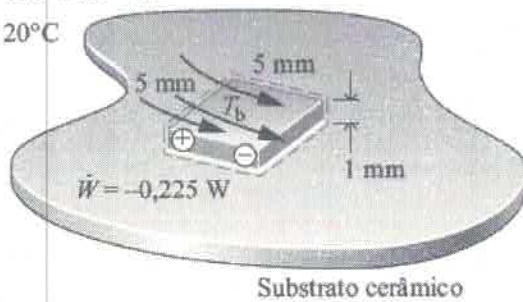
Pede-se: Determine a temperatura da superfície do chip em regime permanente.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

Refrigerante

$$h = 150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_f = 20^\circ\text{C}$$



Modelo de Engenharia:

1. O chip é um sistema fechado em regime permanente.
2. Não há transferência de calor entre o chip e o substrato.

Fig. E2.5

Análise: A temperatura da superfície do chip, T_b , pode ser determinada utilizando o balanço de taxa de energia, Eq. 2.37, que em regime permanente reduz-se a

1

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

Com a hipótese 2, a única transferência de calor é por convecção para o refrigerante. Nessa aplicação, a lei do resfriamento de Newton, Eq. 2.34, toma a forma

2

$$\dot{Q} = -hA(T_b - T_f)$$

Juntando as duas equações

$$0 = -hA(T_b - T_f) - \dot{W}$$

Resolvendo para T_b

$$T_b = \frac{-\dot{W}}{hA} + T_f$$

Nessa expressão, $\dot{W} = -0,225 \text{ W}$, $A = 25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $h = 150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ e $T_f = 293 \text{ K}$, assim

$$\begin{aligned} T_b &= \frac{-(-0,225 \text{ W})}{(150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(25 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} + 293 \text{ K} \\ &= 353 \text{ K} (80^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

1 As propriedades de um sistema em regime permanente não variam com o tempo. A energia E é uma propriedade, mas a transferência de calor e o trabalho não são propriedades.

2 De acordo com a convenção de sinais para a transferência de calor no balanço da taxa de energia (Eq. 2.37), a Eq. 2.34 é escrita com um sinal negativo: \dot{Q} é negativo desde que T_b seja maior do que T_f .

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- calcular a taxa de energia transferida por convecção.
- aplicar o balanço da taxa de energia para uma operação em *regime permanente*.

Teste-Relâmpago

Se a temperatura da superfície do chip não deve ser maior do que 60°C, qual a gama de valores correspondentes requerida para o coeficiente de transferência de calor por convecção, admitindo que todas as outras grandezas permaneçam constantes? **Resposta:** $h \geq 225 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

2.5.4 Utilizando o Balanço da Taxa de Energia: Operação em Regime Transiente

Muitos dispositivos estão sujeitos a períodos de operação transiente, nos quais o estado varia com o tempo. Isso é observado durante os períodos de partida e parada. O próximo exemplo ilustra a aplicação do balanço da taxa de energia a um motor elétrico durante a partida. O exemplo também envolve tanto trabalho elétrico quanto potência transmitida por um eixo.

EXEMPLO 2.6 ▶

Investigando a Operação Transiente de um Motor

A taxa de transferência de calor entre um certo motor elétrico e sua vizinhança varia com o tempo conforme

$$\dot{Q} = -0,2[1 - e^{(-0,05t)}]$$

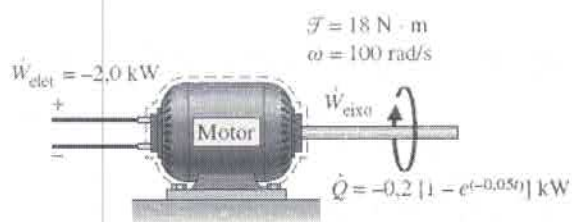
sendo t em segundos e \dot{Q} em kW. O eixo do motor gira a uma velocidade constante de $\omega = 100 \text{ rad/s}$ (cerca de 955 revoluções por minuto, ou RPM) e aplica um torque constante de $\mathcal{J} = 18 \text{ N} \cdot \text{m}$ a uma carga externa. O motor consome uma potência elétrica de entrada constante e igual a 2,0 kW. Para o motor, represente graficamente \dot{Q} e \dot{W} , ambos em kW, e a variação de energia ΔE , em kJ, como funções do tempo, de $t = 0$ a $t = 120 \text{ s}$. Discuta.

SOLUÇÃO

Dado: Um motor opera com potência elétrica de entrada, velocidade de eixo e torque aplicado constantes. A taxa de transferência de calor variando com o tempo entre o motor e sua vizinhança é conhecida.

Pede-se: Represente graficamente, \dot{Q} , \dot{W} e ΔE versus o tempo. Discuta.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia: O sistema ilustrado no esboço correspondente é um sistema fechado.

Fig. E2.6a

Análise: A taxa temporal de variação da energia do sistema é

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

\dot{W} representa a potência líquida do sistema: a soma da potência associada à rotação do eixo, \dot{W}_{eixo} , com a potência associada ao fluxo de eletricidade, \dot{W}_{elet} :

$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{eixo}} + \dot{W}_{\text{elet}}$$

A taxa \dot{W}_{elet} é conhecida do enunciado do sistema: $\dot{W}_{\text{elet}} = -2,0 \text{ kW}$, no qual o sinal negativo é necessário porque a energia é transferida para o sistema por meio de trabalho elétrico. O termo \dot{W}_{eixo} pode ser calculado com a Eq. 2.20, da seguinte forma

$$\dot{W}_{\text{eixo}} = \mathcal{T}\omega = (18 \text{ N} \cdot \text{m})(100 \text{ rad/s}) = 1800 \text{ W} = +1,8 \text{ kW}$$

Como a energia sai do sistema através do eixo, essa taxa de transferência de energia é positiva.

Em resumo,

$$\dot{W} = \dot{W}_{\text{elet}} + \dot{W}_{\text{eixo}} = (-2,0 \text{ kW}) + (+1,8 \text{ kW}) = -0,2 \text{ kW}$$

em que o sinal negativo indica que a potência elétrica de entrada é maior do que a potência transferida para fora através do eixo.

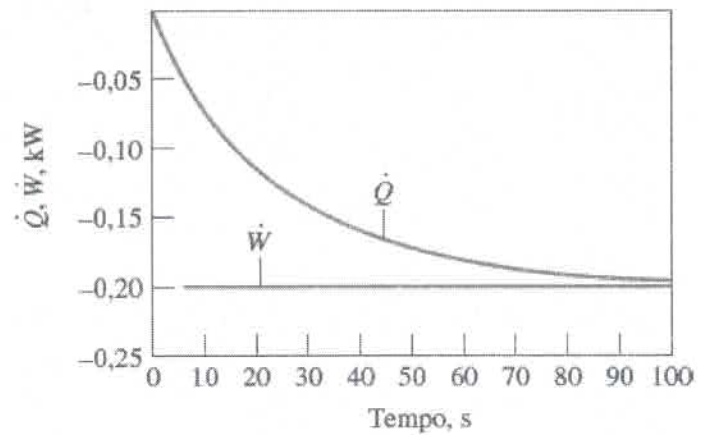
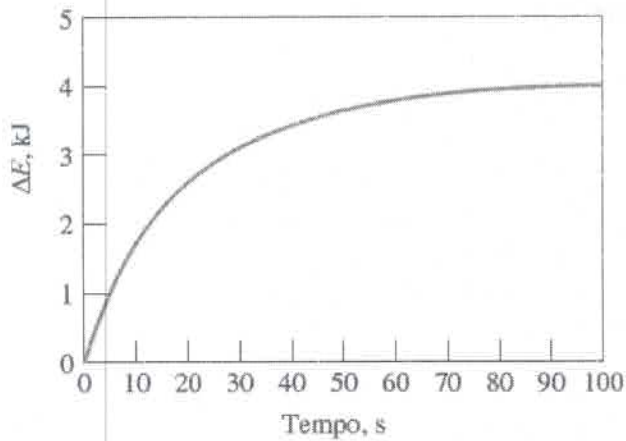
Com esse resultado para \dot{W} e com a expressão dada para \dot{Q} , o balanço da taxa de energia fica

$$\frac{dE}{dt} = -0,2[1 - e^{(-0,05t)}] - (-0,2) = 0,2e^{(-0,05t)}$$

Integrando

$$\begin{aligned} \Delta E &= \int_0^t 0,2e^{(-0,05t)} dt \\ &= \frac{0,2}{(-0,05)} e^{(-0,05t)} \Big|_0^t = 4[1 - e^{(-0,05t)}] \end{aligned}$$

1 Os gráficos correspondentes, Figs. E2.6b e c, são elaborados, utilizando-se a expressão fornecida para \dot{Q} , e as expressões para \dot{W} , e ΔE obtidas da análise. Em virtude da nossa convenção de sinais para calor e trabalho, os valores de \dot{Q} , e \dot{W} , são negativos. Nos primeiros poucos segundos a taxa líquida na qual a energia é entregue através de trabalho excede em muito a taxa na qual a energia é rejeitada por transferência de calor. Consequentemente, a energia armazenada no motor aumenta rapidamente, conforme o motor “aquece”. À proporção que o tempo passa, o valor de \dot{Q} se aproxima de \dot{W} , e a taxa de armazenamento de energia diminui. Após cerca de 100 s, esse modo de operação *transiente* está praticamente encerrado e há pouca variação na quantidade de energia armazenada ou de qualquer outra propriedade. Podemos dizer então que o motor está em regime permanente.



Figs. E2.6b e c

- As Figs E2.6b e c podem ser elaboradas utilizando-se programas de computador próprios ou podem ser desenhadas à mão.
- Em regime permanente, o valor de \dot{Q} permanece constante em $-0,2 \text{ kW}$. Esse valor constante para a taxa de transferência de calor pode ser considerado como a porção da potência elétrica de entrada que não é convertida em potência mecânica de saída devido a efeitos internos ao motor, tais como a resistência elétrica e o atrito.

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- aplicar o balanço da taxa de energia para operações transientes.
- desenvolver e interpretar informações gráficas.

Teste-Relâmpago

Considerando que o modo dominante de transferência de calor da superfície externa do motor é convecção, determine, no regime permanente, a temperatura T_b da superfície externa, em K, para $h = 0,17 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$, $A = 0,3 \text{ m}^2$ e $T_f = 293 \text{ K}$. **Resposta:** 297 K.

2.6 Análise de Energia para Ciclos

ciclo termodinâmico

Nesta seção são ilustrados os conceitos de energia desenvolvidos até agora, através da aplicação a sistemas submetidos a ciclos termodinâmicos. Um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que começa e termina no mesmo estado. No final do ciclo todas as propriedades têm os mesmos valores que tinham no início. Conseqüentemente, terminado o ciclo o sistema não experimenta nenhuma variação líquida de estado. Ciclos que se repetem periodicamente exercem papéis proeminentes em muitas áreas de aplicação. Por exemplo, o vapor que circula ao longo de uma termoelétrica executa um ciclo.

O estudo de sistemas percorrendo ciclos tem um papel importante no desenvolvimento do assunto termodinâmica aplicada à engenharia. Tanto a primeira quanto a segunda lei da termodinâmica têm raízes no estudo dos ciclos.

Além disso, há muitas aplicações práticas importantes envolvendo geração de energia, propulsão de veículos e refrigeração para as quais a compreensão dos ciclos termodinâmicos é essencial. Nesta seção os ciclos são considerados sob a perspectiva do princípio da conservação de energia. Os ciclos são estudados em mais detalhes nos capítulos subsequentes, usando-se o princípio da conservação de energia e a segunda lei da termodinâmica.

2.6.1 Balanço de Energia para um Ciclo

O balanço de energia para qualquer sistema sujeito a um ciclo termodinâmico toma a forma

$$\Delta E_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} - W_{\text{ciclo}} \quad (2.39)$$

na qual Q_{ciclo} e W_{ciclo} representam quantidades *líquidas* de transferência de energia por calor e trabalho, respectivamente, para o ciclo. Como o sistema retorna ao seu estado inicial após o ciclo, não há uma variação *líquida* da sua energia. Como consequência, o lado esquerdo da Eq. 2.39 é igual a zero, e a equação reduz-se a

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{ciclo}} \quad (2.40)$$

A Eq. 2.40 é uma expressão do princípio da conservação da energia que tem que ser satisfeita por *todo* ciclo termodinâmico, não importando a sequência de processos seguida pelo sistema submetido ao ciclo ou a natureza das substâncias que compõem o sistema.

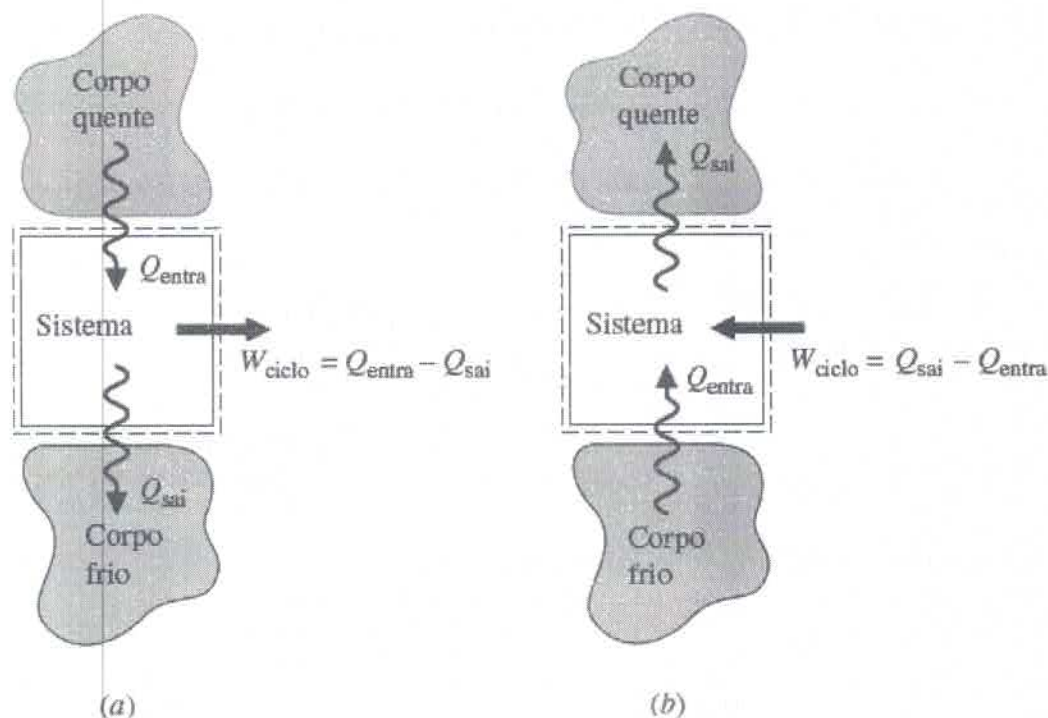


Fig. 2.17 Diagramas esquemáticos de duas classes importantes de ciclos. (a) Ciclos de potência. (b) Ciclos de refrigeração e bomba de calor.

TOME NOTA...

Quando analisamos ciclos, normalmente consideramos a transferência de energia como positiva no sentido da seta presente no esboço do sistema e escrevemos o balanço de energia de acordo com essa convenção.

A Fig. 2.17 fornece um esquema simplificado de duas classes gerais de ciclos consideradas neste livro: ciclos de potência e ciclos de refrigeração e bomba de calor. Em cada caso mostrado, um sistema percorre um ciclo enquanto

se comunica termicamente com dois corpos, um quente e o outro frio. Esses corpos são sistemas localizados na vizinhança do sistema submetido ao ciclo. Durante cada ciclo, há também uma quantidade líquida de energia trocada com a vizinhança por meio de trabalho. Observe com atenção que, ao utilizar os símbolos Q_{entra} e Q_{sai} na Fig. 2.17, nos afastamos da convenção de sinais para a transferência de calor previamente estabelecida. Nesta seção é vantajoso considerar Q_{entra} e Q_{sai} como transferências de energia nos *sentidos indicados pelas setas*. O sentido do trabalho líquido do ciclo, W_{ciclo} , *também é indicado por uma seta*. Por fim, note que os sentidos de transferência de energia mostrados na Fig. 2.17b são opostos àqueles na Fig. 2.17a.

2.6.2 Ciclos de Potência

ciclo de potência

Os sistemas que percorrem ciclos do tipo ilustrado na Fig. 2.17a fornecem uma transferência líquida sob a forma de trabalho para sua vizinhança durante cada ciclo. Qualquer um desses ciclos é chamado de ciclo de potência. Da Eq. 2.40, a entrada de trabalho líquido é igual à transferência de calor líquida para o ciclo, ou

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}} \quad (\text{ciclo de potência}) \quad (2.41)$$

em que Q_{entra} representa a transferência de energia por meio de calor do corpo quente *para* o sistema e Q_{sai} representa a transferência de calor que *sai* do sistema para o corpo frio. Da Eq. 2.41, fica claro que Q_{entra} tem que ser maior do que Q_{sai} para um ciclo de *potência*. A energia fornecida por transferência de calor para um sistema que percorre um ciclo de potência é normalmente oriunda da queima de um combustível ou de uma reação nuclear moderada; ela também pode ser obtida da radiação solar. A energia Q_{sai} é geralmente descarregada para a atmosfera circundante ou para um corpo d'água próximo.

eficiência térmica

O desempenho de um sistema que percorre um *ciclo de potência* pode ser descrito em termos da extensão na qual a energia adicionada por calor, Q_{entra} , é *convertida* em trabalho líquido na saída, W_{ciclo} . A extensão da conversão de energia de calor para trabalho é expressa pela seguinte razão, comumente chamada de eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{entra}}} \quad (\text{ciclo de potência}) \quad (2.42)$$

Introduzindo a Eq. 2.41, obtém-se uma forma alternativa dada por

$$\eta = \frac{Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}}}{Q_{\text{entra}}} = 1 - \frac{Q_{\text{sai}}}{Q_{\text{entra}}} \quad (\text{ciclo de potência}) \quad (2.43)$$

Como a energia se conserva, conclui-se que a eficiência térmica jamais pode ser maior do que a unidade (100%). No entanto, a experiência com ciclos de potência *reais* mostra que o valor da eficiência térmica é sempre *menor* do que a unidade. Ou seja, nem toda a energia adicionada ao sistema por transferência de calor é convertida em trabalho; uma parte é rejeitada para o corpo frio por transferência de calor. Utilizando a segunda lei da termodinâmica, mostraremos no Cap. 5 que a conversão de calor em trabalho não pode ser alcançada totalmente por nenhum ciclo de potência. A eficiência térmica de *todo* ciclo de potência tem que ser menor do que a unidade: $\eta < 1$ (100%).

Ciclo_de_Potência

A.9 – Abas a & b



ENERGIA & MEIO AMBIENTE

Atualmente usinas de energia movidas a combustível fóssil podem alcançar eficiências térmicas de 40%, ou mais. Isso significa que mais de 60% da energia adicionada por transferência de calor durante o ciclo da usina são descarregados da usina de outra maneira, além de trabalho, principalmente por transferência de calor. Um modo de resfriar a usina pode ser alcançado utilizando-se água retirada de um rio vizinho ou lago. A água finalmente retorna ao rio ou lago, porém a uma temperatura mais alta, o que causa as mais diversas consequências ambientais possíveis.

O retorno de grandes quantidades de água aquecida para um rio ou lago pode afetar sua capacidade de manter gases dissolvidos, incluindo o oxigênio necessário para a vida aquática. Se a temperatura da água que retorna for maior do que cerca de 35°C (95°F), o oxigênio dissolvido pode ser muito baixo para manter algumas espécies de peixe. Se a temperatura da água que retorna for muito maior, algumas espécies também podem ficar estressadas. À medida que os rios e lagos tornam-se aquecidos, espécies não nativas que resistem ao calor podem assumir o controle. Além disso, a água aquecida favorece as populações de bactérias e o crescimento de algas.

Agências reguladoras têm agido no sentido de limitar descargas de água aquecida oriundas de usinas de energia, fazendo com que a presença de torres de resfriamento (Seção 12.9) adjacentes se torne uma característica comum das usinas.

2.6.3 Ciclos de Refrigeração e Bomba de Calor

ciclos de refrigeração e bomba de calor

A seguir, considere os ciclos de refrigeração e bomba de calor mostrados na Fig. 2.17b. Para ciclos desse tipo, Q_{entra} é a energia transferida por calor do corpo frio para o sistema que percorre o ciclo, e Q_{sai} é a energia descarregada por transferência de calor do sistema para o corpo quente. Para realizar essas transferências de energia é necessária a entrada de trabalho líquido, W_{ciclo} . As quantidades Q_{entra} , Q_{sai} e W_{ciclo} estão relacionadas entre si pelo balanço de energia que, para ciclos de refrigeração e bomba de calor, toma a forma

$$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}} \quad (\text{ciclo de refrigeração e bomba de calor}) \quad (2.44)$$

Como W_{ciclo} é positivo nessa equação, conclui-se que Q_{sai} é maior do que Q_{entra} .

Embora tenham sido tratados do mesmo modo até este ponto, na realidade os ciclos de refrigeração e bomba de calor têm objetivos diferentes. O objetivo de um ciclo de refrigeração é reduzir a temperatura de um espaço refrigerado ou manter a temperatura do interior de uma residência, ou de outra construção, *abaixo* daquela do meio ambiente. O objetivo de uma bomba de calor é manter a temperatura do interior de uma residência, ou outra construção, *acima* daquela do meio ambiente ou fornecer aquecimento para certos processos industriais que ocorrem a temperaturas elevadas.

Como os ciclos de refrigeração e bomba de calor têm objetivos diferentes, seus parâmetros de desempenho, chamados de *coeficientes de desempenho*, são definidos de forma diferente. Esses coeficientes de desempenho são considerados a seguir.

Ciclos de Refrigeração

coeficiente de desempenho: refrigeração

O desempenho dos *ciclos de refrigeração* pode ser descrito como a razão entre a quantidade de energia recebida pelo sistema percorrendo o ciclo do corpo frio, Q_{entra} , e o trabalho líquido sobre o sistema para produzir esse efeito, W_{ciclo} . Assim, o coeficiente de desempenho, β , é

$$\beta = \frac{Q_{\text{entra}}}{W_{\text{ciclo}}} \quad (\text{ciclo de refrigeração}) \quad (2.45)$$

Introduzindo a Eq. 2.44, uma expressão alternativa para β é obtida

$$\beta = \frac{Q_{\text{entra}}}{Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}}} \quad (\text{ciclo de refrigeração}) \quad (2.46)$$

Para um refrigerador doméstico, Q_{sai} é descarregado para o ambiente no qual o refrigerador está localizado. W_{ciclo} é normalmente fornecido sob a forma de eletricidade para alimentar o motor que aciona o refrigerador.

► POR EXEMPLO em um refrigerador, o compartimento interno age como o corpo frio e o ar ambiente em torno do refrigerador como o corpo quente. A energia Q_{entra} passa *dos* alimentos e demais itens do compartimento interno para o fluido de refrigeração circulante. Para essa transferência de calor ocorrer a temperatura do refrigerante está necessariamente abaixo daquela do conteúdo do refrigerador. A energia Q_{sai} passa *do* fluido de refrigeração *para* o ar ambiente. Para essa transferência de calor ocorrer a temperatura do fluido de refrigeração circulante deve necessariamente estar acima daquela do ar ambiente. Para se obter esses efeitos é necessário o *fornecimento* de trabalho. Para um refrigerador, W_{ciclo} é fornecido sob a forma de eletricidade. ◀◀◀◀◀

Ciclos de Bomba de Calor

coeficiente de desempenho: bomba de calor

O desempenho das *bombas de calor* pode ser descrito como a razão entre a quantidade de energia descarregada pelo sistema que percorre o ciclo para o corpo quente, Q_{sai} , e o trabalho líquido sobre o sistema para produzir esse efeito, W_{ciclo} . Assim, o coeficiente de desempenho, γ , é

$$\gamma = \frac{Q_{\text{sai}}}{W_{\text{ciclo}}} \quad (\text{ciclo de bomba de calor}) \quad (2.47)$$

Introduzindo a Eq. 2.44, obtém-se uma expressão alternativa para esse coeficiente de desempenho:

$$\gamma = \frac{Q_{\text{sai}}}{Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}}} \quad (\text{ciclo de bomba de calor}) \quad (2.48)$$

Dessa equação pode-se perceber que o valor de γ nunca é inferior à unidade. Para bombas de calor residenciais a quantidade de energia Q_{entra} é geralmente retirada da atmosfera circundante, do solo ou de um corpo d'água próximo. O trabalho, representado por W_{ciclo} , é normalmente fornecido por meio de eletricidade.

Os coeficientes de desempenho β e γ são definidos como as razões entre a transferência de calor desejada e o custo em termos de trabalho para se obter esse efeito. Com base nas definições, é desejável termodinamicamente que esses

coeficientes tenham os maiores valores possíveis. Entretanto, conforme foi discutido no [Cap. 5](#), os coeficientes de desempenho devem satisfazer restrições impostas pela segunda lei da termodinâmica.

Ciclo_de_Refrigeração
A.10 –Abas a & b



Ciclo_de_Bomba_de_Calor
A.11 –Abas a & b

2.7 Armazenamento de Energia

Nesta seção é abordado o armazenamento de energia que, nos dias atuais, é considerado uma necessidade crítica nacional e provavelmente continuará a ser nos próximos anos. A necessidade é generalizada, incluindo as usinas movidas a combustível fóssil convencionais e as usinas nucleares, as usinas que utilizam fontes renováveis de energia como a solar e a eólica, e as inúmeras aplicações no transporte, na indústria, nos negócios e no lar.

2.7.1 Visão Geral

Embora alguns aspectos da presente discussão sobre armazenamento de energia sejam amplamente relevantes, estamos preocupados principalmente com o armazenamento e a recaptura de eletricidade. A eletricidade pode ser armazenada como energia interna, energia cinética e energia potencial gravitacional e convertida de novo em energia elétrica quando necessário. Entretanto, devido a limitações termodinâmicas associadas a tais conversões, como os efeitos do atrito e da resistência elétrica, uma *perda* global de eletricidade, da entrada para a saída, é *sempre* observada.

Entre as opções de armazenamento tecnicamente viáveis, a economia em geral determina se, quando e como, o armazenamento é implementado. Para as empresas de energia, a demanda dos consumidores de eletricidade é uma questão fundamental nas tomadas de decisões de armazenamento. A demanda do consumidor varia ao longo do dia e, normalmente, é maior no período das 8h00 às 20h00, com *picos* de demanda durante esse intervalo. A demanda é menor nas horas da noite fora do intervalo, nos fins de semana e nos feriados principais. Assim, as empresas de energia devem decidir que opção faz mais sentido economicamente: a comercialização da eletricidade conforme gerada, o armazenamento desta para uso posterior, ou uma combinação – e se for armazenada, como armazená-la.

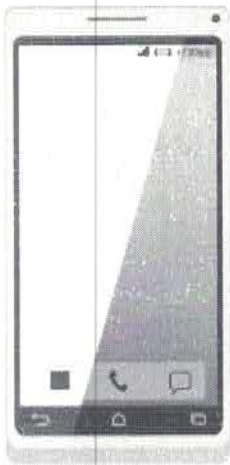
2.7.2 Tecnologias de Armazenamento

Esta seção tem como foco cinco tecnologias de armazenamento: baterias, ultracapacitores, magnetos supercondutores, sistemas cinéticos (volantes), e produção de hidrogênio. O armazenamento térmico é considerado na [Seção 3.8](#). O bombeamento de água e o armazenamento de ar comprimido são considerados na [Seção 4.8.3](#).

As baterias são um meio bastante utilizado de armazenamento de eletricidade presentes em telefones celulares, computadores portáteis, automóveis, sistemas de geração de energia, e inúmeras outras aplicações. No entanto, fabricantes de baterias lutam para acompanhar as demandas de menor peso, maior capacidade, maior durabilidade, e de unidades recarregadas mais rapidamente. Durante anos, as baterias têm sido objeto de forte investigação e de programas de desenvolvimento. Por meio desses esforços, baterias têm sido desenvolvidas proporcionando melhorias significativas sobre as baterias *chumbo-ácidas* usadas por décadas. Estas incluem baterias de *sódio-enxofre* em larga escala e os tipos híbridos de *íon-lítio* e *níquel-hidreto metálico* vistos em produtos de consumo e veículos híbridos. Novas baterias baseadas em nanotecnologia prometem um desempenho ainda melhor: maior capacidade, vida útil mais longa, e um tempo de recarga mais rápida, todos os quais são essenciais para o uso em veículos híbridos.

Os ultracapacitores são dispositivos de armazenamento de energia que funcionam como grandes versões dos capacitores elétricos comuns. Quando um ultracapacitor é carregado eletricamente, a energia é armazenada como uma carga sobre a superfície de um material. Em contraste com as baterias, os ultracapacitores não necessitam de reações químicas e, em consequência, desfrutam de uma vida útil muito mais longa. Esse tipo de armazenamento também é capaz de carregar e descarregar de maneira mais rápida. As aplicações atuais incluem locomotivas e caminhões a diesel. Os ultracapacitores também são usados em veículos híbridos, nos quais trabalham em conjunto com baterias. Nos híbridos, os ultracapacitores são os mais adequados para a realização de funções de curta duração, tais como o armazenamento de eletricidade através da frenagem regenerativa e o fornecimento de energia para a aceleração durante o sistema de partida-parada de condução, enquanto as baterias fornecem a energia necessária para sustentar o movimento do veículo, todos com menor massa total e vida útil mais longa do que com apenas as baterias.

Os sistemas supercondutores magnéticos armazenam uma entrada elétrica no campo magnético criado pelo fluxo de corrente elétrica em uma bobina de material supercondutor criogenicamente resfriada. Este tipo de armazenamento fornece energia quase que instantaneamente e com baixíssima perda de eletricidade da entrada para a saída. Os sistemas supercondutores magnéticos são usados por trens de alta velocidade com levitação magnética, por serviços públicos para o controle da qualidade de energia, e pela indústria para aplicações especiais, como a fabricação de microchips.



Os sistemas cinéticos (volantes) fornecem outra maneira de armazenar uma entrada elétrica – como a de energia cinética. Quando a eletricidade é necessária, a energia cinética é transferida do volante em rotação e fornecida a um gerador. Os volantes, em geral, exibem baixa perda de eletricidade da entrada para a saída. O armazenamento por meio de volante é usado, por exemplo, por provedores de Internet para proteger o equipamento contra falhas de energia.

O hidrogênio também tem sido proposto como um meio de armazenamento de energia para eletricidade. Com esta abordagem, a eletricidade é usada para *dissociar* a água em hidrogênio, através da reação de *eletrólise*, $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$. O hidrogênio produzido deste modo pode ser armazenado para atender as diversas necessidades, incluindo a geração de eletricidade por células a combustível através da reação *inversa*: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$. Uma deficiência deste tipo de armazenamento é a sua perda significativa característica de eletricidade da entrada para a saída. Para a discussão da produção de hidrogênio para uso em veículos com células a combustível, veja *Novos Horizontes* na Seção 5.3.3.



ENERGIA & MEIO AMBIENTE

Baterias fornecem energia de forma portátil para diferentes aplicações domésticas e industriais. Seu uso tem se expandido e, seguindo a tendência, continuará assim nos próximos anos. Ao final do tempo de vida útil, deve-se

descartá-las de modo a não agredir o meio ambiente. Esse já é um grande desafio, que se torna ainda mais relevante à medida que a utilização de baterias aumenta.

A maior parte das baterias baseia seu princípio de funcionamento em reações químicas envolvendo metais pesados como níquel, cádmio e chumbo. Lidar com o descarte apropriado desses metais é ainda um desafio social, ambiental e político. Legislações específicas devem definir meios para o manuseio das unidades de baterias após a utilização. Alguns programas de municípios e empresas buscam reduzir a quantidade desses materiais que vai parar em aterros ou incineradores. O sucesso desses programas depende muito do comportamento dos usuários, que devem separar as baterias dos demais itens e cuidar para que sejam descartadas separadamente do lixo comum, de forma adequada.

Uma abordagem para solucionar esse problema é a utilização de baterias recarregáveis e a reciclagem das baterias não recarregáveis. A utilização em grande escala de baterias recarregáveis poderia reduzir drasticamente o descarte inadequado desses materiais. Apesar do alto custo inicial, as baterias recarregáveis mostram-se mais baratas durante o tempo total de utilização. A reciclagem também é uma alternativa promissora para evitar a contaminação do meio ambiente por metais pesados e outros componentes de baterias, permitindo a reutilização destes materiais.

► RESUMO DO CAPÍTULO E GUIA DE ESTUDOS

Neste capítulo, consideramos o conceito de energia sob uma perspectiva de engenharia e introduzimos balanços de energia para aplicar o princípio da conservação de energia a sistemas fechados. Uma ideia básica é que a energia pode ser armazenada nos sistemas sob três formas macroscópicas: energia interna, energia cinética e energia potencial gravitacional. A energia também pode ser transferida para os sistemas e dos sistemas.

A energia pode ser transferida de e para os sistemas fechados por meio de duas formas apenas: trabalho e transferência de calor. O trabalho e a transferência de calor são identificados na fronteira do sistema, e não são propriedades. Em mecânica o trabalho é a transferência de energia associada a forças macroscópicas e deslocamentos na fronteira do sistema. A definição termodinâmica de trabalho introduzida neste capítulo amplia a noção de trabalho da mecânica, de maneira a incluir outros tipos de trabalho. A transferência de energia por calor, para ou de um sistema, é devida à diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança, e ocorre no sentido decrescente da temperatura. Os modos de transferência de calor incluem condução, radiação e convecção. As seguintes convenções de sinais são usadas para o trabalho e a transferência de calor:

- w, \dot{w} $\begin{cases} > 0: \text{trabalho realizado pelo sistema} \\ < 0: \text{trabalho realizado no sistema} \end{cases}$
- q, \dot{q} $\begin{cases} > 0: \text{transferência de calor para o sistema} \\ < 0: \text{transferência de calor do sistema} \end{cases}$

A energia é uma propriedade extensiva de um sistema. Apenas variações na energia de um sistema possuem significado. As variações de energia são contabilizadas por meio do balanço de energia. O balanço de energia para um processo em um sistema fechado é dado pela Eq. 2.35, e de modo análogo, em termos de taxa de tempo, é dado pela Eq. 2.37. A Eq. 2.40 é uma forma especial do balanço de energia para um sistema que descreve um ciclo termodinâmico.

Os itens a seguir fornecem um guia de estudo para este capítulo. Ao término do estudo do texto e dos exercícios dispostos no final do capítulo você estará apto a

- descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subsequentes.

- calcular essas quantidades de energia

- variações da energia cinética e potencial, utilizando as Eqs. 2.5 e 2.10, respectivamente.

– trabalho e potência, utilizando as Eqs. 2.12 e 2.13, respectivamente.

– trabalho de expansão ou compressão, utilizando a Eq. 2.17.

► aplicar balanços de energia a sistemas fechados em cada uma das formas alternativas, modelando de maneira apropriada o caso em estudo, observando corretamente as convenções de sinais para trabalho e transferência de calor e aplicando com cuidado as unidades do SI e do sistema inglês.

► realizar análises de energia para sistemas percorrendo ciclos termodinâmicos utilizando a Eq. 2.40 e avaliar, conforme o caso, as eficiências térmicas dos ciclos de potência e os coeficientes de desempenho dos ciclos de refrigeração e bomba de calor.

► **CONCEITOS FUNDAMENTAIS NA ENGENHARIA**

adiabático

balanço de energia

ciclo de bomba de calor

ciclo de potência

ciclo de refrigeração

ciclo termodinâmico

convenção de sinais para trabalho

convenção de sinais para transferência de calor

energia cinética

energia interna

energia potencial gravitacional

potência

primeira lei da termodinâmica

trabalho

transferência de calor

► **EQUAÇÕES PRINCIPAIS**

$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP$	(2.27)	Varição da energia total de um sistema.
$\Delta EC = EC_2 - EC_1 = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)$	(2.5)	Varição da energia cinética de uma massa m .
$\Delta EP = EP_2 - EP_1 = mg(z_2 - z_1)$	(2.10)	Varição da energia potencial gravitacional de uma massa m sujeita à constante g .
$E_2 - E_1 = Q - W$	(2.35a)	Balço de energia para sistemas fechados.
$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$	(2.37)	Balço da taxa de energia para sistemas fechados.
$W = \int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$	(2.12)	Trabalho em virtude da ação de uma força F .
$\dot{W} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{V}$	(2.13)	Potência em virtude da ação de uma força F .
$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$	(2.17)	Trabalho de expansão ou compressão relacionado com a pressão do fluido. Veja Fig. 2.4.
Ciclos Termodinâmicos		
$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{entra}} - Q_{\text{sai}}$	(2.41)	Balço de energia para um <i>ciclo de potência</i> . Como na Fig. 2.17a, todas as grandezas são registradas como positivas.
$\eta = \frac{W_{\text{ciclo}}}{Q_{\text{entra}}}$	(2.42)	Eficiência térmica de um ciclo de potência.
$W_{\text{ciclo}} = Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}}$	(2.44)	Balço de energia para um ciclo de <i>refrigeração</i> ou <i>bomba de calor</i> . Como na Fig. 2.17b, todas as grandezas são registradas como positivas.
$\beta = \frac{Q_{\text{entra}}}{W_{\text{ciclo}}}$	(2.45)	Coefficiente de desempenho de um ciclo de refrigeração.
$\gamma = \frac{Q_{\text{sai}}}{W_{\text{ciclo}}}$	(2.47)	Coefficiente de desempenho de um ciclo de bomba de calor.

► EXERCÍCIOS: PONTOS DE REFLEXÃO PARA OS ENGENHEIROS

1. Por que os coeficientes de arrasto aerodinâmico dos carros de corrida de Fórmula 1 são normalmente muito maiores do que os dos automóveis comuns?
2. Quais são as várias coisas que você como indivíduo pode fazer para reduzir o consumo de energia em sua casa? E com relação as suas necessidades de transporte?
3. Como o medidor de energia elétrica instalado em residências faz a medição da quantidade de kWh consumidos?
4. Por que é incorreto dizer que um sistema *contém* calor?
5. Quais os exemplos de transferência de calor por condução, radiação e convecção que você encontra quando utiliza uma grelha a carvão?
6. Após correr 5 milhas em uma esteira no seu campus, Ashley observa que o cinto de sua esteira está aquecido quando o toca. Por que o cinto está aquecido?

7. Quando são irradiadas micro-ondas sobre um tumor durante uma terapia para o câncer com o objetivo de aumentar a temperatura do tumor, essa interação é considerada trabalho e não transferência de calor. Por quê?
8. Para uma boa aceleração, o que é mais importante para um motor de automóvel, a potência ou o torque?
9. Há registros de que motores moleculares experimentais exibem movimento na absorção de luz, alcançando assim uma conversão da radiação eletromagnética em movimento. A luz incidente deve ser considerada trabalho ou transferência de calor?
10. Em uma expansão ou compressão politrópica, o que causa variação de n ?
11. Por que em um balanço de energia de um sistema fechado, em sua forma *diferencial*, $dE = \delta Q - \delta W$, é usado d e não δ para a diferencial do lado esquerdo?
12. Quando dois carrinhos de batida de um parque de diversões colidem de frente e chegam a parar, como você considera a energia cinética que o par tinha imediatamente antes da colisão?
13. Que forma o balanço de energia toma para um sistema *isolado*?
14. Que formas de energia e transferência de energia estão presentes no ciclo de vida de uma tempestade?
15. Como você definiria uma *eficiência* adequada para o motor do Exemplo 2.6?
16. Steve tem um aparelho que mede a distância percorrida e as calorias gastas. Quantos quilômetros ele precisa caminhar para queimar o equivalente a uma barra de chocolate que ele comeu enquanto assistia a um filme?
17. Quantas toneladas de CO_2 são produzidas anualmente por um automóvel convencional?

► VERIFICAÇÃO DE APRENDIZADO

Nos problemas de 1 a 10, correlacione as colunas.

- | | |
|--|---|
| 1. _ Ciclo de refrigeração | A. Transferência de energia em que o <i>único</i> efeito externo ao sistema <i>poderia ter sido</i> o levantamento de uma massa |
| 2. _ Variação de energia total | B. Uma sequência de processos que inicia e termina no mesmo estado |
| 3. _ Adiabático | C. Transferência de energia resultante da diferença de temperatura entre o sistema e as vizinhanças |
| 4. _ Convenção de sinal para trabalho | D. Um ciclo em que a energia é transferida por calor para o sistema sob outro ciclo em que o corpo frio cede energia <i>para</i> o corpo quente |
| 5. _ Variação de energia cinética específica | E. Transferência de energia do sistema para as vizinhanças é considerada positiva |

6. _ Balanço de energia

F. Um processo que não envolve transferência de energia por calor

7. _ Ciclo termodinâmico

G. $mg(z_2 - z_1)$

8. _ Transferência de energia por calor

H. $\frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2)$

9. _ Variação de energia potencial

I. $\Delta E = Q - W$

10. _ Transferência de energia por trabalho

J. $\Delta E_C + EP + \Delta U$

11. Por que, para o cálculo da expansão de um gás utilizando a Eq. 2.17, é necessário o conhecimento da pressão na interface entre o gás e o pistão durante o processo?

12. O símbolo Δ é sempre utilizado para denotar:

- (a) valor inicial menos valor final.
- (b) quando não há variação numérica.
- (c) valor final menos valor inicial.
- (d) nenhuma das anteriores.

13. Cada um dos parâmetros de desempenho de ciclos, definidos neste capítulo, assume a forma de uma razão entre um valor de energia e uma quantidade de energia adicionada ao sistema. Para cada um dos três ciclos apresentados, identifique as formas de energia que assumem essas definições.

14. Durante um processo em *quase equilíbrio*, o deslocamento de um sistema de seu estado de equilíbrio é, no máximo, infinitesimal. Quão acurado este modelo pode ser para descrever uma expansão real?

15. Em mecânica, o trabalho de uma força resultante atuando sobre um corpo equivale à variação em sua(seu) _____.

16. Qual é a direção da transferência de energia *líquida* por trabalho em um ciclo de potência: do sistema ou para o sistema? E da transferência *líquida* de calor?

17. O trabalho, na sua forma infinitesimal, δW , é dita uma diferencial _____.

18. Energia cinética e energia potencial gravitacional são *propriedades extensivas* de um sistema fechado. Explique.

19. Qual é a direção da transferência de energia *líquida* por trabalho em um ciclo de refrigeração: do sistema ou para o sistema? E da transferência *líquida* de calor?

20. Defina processo *politrópico*.

21. Um objeto de massa conhecida inicialmente em repouso cai de uma altura especificada, atingindo o chão e repousando em uma altura igual a zero. A energia é conservada nesse processo? Discuta.

22. Liste três modelos de transferência de energia por calor e discuta as diferenças entre eles.

23. Para determinar o trabalho utilizando $W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$, deve-se especificar como p varia com V durante o processo. Pode-se concluir que o trabalho não é _____.

24. Qual é a definição termodinâmica de trabalho?

25. Estabeleça a convenção de sinais em termodinâmica para a transferência de energia por calor em um sistema fechado.

26. Estabeleça a convenção de sinais em termodinâmica para a transferência de energia por trabalho em um sistema fechado.

27. Quais são as três formas de armazenamento de energia nos átomos e moléculas que compõem a matéria contida em um sistema?

28. Quando um sistema é submetido a um processo, os termos *calor* e *trabalho* não se referem ao que está sendo transferido. Apenas _____ é transferido(a).

29. A variação de energia total em um sistema fechado, além das contribuições de energia cinética e potencial, é contabilizada como _____.

30. Baseando-se nos mecanismos de transferência de calor, liste três razões pelas quais a transferência de calor pode ser considerada desprezível (em quais situações).

Indique verdadeiro ou falso para as afirmações a seguir. Explique.

31. Uma mola é comprimida adiabaticamente. Sua energia interna aumenta.

32. Se a temperatura de um sistema aumenta, ele deve ter sido submetido à transferência de calor.

33. A energia total de um sistema fechado pode variar como resultado da transferência de energia pela fronteira sob as formas de calor e trabalho, acompanhando o fluxo de massa na fronteira.

34. A energia de um sistema isolado pode somente aumentar.

35. Se um sistema fechado é submetido a um ciclo termodinâmico, não pode haver calor trocado ou trabalho realizado.

36. Em princípio, o trabalho de compressão ou expansão pode ser calculado através da integral de $p dV$ para processos reais em quase equilíbrio.

37. Em bombas de calor, o coeficiente de desempenho é sempre igual ou maior que a unidade.

38. O coeficiente de transferência de calor (h), na *Lei de Newton do resfriamento*, não é uma propriedade termodinâmica. É um parâmetro empírico que incorpora nas relações de transferência de calor a natureza do fluxo próximo à superfície, as propriedades do fluido e a geometria.

39. Para um sistema em estado permanente, o valor de nenhuma propriedade varia com o tempo.

40. Apenas *variações* na energia interna de um sistema entre dois estados tem significado físico: não há sentido físico em atribuir um valor de energia interna a um estado.

41. A taxa de transferência de calor no estado estacionário por condução em um material plástico será maior que

aquela em concreto, considerando a mesma área e diferença de temperatura.

42. Um processo *adiabático* não envolve trabalho.

43. Radiação térmica pode ocorrer no vácuo.

44. Uma corrente elétrica passa por um tanque contendo gás. Dependendo de onde for fixada a fronteira do sistema, a transferência de energia pode ser considerada calor ou trabalho.

45. O resfriamento de componentes de computador por uma ventoinha que circula ar no sistema pode ser considerada como transferência de calor por radiação.

46. Para qualquer ciclo, as quantidades líquidas de energia transferida por calor e trabalho são as mesmas.

47. Uma engrenagem armazena energia sob a forma de energia cinética.

48. Trabalho não é uma propriedade.

49. Se um sistema fechado passa por um processo no qual a variação de energia total é positiva, então a transferência de calor deve ser positiva.

50. Se um sistema fechado passa por um processo no qual o trabalho é negativo e a transferência de calor é positiva, então a energia total aumenta.

51. De acordo com a *Lei de Stefan-Boltzmann*, todos os objetos emitem radiação térmica em temperaturas superiores a 0 K (0°R).

52. A variação de energia potencial gravitacional de um corpo de 2 lb (0,91 kg) que passou por uma elevação de 40 ft (12,2 m) em uma localização, em que $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ (9,8 m/s²) é $-2576 \text{ ft} \cdot \text{lbf}$ ($-3492,6 \text{ J}$).

53. A potência está relacionada matematicamente à quantidade de energia transferida por trabalho integrada sobre o tempo.

54. Um material dielétrico em um campo elétrico uniforme pode sofrer uma transferência de energia por trabalho se sua polarização muda.

► PROBLEMAS: DESENVOLVENDO HABILIDADES PARA ENGENHARIA

Explorando Conceitos sobre Energia

2.1 Uma bola de beisebol tem uma massa de 0,3 lb (0,14 kg). Qual é a energia cinética em relação à base principal (*home plate*) de uma bola a 94 milhas por hora (42,0 m/s), em Btu?

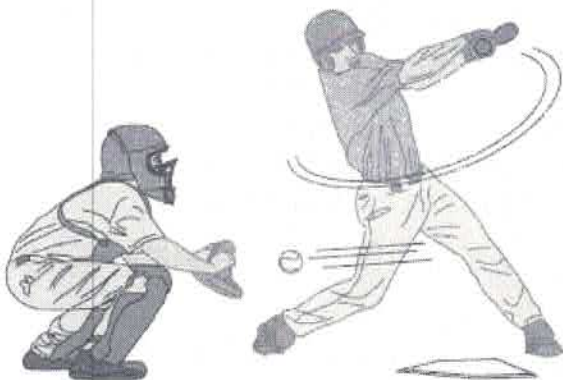


Fig. P2.1

2.2 Determine a energia potencial gravitacional, em kJ, de 2 m^3 de água líquida a uma elevação de 30 m acima da superfície da Terra. A aceleração da gravidade é $9,7 \text{ m/s}^2$ e a densidade da água é uniforme e igual a 1000 kg/m^3 . Determine a variação de energia potencial se esta massa de água for deslocada para uma altura de 15 m.

2.3 Um objeto cujo peso é 100 lbf (444,8 N) experimenta um decréscimo na energia cinética de $500 \text{ ft} \cdot \text{lbf}$ (677,9 N · m) e um aumento na energia potencial de $1500 \text{ ft} \cdot \text{lbf}$ (2033,7 N · m). A velocidade inicial e a altura do objeto, ambas em relação à superfície da Terra, são 40 ft/s (12,2 m/s) e 30 ft (9,1 m), respectivamente. Considerando que $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ ($9,8 \text{ m/s}^2$), determine

(a) a velocidade final, em ft/s.

(b) a altura final, em ft.

2.4 Um guindaste de construção pesando 12.000 lbf cai de uma altura de 400 ft até a rua durante uma tempestade. Para $g = 32,05 \text{ ft/s}^2$, determine a massa, em lb, e a variação na energia potencial gravitacional do guindaste, em ft · lbf.

2.5 Um carro, pesando 2500 lbf, aumenta sua energia potencial gravitacional em $2,25 \times 10^4$ Btu subindo de uma altitude de 5183 ft em Denver para uma maior elevação na Trail Ridge Road, nas Montanhas Rochosas. Qual é a elevação no ponto mais alto da estrada, em ft?

2.6 Um objeto cuja massa é de 1000 kg, inicialmente apresentando uma velocidade de 100 m/s, desacelera até uma velocidade final de 20 m/s. Qual é a variação de energia cinética do objeto, em kJ?

2.7 Um avião turbo-hélice de 30 lugares, cuja massa é de 14.000 kg, decola de um aeroporto e eventualmente alcança sua velocidade de cruzeiro de 620 km/h e uma altitude de 10.000 m. Para $g = 9,78 \text{ m/s}^2$, determine a variação na energia cinética e a variação na energia potencial do avião, ambas em kJ.

2.8 Um automóvel com 900 kg de massa inicialmente se move ao longo de uma estrada a 100 km/h em relação a esta. Em seguida, sobe uma colina cujo cume está a 50 m acima do nível da estrada e de parques em uma área de descanso localizada ali. Determine as variações das energias cinética e potencial para o automóvel, ambas em kJ. Para cada quantidade de energia, cinética e potencial, especifique a escolha do ponto de partida e o valor de referência adotado neste. Considere $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

2.9 As zonas de deformação de um veículo são projetadas para absorver energia durante um impacto por meio de deformação de maneira a reduzir a transferência de energia para os ocupantes. Determine a energia cinética, em Btu, que uma zona de deformação deve absorver para proteger plenamente os ocupantes de um veículo de 3000 lb (1360,8 kg) que, de repente, desacelera de 10 a 0 milha por hora (16,1 a 0 km/h)?

2.10 Um objeto cuja massa é de 300 lb (136,1 kg) sofre uma variação em suas energias cinética e potencial em virtude da ação de uma força resultante \mathbf{R} . O trabalho realizado pela força resultante sobre o objeto é 140 Btu (147,7 kJ). Não existe nenhuma outra interação entre o objeto e sua vizinhança. Se a altura do objeto aumenta de 100 ft (30,5 m) e sua velocidade final é 200 ft/s (61,0 m/s), qual é a sua velocidade inicial em ft/s? Considere $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ ($9,8 \text{ m/s}^2$)

2.11 Um volante em formato de disco, de massa específica uniforme ρ , raio externo R e espessura w , gira com uma velocidade angular ω , em rad/s.

(a) Mostre que o momento de inércia, $I = \int_{\text{vol}} \rho r^2 dV$, pode ser expresso como $I = \rho w R^4 / 2$, e a energia cinética pode ser expressa como $EC = I \omega^2 / 2$.

(b) Para um volante de aço girando a 3000 RPM, determine a energia cinética, em $\text{N} \cdot \text{m}$, e a massa, em kg, se $R = 0,38 \text{ m}$ e $w = 0,025 \text{ m}$.

(c) Determine o raio, em m, e a massa, em kg, de um volante de alumínio que tem a mesma largura, velocidade angular e energia cinética do item (b).

2.12 Usando a relação $EC = I\omega^2/2$ do Problema 2.11(a), determine a velocidade com que um volante cujo momento de inércia é $200 \text{ lb} \cdot \text{ft}^2$ ($8,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) deveria girar, em rpm, para armazenar uma quantidade de energia cinética equivalente à energia potencial de uma massa de 100 lb ($45,4 \text{ m}$) elevada de uma altura de 30 ft ($9,1 \text{ m}$) acima da superfície da Terra. Faça $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ ($9,8 \text{ m/s}^2$).

2.13 Dois objetos com massas diferentes são impulsionados verticalmente da superfície da Terra, ambos com a mesma velocidade inicial. Considerando que os objetos sofrem apenas a força da gravidade, mostre que eles alcançam velocidade zero na mesma altura.

2.14 Um objeto com massa 100 lb cai livremente sob a influência da gravidade de uma elevação inicial de 600 ft acima da superfície da Terra. A velocidade inicial é descendente, com uma magnitude de 50 ft/s . O efeito da resistência do ar é desprezível. Determine a velocidade, em ft/s , do objeto imediatamente antes de tocar a Terra. Considere $g = 31,5 \text{ ft/s}^2$.

2.15 Durante o processo de embalagem, uma lata de soda de $0,4 \text{ kg}$ de massa se move para baixo em uma superfície inclinada 20° em relação à horizontal, como ilustrado na Fig. P2.15. A lata sofre a influência de uma força \mathbf{R} constante, paralela à superfície inclinada e da força da gravidade. A magnitude da força \mathbf{R} constante é de $0,05 \text{ N}$. Ignorando o atrito entre a lata e a superfície inclinada, determine a variação da energia cinética da lata, em J, e se ela está *aumentando* ou *diminuindo*. Se o atrito entre a lata e a superfície inclinada fosse significativo, que efeito teria sobre o valor da variação da energia cinética? Faça $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

2.16 Partindo do repouso, um objeto com 200 kg de massa desliza para baixo em uma rampa de 10 m de comprimento. A rampa está inclinada de um ângulo de 40° a partir da horizontal. Se a resistência do ar e o atrito entre o objeto e a rampa forem desprezíveis, determine a velocidade do objeto, em m/s , ao final da rampa. Considere $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

2.17 Jack, que pesa 150 lbf ($667,2 \text{ N}$), corre 5 milhas em 43 minutos em uma esteira inclinada de 1 grau. O visor da esteira mostra que ele *queimou* 620 kcal ($2595,8 \text{ kJ}$). Para Jack consumir o mesmo número de calorias, quantas taças de sorvete de baunilha ele pode tomar após o seu treinamento?

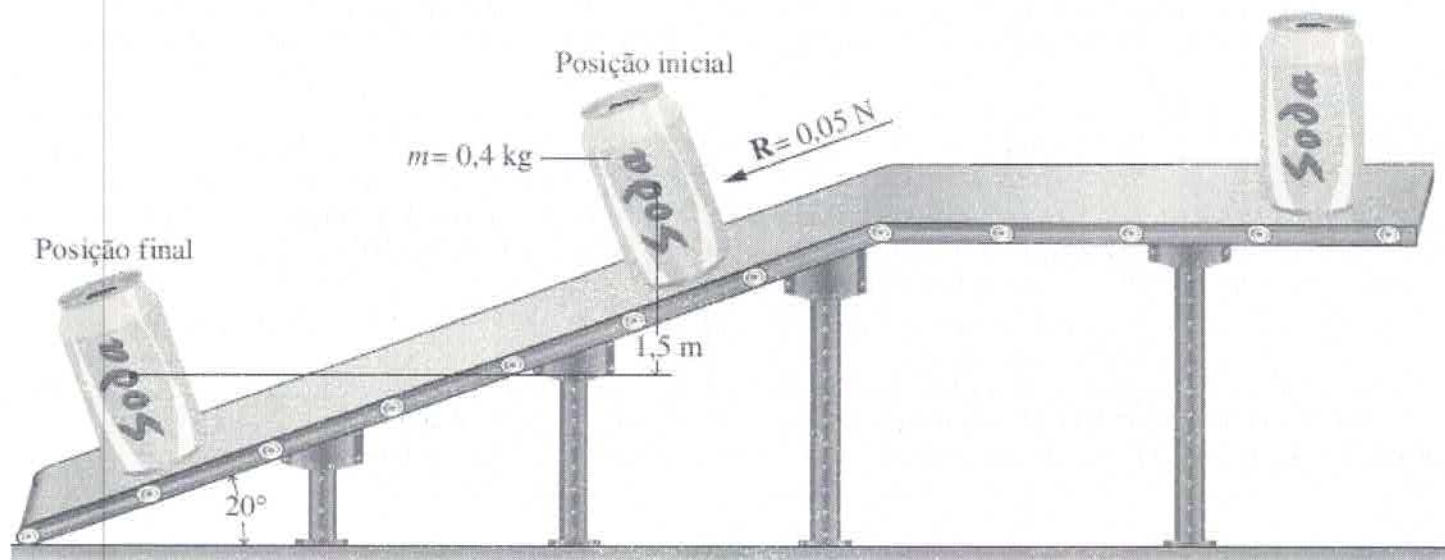


Fig. P2.15



Fig. P2.17

Avaliando Trabalho

2.18 Um objeto inicialmente a uma elevação de 5 m relativa à superfície da Terra com uma velocidade de 50 m/s está sujeito a uma força \mathbf{R} e se move ao longo de uma trajetória. Sua elevação final é 20 m e sua velocidade é 100 m/s. Considerando a aceleração da gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, determine o trabalho realizado pela força atuando sobre o corpo, em kJ.

2.19 Um objeto de 10 kg, inicialmente em repouso, sofre uma aceleração horizontal de 4 m/s^2 devido à ação de uma força resultante aplicada durante 20 s. Determine a energia transferida sob a forma de trabalho, em kJ.

2.20 Um objeto inicialmente em repouso experimenta uma aceleração horizontal constante devido à ação de uma força resultante aplicada por 10 s. O trabalho da força resultante é de 10 Btu (10,5 kJ). A massa do objeto é de 55 lb (24,9 kg). Determine a aceleração horizontal constante em ft/s^2 .

2.21 A força de arrasto, F_d , imposta pelo ar ao redor de um veículo que se move com velocidade V , é dada por

$$F_d = C_d A \frac{1}{2} \rho V^2$$

na qual C_d é uma constante chamada de coeficiente de arrasto, A é a área frontal projetada do veículo e ρ é a massa específica do ar. Determine a potência, em HP, necessária para vencer o arrasto aerodinâmico para um automóvel movendo-se a (a) 25 milhas por hora (40,2 km/h), (b) 70 milhas por hora (112,6 km/h). Considere $C_d = 0,28$, $A = 25 \text{ ft}^2$ ($2,3 \text{ m}^2$) e $\rho = 0,075 \text{ lb/ft}^3$ ($1,2 \text{ kg/m}^3$).

2.22 Uma força importante que se opõe ao movimento de um veículo é a resistência dos pneus ao rolamento, F_r , dada por

$$F_r = f W$$

em que f é uma constante chamada de coeficiente de resistência ao rolamento e w é o peso do veículo. Determine a potência, em kW, necessária para vencer a resistência ao rolamento para um caminhão que pesa 322,5 kN que está se movendo a 110 km/h. Considere $f = 0,0069$.

2.23 As duas forças mais importantes que se opõem ao movimento de um veículo em uma estrada plana são a resistência dos pneus ao rolamento, F_r , e a força de arrasto aerodinâmico do ar escoando ao redor do veículo, F_d , dadas, respectivamente, por

$$F_r = fW, \quad F_d = C_d A \frac{1}{2} \rho V^2$$

sendo f e C_d constantes conhecidas como coeficiente de resistência ao rolamento e coeficiente de arrasto, respectivamente, w e A são o peso do veículo e a área frontal projetada, respectivamente, V é a velocidade do veículo e ρ é a massa específica do ar. Para um carro de passeio com $w = 3040$ lbf, $A = 6,24$ ft² e $C_d = 0,25$, e quando $f = 0,02$ e $\rho = 0,08$ lb/ft³:

(a) determine a potência necessária, em HP, para vencer a resistência ao rolamento e o arrasto aerodinâmico quando V é 55 mi/h.



(b) faça um gráfico da velocidade do veículo entre 0 e 75 mi/h versus (i) a potência para vencer a resistência ao rolamento, (ii) a potência para vencer o arrasto aerodinâmico e (iii) a potência total, todas em hp. Quais as implicações para a economia de combustível do veículo que podem ser deduzidas dos resultados do item (b)?



2.24 A tabela a seguir fornece dados medidos para a pressão versus o volume durante a compressão de um refrigerante no cilindro de um compressor em um sistema de refrigeração. Utilizando os dados da tabela, complete o seguinte:

- (a) Determine um valor de n tal que os dados sejam ajustados para uma equação do tipo $pV^n = \text{constante}$.
- (b) Calcule analiticamente o trabalho realizado sobre o refrigerante, em Btu, utilizando a Eq. 2.17 em conjunto com o resultado do item (a).
- (c) Utilizando integração gráfica ou numérica dos dados, calcule o trabalho realizado sobre o refrigerante, em Btu.
- (d) Compare os diferentes métodos para a estimativa do trabalho utilizados nos itens (b) e (c). Por que são estimativas?

Ponto	p (lbf/in ²)	V (in ³)
1	112	13,0
2	131	11,0
3	157	9,0
4	197	7,0
5	270	5,0



2.25 A tabela a seguir fornece dados medidos para a pressão *versus* o volume durante a expansão dos gases no cilindro de um motor de combustão interna. Utilizando os dados da tabela, faça o seguinte:

- Determine um valor de n tal que os dados sejam ajustados para uma equação do tipo $pV^n = \text{constante}$.
- Calcule analiticamente o trabalho realizado pelos gases, em kJ, utilizando a Eq. 2.17 em conjunto com o resultado do item (a).
- Utilizando integração gráfica ou numérica dos dados, calcule o trabalho realizado pelos gases, em kJ.
- Compare os diferentes métodos para a estimativa do trabalho utilizados nos itens (b) e (c). Por que são estimativas?

Ponto	p (bar)	V (cm ³)
1	15	300
2	12	361
3	9	459
4	6	644
5	4	903
6	2	1608

2.26 Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo no qual a relação entre a pressão e o volume é dada por $pV^2 = \text{constante}$. A pressão inicial é de 1 bar, o volume inicial é de 0,1 m³, e a pressão final é de 9 bar. Determine (a) o volume final, em m³, e (b) o trabalho para o processo, em kJ.

2.27 O gás dióxido de carbono (CO₂) armazenado em um sistema pistão-cilindro, é submetido a um processo do estado $p_1 = 5 \text{ lbf/in}^2$ (34,47 kPa), $V_1 = 2,5 \text{ ft}^3$ (70,8 L) até o estado $p_2 = 20 \text{ lbf/in}^2$ (137,9 kPa), $V_2 = 0,5 \text{ ft}^3$ (14,16 L). A relação entre a pressão e volume durante o processo é dada por $p = 23,75 - 7,5V$, na qual V é dado em ft³ e p em lbf/in². Determine o trabalho durante o processo, em Btu.

2.28 Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo de compressão no qual a relação entre a pressão e o volume é dada por $pV^n = \text{constante}$. O volume inicial é de 0,1 m³, o volume final é de 0,04 m³, e a pressão final é de 2 bar. Determine a pressão inicial, em bar, e o trabalho para o processo, em kJ, se (a) $n = 0$, (b) $n = 1$, (c) $n =$

1,3.

2.29 O gás nitrogênio (N_2) em um conjunto cilindro-pistão sofre uma compressão de $p_1 = 20$ bar, $V_1 = 0,5$ m³, até um estado em que $V_2 = 2,75$ m³. A relação entre a pressão e o volume durante o processo é $pV^{1,35} = \text{constante}$. Para o N_2 , determine (a) a pressão no estado 2, em bar, e (b) o trabalho, em kJ.

2.30 O gás oxigênio (O_2) em um conjunto cilindro-pistão passa por uma expansão, indo de um volume $V_1 = 0,01$ m³ até um volume $V_2 = 0,03$ m³. A relação entre a pressão e o volume durante o processo é $p = AV^{-1} + B$, em que $A = 0,06$ bar · m³ e $B = 3,0$ bar. Para o O_2 , determine (a) as pressões inicial e final, ambas em bar, e (b) o trabalho, em kJ.

2.31 Um sistema fechado que consiste em 14,5 lb (6,6 kg) de ar passa por um processo *politrópico* de $p_1 = 80$ lbf/in² (551,6 kPa) e $y_1 = 4$ ft³/lb (0,2 m³/kg) até um estado final em que $p_2 = 20$ lbf/in² (137,9 kPa), $y_2 = 11$ ft³/lb (0,7 m³/kg). Determine a quantidade de energia transferida por meio de trabalho, em Btu, para o processo.

2.32 Ar contido em um conjunto cilindro-pistão é lentamente aquecido. Conforme ilustrado na Fig. P2.32, durante esse processo a pressão primeiro varia linearmente com o volume e, então, permanece constante. Determine o trabalho total, em kJ.

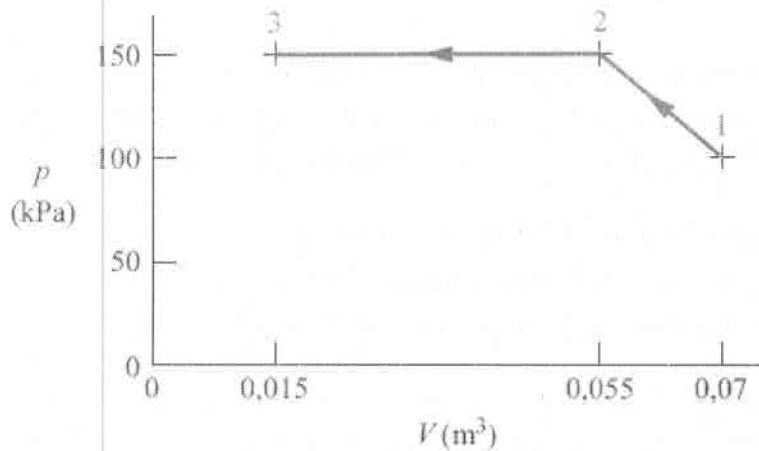


Fig. P2.32

2.33 Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão passa por três processos em série:

Processo 1-2: Volume constante de $p_1 = 1$ bar, $V_1 = 4$ m³ até o estado 2, em que $p_2 = 2$ bar.

Processo 2-3: Compressão até $V_3 = 2$ m³, durante a qual a relação pressão-volume é $pV = \text{constante}$.

Processo 3-4: Pressão constante até o estado 4, em que $V_4 = 1$ m³.

Esboce os processos em série em um diagrama p - V e determine o trabalho para cada processo, em kJ.

2.34 O gás monóxido de carbono (CO) contido em um conjunto cilindro-pistão passa por três processos em série:

Processo 1-2: Expansão de $V_1 = 0,2$ m³ até $V_2 = 1$ m³, a pressão constante = 5 bar.

Processo 2-3: Resfriamento a volume constante do estado 2 até o estado 3, em que $p_3 = 1$ bar.

Processo 3-1: Compressão do estado 3 ao estado inicial, durante o qual a relação pressão-volume é $pV = \text{constante}$. Esboce os processos em série em um diagrama p - V e determine o trabalho para cada processo, em kJ.

2.35 Ar contido em um conjunto cilindro-pistão passa por três processos em série:

Processo 1-2: Compressão de $p_1 = 10 \text{ lbf/in}^2$ (68,9 kPa), $V_1 = 4,0 \text{ ft}^3$ (0,11 m^3), para $p_2 = 50 \text{ lbf/in}^2$ (344,7 kPa), durante o qual a relação pressão-volume é $pV = \text{constante}$.

Processo 2-3: Do estado 2 para o estado 3, em que $p = 10 \text{ lbf/in}^2$, a volume constante.

Processo 3-1: Expansão até o estado inicial, durante a qual pressão-volume é constante.

Esboce os processos em série em um diagrama p - V . Determine (a) o volume no estado 2, em ft^3 , e (b) o trabalho para cada processo, em Btu.

2.36 A lixadeira de cinta ilustrada na Fig. P2.36 tem uma velocidade de correia de 1500 ft/min (7,6 m/s). O coeficiente de atrito entre a lixadeira e uma superfície de madeira compensada que está sendo terminada é 0,2. Se a força (normal) dirigida para baixo sobre a lixadeira é de 15 lbf (66,7 N), determine (a) a potência transmitida pela cinta, em Btu/s e em HP, e (b) o trabalho realizado em um minuto de operação, em Btu.

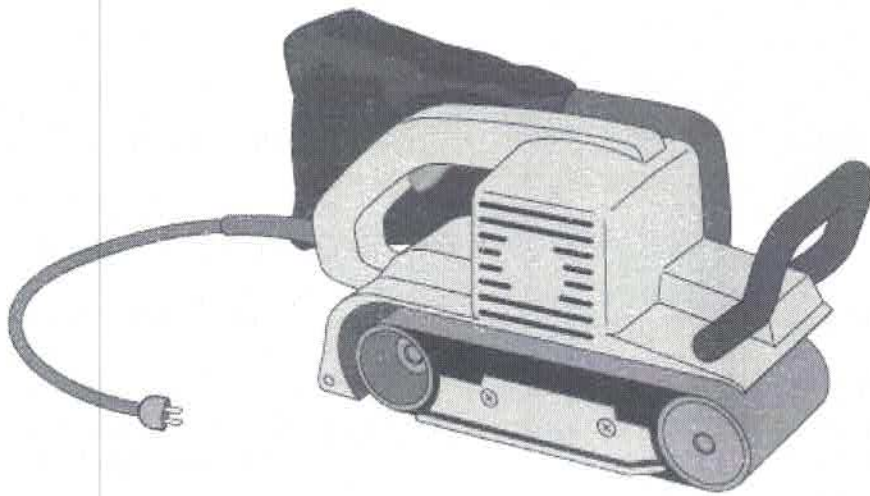


Fig. P2.36

2.37 Uma polia de 0,15 m de diâmetro movimenta uma correia fazendo girar o eixo motor da bomba de uma usina. O torque aplicado pela correia sobre a polia é de $200 \text{ N} \cdot \text{m}$, e a potência transmitida é de 7 kW. Determine a força resultante aplicada pela correia sobre a polia, em kN, e a velocidade de rotação do eixo, em RPM.

2.38 Uma bateria de 10 V fornece uma corrente constante de 0,5 A para uma resistência por 30 min. (a) Determine a resistência, em ohms. (b) Para a bateria, determine a quantidade de energia transferida por trabalho, em kJ.

2.39 Um aquecedor elétrico consome uma corrente de 6 A sob uma voltagem de 220 V, durante 24 h. Determine a potência elétrica fornecida ao aquecedor, em kW, e a energia total envolvida, em kWh. Se o valor da energia elétrica é 0,08 US\$/kWh, determine o custo da utilização do aquecedor por dia.

2.40 Um artigo de uma revista de carros afirma que a potência \dot{W} fornecida por um motor de automóvel, em hp, é calculada multiplicando o torque \mathcal{J} , em $\text{ft} \cdot \text{lbf}$, pela velocidade de rotação ω do eixo de acionamento, em rpm, e dividindo por uma constante:

$$\dot{W} = \frac{\mathcal{J}\omega}{C}$$

Qual é o valor e as unidades da constante C ?

2.41 Os pistões de um motor de automóvel V-6 desenvolvem 226 hp (168,5 kW). Considerando que a velocidade de

rotação do eixo de acionamento do motor é de 4700 rpm e o torque é de 248 ft · lbf (336,2 m · N), que porcentagem da potência desenvolvida é transferida ao eixo? O que explica a diferença de potência? Será que um motor desse tamanho atende às suas necessidades de transporte? Comente.

2.42 A Figura P2.42 mostra um objeto de 5 lb (2,27 kg) preso a uma polia de raio $R = 3$ in (7,62 cm). Se o objeto cai a uma velocidade de 5 ft/s (1,524 m/s), determine a potência transmitida pela polia em HP, e a velocidade de rotação do eixo, em rpm, considerando $g = 32,2$ ft/s² (9,81 m/s²).

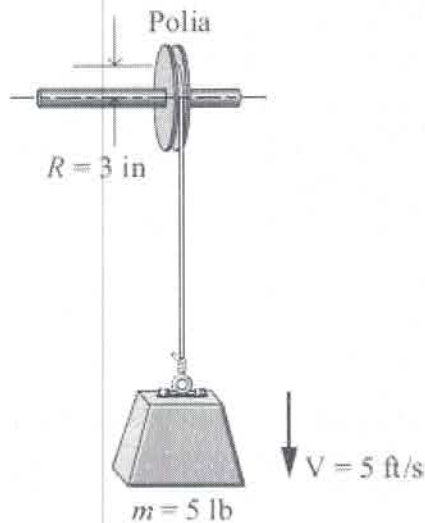


Fig. P2.42

2.43 Um fio de aço suspenso verticalmente, conforme ilustrado na Fig. P2.43, tem uma área A de seção transversal e um comprimento inicial x_0 . Uma força F para baixo, aplicada à extremidade do fio faz com que este se estique. A tensão normal no fio varia linearmente de acordo com $s = Ce$, em que e é a *deformação*, dada por $e = (x - x_0)/x_0$, em que x é o comprimento do fio esticado. C é uma constante do material (módulo de Young). Admitindo que a área da seção transversal permanece constante,

(a) obtenha uma expressão para o trabalho realizado sobre o fio.

(b) calcule o trabalho realizado sobre o fio, em ft · lbf, e a magnitude da força dirigida para baixo, em lbf, se $x_0 = 10$ ft (3,0 m), $x = 10,01$ ft (3,0 m), $A = 0,1$ in² ($6,53 \cdot 10^{-25}$ m²), e $C = 2,5 \cdot 10^7$ lbf/in² ($1,7 \cdot 10^{11}$ Pa).

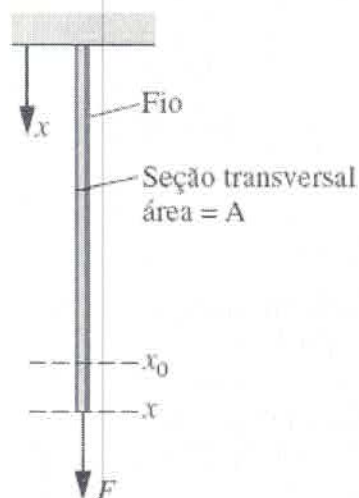


Fig. P2.43

2.44 Uma película de sabão é suspensa em uma armação de arame, conforme a Fig. 2.10. O arame correção é deslocado por meio de uma força aplicada F . Considerando que a tensão superficial permanece constante,

(a) obtenha uma expressão para o trabalho realizado ao esticar a película, em termos da tensão superficial τ , do comprimento ℓ , e do deslocamento Δx .

(b) determine o trabalho realizado, em J, se, $\ell = 5$ cm, $\Delta x = 0,5$ cm e $\tau = 25 \times 10^{-5}$ N/cm.

2.45 Uma mola, com um comprimento inicial de ℓ_0 quando indeformada, é esticada por uma força F aplicada em sua extremidade, conforme está ilustrado na Fig. P2.45. O comprimento da mola quando esticada é dado por ℓ . Pela *lei de Hooke*, a força está linearmente relacionada à extensão da mola por $F = k(\ell - \ell_0)$, na qual k é a *rigidez* da mola. Considerando que a rigidez é constante,

(a) obtenha uma expressão para o trabalho realizado ao variar o comprimento da mola de ℓ_1 para ℓ_2 .

(b) calcule o trabalho realizado, em J, se $\ell_0 = 3$ cm, $\ell_1 = 6$ cm, $\ell_2 = 10$ cm, e a rigidez é $k = 10^4$ N/m.

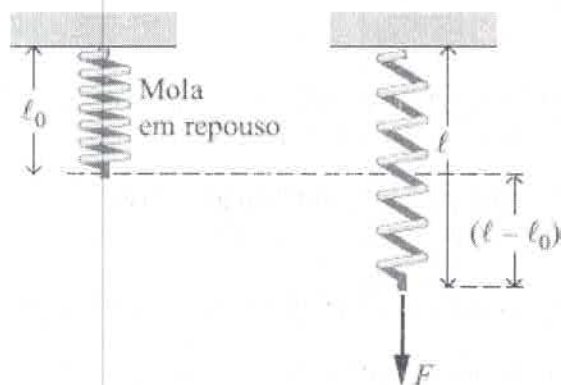


Fig. P2.45

Avaliando a Transferência de Calor

2.46 Um ventilador força o ar através de uma placa de circuito de computador com 70 cm^2 de área de superfície para evitar o superaquecimento. A temperatura do ar é de 300 K , enquanto a temperatura da superfície da placa de circuito é de 340 K . Utilizando os dados da Tabela 2.1, determine a maior e a menor taxa de transferência de calor, em W , que poderiam ser encontradas para a convecção forçada.

2.47 Conforme mostrado na Fig. P2.47, a parede externa de um edifício tem 6 in ($0,1 \text{ m}$) de espessura e possui uma condutividade térmica média de $0,32 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{R}$ ($0,55 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). Em regime permanente, a temperatura da parede diminui linearmente de $T_1 = 70^\circ\text{F}$ ($21,1^\circ\text{C}$) na superfície interna para T_2 na superfície externa. A temperatura externa relativa ao ar ambiente é $T_0 = 25^\circ\text{F}$ ($23,9^\circ\text{C}$) e o coeficiente de transferência de calor por convecção é $5,1 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}$ ($29,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Determine (a) a temperatura T_2 , em $^\circ\text{F}$, e (b) a taxa de transferência de calor através da parede, em Btu/h por ft^2 de área de superfície.

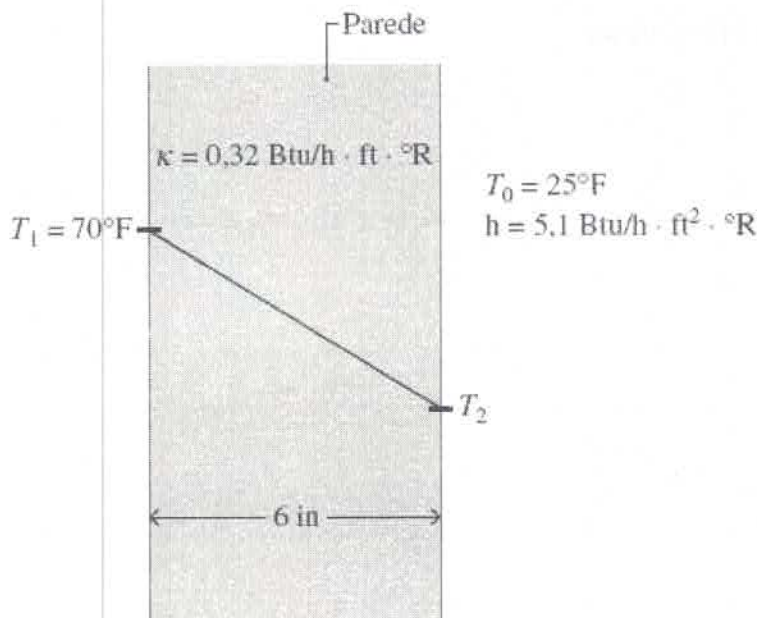


Fig. P2.47

2.48 Conforme ilustrado na Fig. P2.48, a parede de um forno é composta por uma camada de aço de 0,635 cm de espessura, sendo $k_a = 15,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, e uma camada de tijolos, sendo $k_t = 0,72 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Em regime permanente ocorre um decréscimo de temperatura de $0,7^\circ\text{C}$ na camada de aço. A temperatura interna relativa à superfície exposta da camada de aço é 300°C . Se a temperatura da superfície externa do tijolo não pode ser maior do que 40°C , determine a espessura mínima de tijolo, em cm, que assegura que esse limite seja alcançado. Qual a taxa de condução, em KW por m^2 da área da superfície da parede?

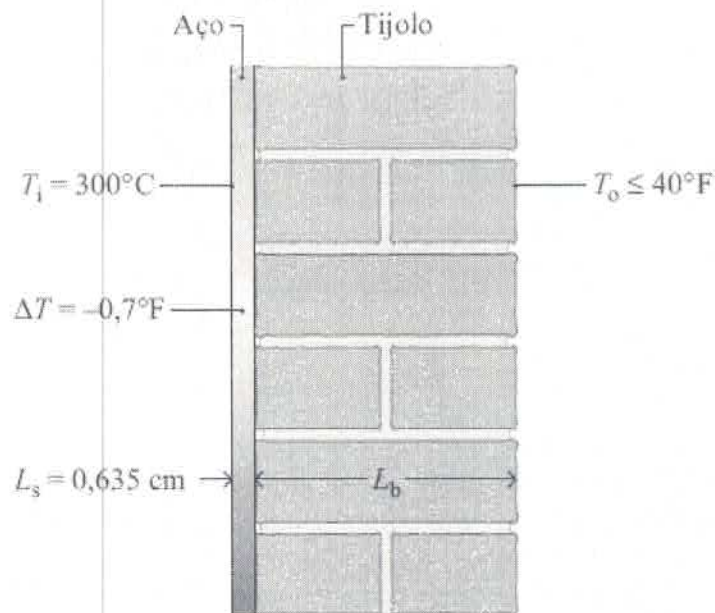


Fig. P2.48

2.49 Uma parede plana composta consiste em uma camada de blocos de betão como isolante, de 12 in (0,3 m) de espessura, sendo $k_i = 0,27 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{R}$ ($0,47 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) e uma camada de placas de gesso ($k_g = 1,11 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{R}$ = $1,9 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). As temperaturas das superfícies exteriores do betão e do gesso são 460°R ($17,6^\circ\text{C}$) e 560°R ($38,0^\circ\text{C}$), respectivamente, e existe um contato perfeito na interface entre as duas camadas. Determine, em regime permanente, a taxa instantânea de transferência de calor, em Btu/h por ft^2 de área de superfície, e a temperatura, em

$^{\circ}\text{R}$, na interface entre o betão e o gesso.

2.50 Uma parede plana composta consiste em uma camada de isolante de 3 in de espessura ($k_i = 0,029 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{R}$) e uma camada de revestimento de 0,75 in de espessura ($k = 0,058 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{R}$). A temperatura interna relativa ao isolante é 67°F . A temperatura externa dos revestimento é -8°F . Determine, em regime permanente, (a) a temperatura na interface entre as duas camadas, em $^{\circ}\text{F}$, e (b) a taxa de transferência de calor através da parede, em Btu por ft^2 de área de superfície.

2.51 A estrutura de uma parede isolada de uma casa possui condutividade térmica média de $0,04 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{R}$ ($0,07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). A espessura da parede é de 6 in ($0,15 \text{ m}$). A temperatura do ar interno é 70°F ($21,1^{\circ}\text{C}$), e o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar interno e a parede é $2 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{R}$ ($11,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). No lado externo, a temperatura do ar ambiente é 32°F (0°C) e o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a parede e o ar externo é $5 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{R}$ ($28,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Determine a taxa de transferência de calor através da parede, em regime permanente, em Btu/h por ft^2 de área de superfície.

2.52 Responda ao seguinte exercício usando as relações de transferência de calor:

(a) Com relação a Fig. 2.12, determine a taxa líquida de troca radiante, em W, para $k = 0,07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $A = 0,125 \text{ m}^2$, $T_1 = 298 \text{ K}$, $T_2 = 273 \text{ K}$.

(b) Com relação a Fig. 2.14, determine a taxa de transferência de calor por convecção da superfície para o ar, em W, para $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, $A = 0,125 \text{ m}^2$, $T_b = 305 \text{ K}$, $T_f = 298 \text{ K}$.

2.53 Uma sonda interplanetária esférica, carregada eletronicamente, de 0,5 m de diâmetro, em regime permanente, transfere energia por radiação de sua superfície externa a uma taxa de 150 W. Se a sonda não recebe radiação do Sol ou do espaço, qual é a temperatura da superfície, em K? Considere $\epsilon = 0,8$.

2.54 Um corpo cuja área superficial é $0,5 \text{ m}^2$, emissividade é 0,8 e temperatura é 150°C é colocado em uma grande câmara de vácuo, cujas paredes estão a 25°C . Qual a taxa de radiação *emitida* pela superfície, em W? Qual a taxa líquida de radiação *trocada* entre a superfície e as paredes da câmara, em W?

2.55 A superfície externa da grelha com cobertura mostrada na Fig. P2.55 está a 47°C e sua emissividade corresponde a 0,93. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a grelha e a vizinhança é $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Determine a taxa líquida de transferência de calor entre a grelha e a vizinhança por convecção e radiação, em kW por m^2 de área de superfície.

$$T_0 = 27^\circ\text{C}$$

$$h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

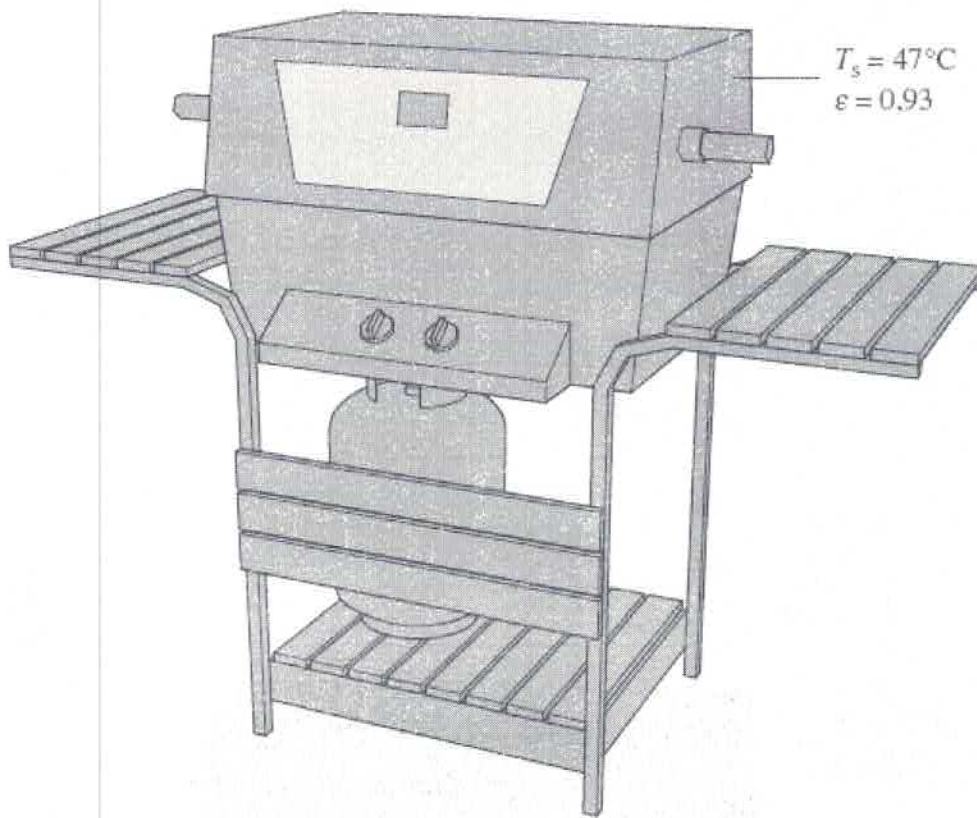


Fig. P2.55

Usando o Balanço de Energia

2.56 Cada linha na tabela a seguir fornece informações sobre um processo em um sistema fechado. Cada entrada tem as mesmas unidades de energia. Complete os espaços em branco na tabela.

Processo	Q	W	E_1	E_2	ΔE
a	+50		-20		+70
b		+20		+50	+30
c		-60	+40	+60	
d	-40		+50		0
e	+50	+150		-80	

2.57 Cada linha na tabela a seguir fornece informações, em Btu, sobre um processo em um sistema fechado. Complete os espaços em branco na tabela, em Btu.

Processo	Q	W	E_1	E_2	ΔE
a	+40		+15		+15
b		+5	+7	+22	
c	-4	+10		-8	
d	-10		-10		+20
e	+3	-3	+8		

2.58 Um sistema fechado de 10 kg é submetido a um processo durante o qual ocorre transferência de energia do sistema por trabalho igual a 0,147 kJ/kg, uma diminuição de altura de 50 m e um aumento de velocidade de 15 para 30 m/s. A energia interna específica diminui em 5 kJ/kg e a aceleração da gravidade é $g = 9,7 \text{ m/s}^2$. Determine a transferência de calor envolvida no processo, em kJ.

2.59 Conforme ilustrado na Fig. P2.59, um gás contido em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a um volume de $0,1 \text{ m}^3$, passa por uma expansão a pressão constante de 2 bar até o volume final de $0,12 \text{ m}^3$, enquanto é aquecido lentamente através da base. A variação da energia interna do gás é de 0,25 kJ. Considere que as paredes do pistão e do cilindro são fabricadas com um material resistente ao calor e que o pistão se move lentamente no cilindro. A pressão atmosférica local é de 1 bar.

(a) Determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ, considerando o gás como o sistema.

(b) Determine o trabalho e a variação da energia potencial, ambos em kJ, considerando o pistão como o sistema.

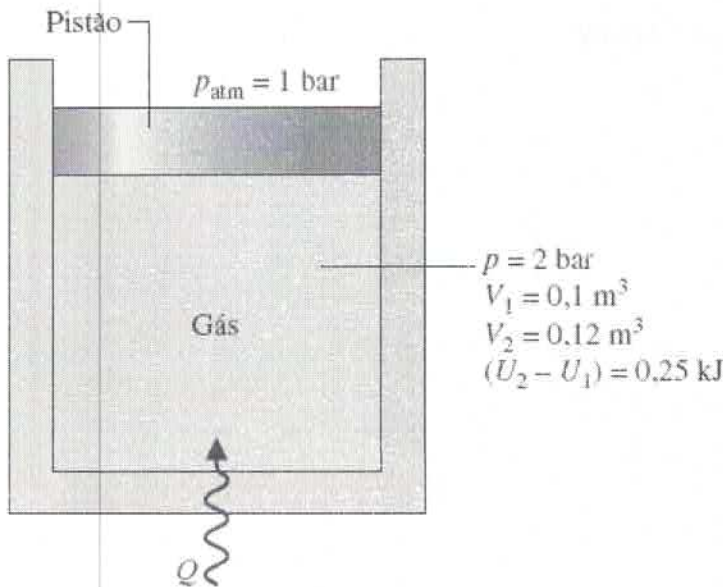


Fig. P2.59

2.60 Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão passa por dois processos, A e B, com os *mesmos estados extremos*, 1 e 2, em que $p_1 = 1 \text{ bar}$, $V_1 = 1 \text{ m}^3$, $U_1 = 400 \text{ kJ}$ e $p_2 = 10 \text{ bar}$, $V_2 = 0,1 \text{ m}^3$, $U_2 = 450 \text{ kJ}$:

Processo A: Processo a volume constante do estado 1 a uma pressão de 10 bar, seguido por um processo a pressão constante até o estado 2.

Processo B: Processo de 1 até 2, durante o qual a relação pressão-volume é dada por $pV = \text{constante}$. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Para cada um dos processos, dados por A e B, (a) trace o diagrama p - V do processo, (b) calcule o trabalho, em kJ, e (c) calcule a transferência de calor, em kJ.

2.61 Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão passa por dois processos, A e B, com os *mesmos estados extremos*, 1 e 2, em que $p_1 = 10 \text{ bar}$, $V_1 = 0,1 \text{ m}^3$, $U_1 = 400 \text{ kJ}$ e $p_2 = 1 \text{ bar}$, $V_2 = 1,0 \text{ m}^3$, $U_2 = 200 \text{ kJ}$:

Processo A: Processo de 1 até 2, durante o qual a relação pressão-volume é dada por $pV = \text{constante}$.

Processo B: Processo a volume constante do estado 1 a uma pressão de 2 bar, seguido por um processo pressão-volume linear até o estado 2.

Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Para cada um dos processos, dados por A e B, (a) trace o diagrama p - V do processo, (b) calcule o trabalho, em kJ, e (c) calcule a transferência de calor, em kJ.

2.62 Um motor elétrico consome uma corrente de 10 A com uma voltagem de 110 V, como mostrado na Fig. 2.62. O eixo de saída desenvolve um torque de $9,7 \text{ N} \cdot \text{m}$ e uma velocidade rotacional de 1000 RPM. Para a operação em regime permanente, determine para o motor

(a) a potência elétrica requerida, em kW

(b) a potência desenvolvida pelo eixo de saída, em kW

(c) a temperatura média da superfície, T_s , em $^{\circ}\text{C}$, se a transferência de calor ocorrerem por convecção com o entorno a $T_s = 21^{\circ}\text{C}$.

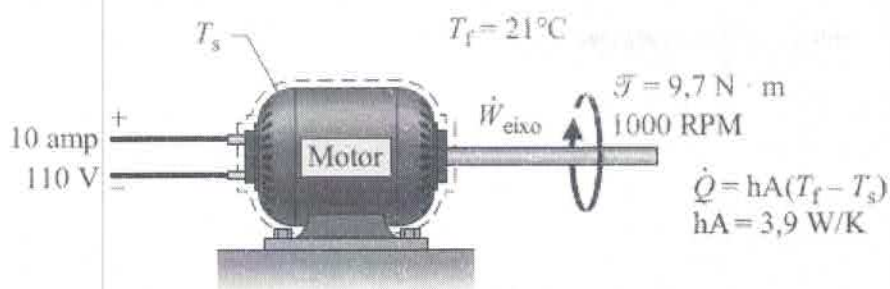


Fig. P2.62

2.63 Conforme ilustrado na Fig. P2.63, a superfície externa de um transistor é resfriada por um escoamento de ar induzido por um ventilador a uma temperatura de 25°C e uma pressão de 1 atm. A área da superfície externa do transistor é $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Em regime permanente, a potência elétrica do transistor é 3 W. Despreze a transferência de calor que ocorre através da base do transistor. O coeficiente de transferência de calor por convecção é $100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Determine (a) a taxa de transferência de calor entre o transistor e o ar, em W, e (b) a temperatura da superfície externa do transistor, em $^{\circ}\text{C}$,

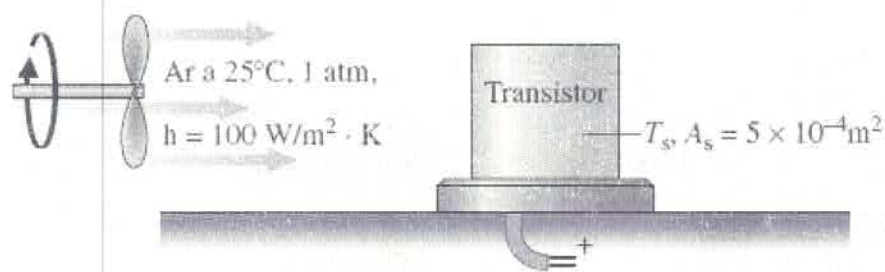


Fig. P2.63

2.64 Um kg de refrigerante 22, inicialmente a $p_1 = 0,9 \text{ MPa}$ e $u_1 = 232,92 \text{ kJ/kg}$, está contido em um tanque rígido fechado. O tanque está equipado com um agitador que transfere energia para o refrigerante a uma taxa constante de 0,1 kW. A transferência de calor do refrigerante para sua vizinhança ocorre a uma taxa Kt , em kW, em que K é uma constante, em kW por minuto, e \mathcal{J} o tempo, em minutos. Depois de 20 minutos sendo agitado, o refrigerante se encontra a $p_2 = 1,2 \text{ MPa}$ e $u_2 = 276,67 \text{ kJ/kg}$.

Não ocorrem variações globais nas energias cinética e potencial. (a) Para o refrigerante, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ. (b) Determine o valor da constante K que aparece na relação de transferência de calor conhecida, em kW/min.

2.65 Um gás é mantido em um conjunto cilindro-pistão vertical por um pistão com 100 lbf (444,8 N) de peso e uma área de face de 40 in^2 ($0,03 \text{ m}^2$). A atmosfera exerce uma pressão de $14,7 \text{ lbf/in}^2$ ($101,3 \text{ kPa}$) sobre o topo do pistão. Um agitador transfere 3 Btu (3,2 kJ) de energia para o gás durante um processo no qual o pistão é elevado de 1 ft. O pistão e o cilindro são maus condutores térmicos e o atrito entre eles pode ser desprezado. Determine a variação da energia interna do gás, em Btu.

2.66 Um gás contido em um sistema pistão-cilindro é submetido a um processo com a relação entre pressão e volume específico $py^{1,2} = \text{constante}$. A massa do gás é 0,4 lb (0,18 kg) e os seguintes dados são conhecidos: $p_1 = 160 \text{ lbf/in}^2$ ($113,16 \text{ kPa}$), $V_1 = 1 \text{ ft}^3$ ($28,32 \text{ L}$), $p_2 = 390 \text{ lbf/in}^2$ ($2688,96 \text{ kPa}$). Durante o processo, a transferência de calor do gás é 2,1 Btu (2,22 kJ). Desconsidere as variações de energia cinética e potencial e determine a variação de energia interna específica do gás, em Btu/lb.

2.67 Quatro quilogramas de monóxido de carbono (CO) estão contidos em um tanque rígido com um volume de 1 m^3 . O tanque está equipado com um agitador que transfere energia para o CO a uma taxa constante de 14 W por 1 h.

Durante o processo, a energia interna específica do monóxido de carbono aumenta de 10 kJ/kg. Se não houver variação nas energias cinética e potencial, determine

- o volume específico no estado final, em m^3/kg .
- a transferência de energia através de trabalho, em kJ.
- a transferência de energia através de calor, em kJ, e o sentido do calor transferido.

2.68 Um tanque rígido fechado contém o gás hélio. Uma resistência elétrica no tanque transfere energia *para* o gás a uma taxa constante de 1 kW. A transferência de calor ocorre *do* gás para sua vizinhança a uma taxa de $5t$ watts, em que t é o tempo, em minutos. Trace a variação de energia do hélio, em kJ, para $t \geq 0$ e comente.

2.69 Vapor em um conjunto pistão-cilindro sofre um processo politrópico. Os dados para os estados inicial e final são apresentados na tabela a seguir. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para o processo, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em Btu por lb de vapor.

Estado	$p(\text{lbf/in.}^2)$	$v(\text{ft}^3/\text{lb})$	$u(\text{Btu/lb})$
1	100	4,934	1136,2
2	40	11,04	

2.70 Ar expande adiabaticamente em um conjunto pistão-cilindro de um estado inicial em que $p_1 = 100 \text{ lbf/in}^2$, $v_1 = 3,704 \text{ ft}^3/\text{lb}$ e $T_1 = 1000^\circ\text{R}$ para um estado final em que $p_2 = 50 \text{ lbf/in}^2$. O processo é politrópico, com $n = 1,4$. A variação na energia interna específica, em Btu/lb, pode ser expressa em termos de variação de temperatura como $\Delta u = (0,171)(T_2 - T_1)$. Determine a temperatura final, em $^\circ\text{R}$. Os efeitos de energia cinética e potencial podem ser negligenciados.

2.71 Ar é mantido em um conjunto cilindro-pistão vertical por um pistão com 25 kg de massa e uma área de face de $0,005 \text{ m}^2$. A massa de ar tem 2,5 g e inicialmente ocupa um volume de 2,5 litros. A atmosfera exerce uma pressão de 100 kPa sobre o topo do pistão. O volume do ar diminui lentamente para $0,001 \text{ m}^3$ conforme a energia é lentamente removida por transferência de calor com uma magnitude de 1 kJ. Desprezando o atrito entre o pistão e a parede do cilindro, determine a variação da energia interna específica do ar, em kJ/kg. Considere $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

2.72 Gás CO_2 é mantido em um conjunto cilindro-pistão vertical por um pistão com 50 kg de massa e uma área de face de $0,01 \text{ m}^2$. A massa de CO_2 tem 4 g. O CO_2 inicialmente ocupa um volume de $0,005 \text{ m}^3$ e apresenta uma energia interna específica de 675 kJ/kg. A atmosfera exerce uma pressão de 100 kPa sobre o topo do pistão. Uma transferência de calor de 1,95 kJ de magnitude ocorre lentamente do CO_2 para a vizinhança, e o volume do CO_2 diminui para $0,0025 \text{ m}^3$. O atrito entre o pistão e a parede do cilindro pode ser desprezado. A aceleração local da gravidade é $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Para o CO_2 , determine (a) a pressão, em kPa, e (b) a energia interna específica final, em kJ/kg.

2.73 A Fig. P2.73 ilustra um gás contido em um conjunto cilindro-pistão vertical. Um eixo vertical, cuja área da seção transversal é de $0,8 \text{ cm}^2$, é ligado ao topo do pistão. A massa total do pistão e eixo é de 25 kg. Conforme o gás é aquecido lentamente, sua energia interna aumenta de 0,1 kJ, a energia potencial do conjunto eixo-pistão aumenta de 0,2 kJ, e a força de 1334 N é exercida sobre o eixo, como ilustrado na figura. O pistão e o cilindro são maus

condutores térmicos e o atrito pode ser desprezado. A pressão atmosférica local é de 1 bar e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Determine (a) o trabalho realizado pelo eixo, (b) o trabalho realizado pelo deslocamento em virtude da atmosfera, (c) a transferência de calor para o gás, todos em kJ. (d) Usando os dados fornecidos e calculados, desenvolva um balanço detalhado da transferência de energia por meio de calor para o gás.

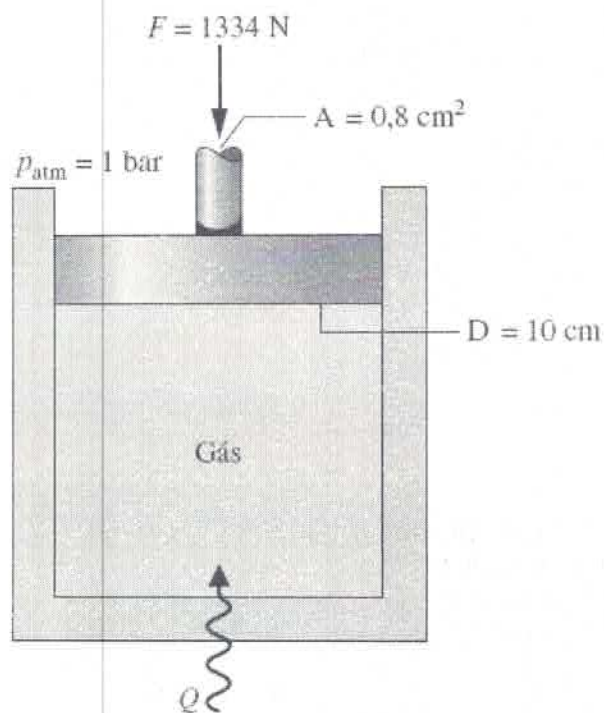


Fig. P2.73

Analizando Ciclos Termodinâmicos

2.74 A seguinte tabela fornece dados, em kJ, para um sistema que percorre um ciclo de potência composto por quatro processos em série. Determine

(a) os dados que faltam na tabela, todos em kJ, e (b) a eficiência térmica.

Processo	ΔE	Q	W
1-2	-1200	0	
2-3		800	
3-4		-200	-200
4-1	400		600

2.75 A seguinte tabela fornece dados, em Btu, para um sistema que percorre um ciclo termodinâmico composto por quatro processos em série. Determine (a) os dados que faltam na tabela, todos em Btu, e (b) a eficiência térmica.

Processo	ΔU	ΔEC	ΔEP	ΔE	Q	W
1-2	950	50	0		1000	
2-3		0	50	-450		450
3-4	-650		0	-600		0
4-1	200	-100	-50		0	

2.76 A Fig. P2.76 mostra um ciclo de potência efetuado por um gás em um conjunto cilindro-pistão. Para o processo 1-2, $U_2 - U_1 = 15$ kJ. Para o processo 3-1, $Q_{31} = 10$ kJ. Não há variações na energia cinética ou potencial. Determine (a) o trabalho para cada processo, em kJ, (b) a transferência de calor para os processos 1-2 e 2-3, ambos em kJ, e (c) a eficiência térmica.

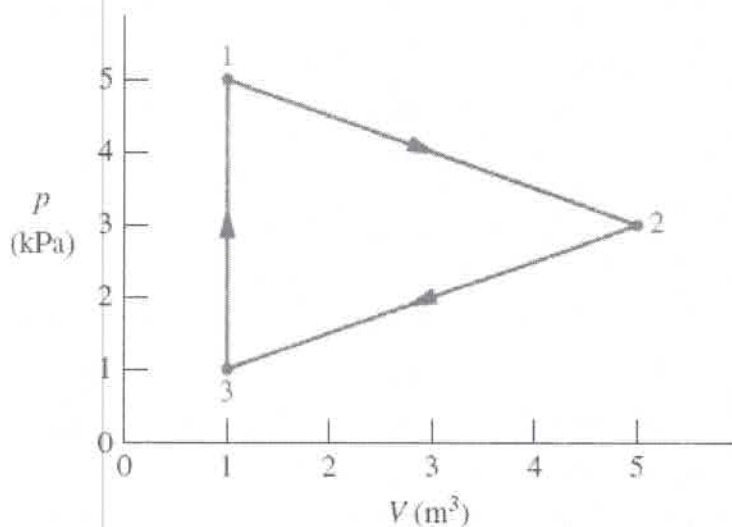


Fig. P2.76

2.77 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos em série, iniciando no estado 1, em que $p_1 = 1$ bar, $V_1 = 1,5$ m³, como a seguir:

Processo 1-2: Compressão com $pV = \text{constante}$, $W_{12} = -104$ kJ, $U_1 = 512$ kJ, $U_2 = 690$ kJ.

Processo 2-3: $W_{23} = 0$, $Q_{23} = 150$ kJ.

Processo 3-1: $W_{31} = +50$ kJ.

Não há variações na energia cinética ou potencial.

(a) Determine Q_{12} , Q_{31} , e U_3 , todos em kJ. (b) Esse ciclo pode ser de potência? Explique.

2.78 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos:

Processo 1-2: Compressão com $pV = \text{constante}$, de $p_1 = 1$ bar, $V_1 = 2$ m³ até $V_2 = 0,2$ m³, $U_2 - U_1 = 100$ kJ.

Processo 2-3: Volume constante até $p_3 = p_1$.

Processo 3-1: Pressão constante e processo adiabático.

Não há variações significativas na energia cinética ou potencial. Determine o trabalho resultante do ciclo, em kJ, e a transferência de calor para o processo 2-3, em kJ. Esse é um ciclo de potência ou de refrigeração? Explique.

2.79 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos:

Processo 1-2: Pressão constante, $V = 0,028 \text{ m}^3$, $p = 1,4 \text{ bar}$.

Processo 2-3: Compressão com $pV = \text{constante}$, $U_3 = U_2$.

Processo 3-1: Volume constante, $U_1 - U_3 = -26,4 \text{ kJ}$.

Não há variações significativas na energia cinética ou potencial.

(a) Esboce o ciclo em um diagrama p - V .

(b) Calcule o trabalho líquido para o ciclo, em kJ.

(c) Calcule a transferência de calor para o processo 1-2, em kJ.

2.80 Um gás em um conjunto cilindro-pistão percorre um ciclo termodinâmico composto por três processos em série, como mostra a Fig. P2.80:

Processo 1-2: Compressão com $U_2 = U_1$.

Processo 2-3: Resfriamento a volume constante até $p_3 = 140 \text{ kPa}$, $V_3 = 0,028 \text{ m}^3$.

Processo 3-1: Expansão a pressão constante, com $W_{31} = 10,5 \text{ kJ}$.

Para o ciclo, $W_{\text{ciclo}} = -8,3 \text{ kJ}$. Não há variações na energia cinética ou potencial. Determine (a) o volume no estado 1, em m^3 , (b) o trabalho e a transferência de calor para o processo 1-2, ambos em kJ. (c) Este pode ser um ciclo de potência? Pode ser um ciclo de refrigeração? Explique.

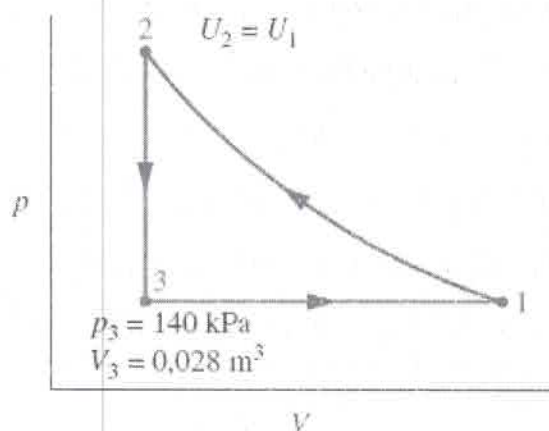


Fig. P2.80

2.81 O trabalho líquido de um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17a é 10.000 kJ e a eficiência térmica é $0,4$. Determine as transferências de calor (Q_{entra} e Q_{sai}) em kJ.

2.82 Para um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17a, a transferência de energia por meio de calor para o ciclo, Q_{entra} , é 500 MJ. Qual é o trabalho realizado (em MJ) se a eficiência térmica é 30%. Determine Q_{sai} em MJ.

2.83 Para um ciclo de potência operando como na Fig. 2.17a, $Q_{\text{entra}} = 17 \times 10^6$ Btu e $Q_{\text{sai}} = 12 \times 10^6$ Btu. Determine o trabalho realizado (em Btu) e h.

2.84 Um sistema que percorre um ciclo de potência requer uma entrada de energia por transferência de calor de 10^4 Btu (10,5 MJ) para cada kW · h de trabalho líquido desenvolvido. Determine a eficiência térmica.

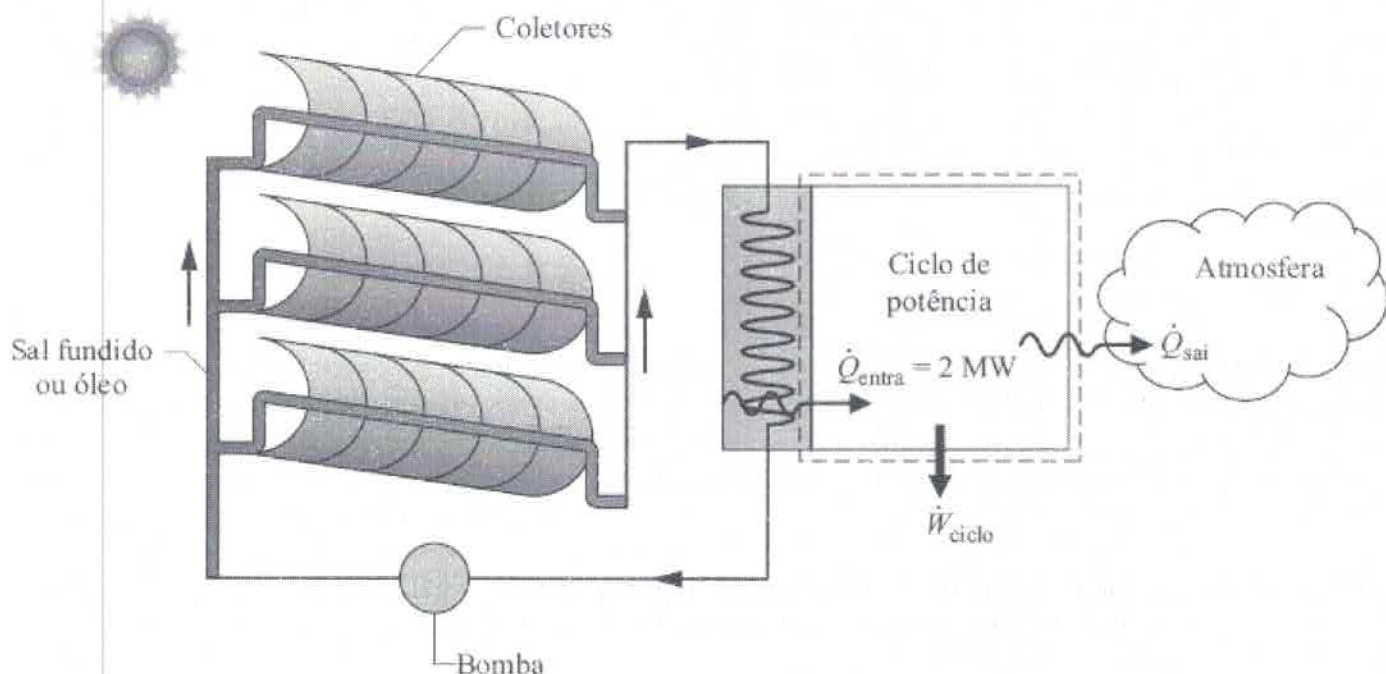
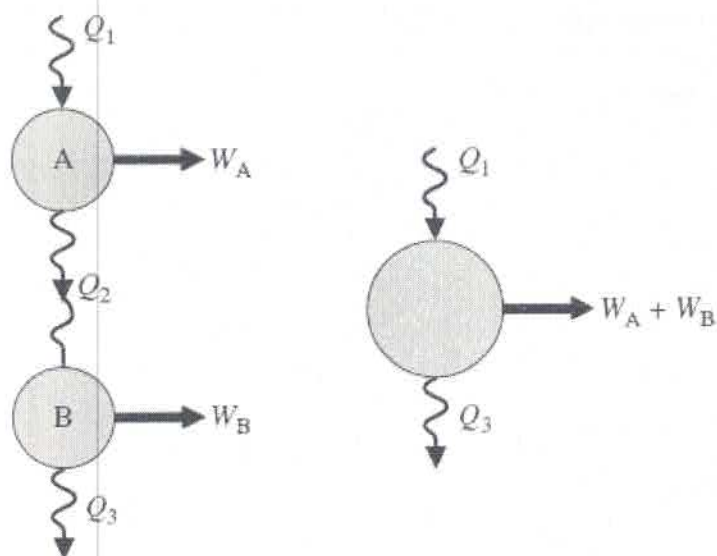


Fig. P2.85

2.85 Um sistema de células solares, como mostrado na Fig. P2.85, fornece energia por transferência de calor para um ciclo de potência a uma taxa de 2 MW. A eficiência térmica do ciclo é 36%. Determine a potência do ciclo, em MW. Qual é o trabalho (W_{sai}), em MW · h, durante 4380 h de operação em regime permanente? Se o custo é estimado em \$ 0,08/kW · h, qual é o valor total envolvido na operação?

2.86 A Fig. P2.86 mostra dois ciclos de potência, A e B, operando em série, com a transferência de energia por calor para o ciclo B igual em magnitude à transferência de energia por calor proveniente do ciclo A. Todas as transferências de energia são positivas no sentido indicado pelas setas. Determine uma expressão para a eficiência térmica do ciclo global constituído pelos ciclos A e B juntos, em termos das respectivas eficiências térmicas individuais.



(a) A e B em série

(b) Ciclo global

Fig. P2.86

2.87 A Fig. P2.87 mostra uma central de *cogeração* de energia operando em um ciclo termodinâmico em regime permanente. A central fornece eletricidade para uma comunidade a uma taxa de 80 MW. A energia rejeitada pela central por transferência de calor está indicada na figura por \dot{Q}_{sai} . Desta, 70 MW é fornecida à comunidade para o aquecimento da água e o resto é rejeitado para o ambiente sem ser usado. A eletricidade vale \$0,08 por kW · h. Se a eficiência térmica do ciclo for de 40%, determine (a) a taxa de energia adicionada por transferência de calor, \dot{Q}_{entra} em MW, (b) a taxa de energia rejeitada para o ambiente, \dot{Q}_{sai} , em MW, e (c) o valor da eletricidade gerada, em \$ por ano.

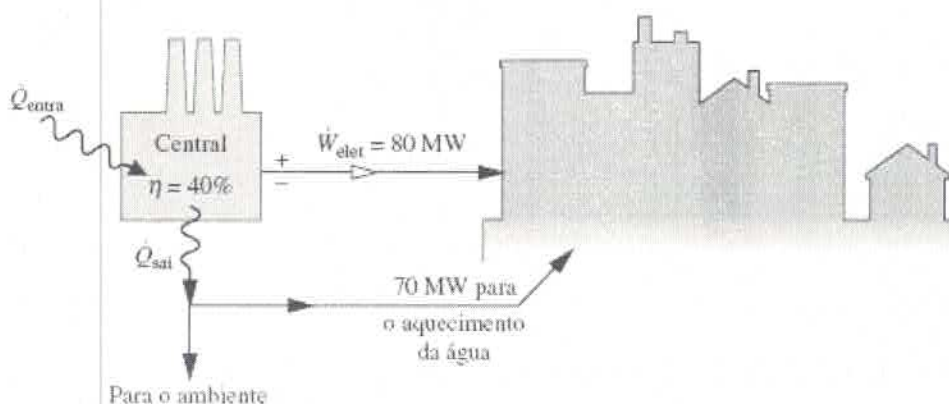


Fig. P2.87

2.88 Um ciclo de refrigeração operando como mostra a Fig. 2.17(b) apresenta $Q_{\text{sai}} = 1000 \text{ Btu}$ (1055,1 kJ) e $W_{\text{ciclo}} = 300 \text{ Btu}$ (316,5 kJ). Determine o coeficiente de desempenho para o ciclo.

2.89 Um ciclo de refrigeração que opera como mostra a Fig. 2.17(b) apresenta um coeficiente de desempenho $b = 1,8$. Para o ciclo, $Q_{\text{sai}} = 250 \text{ kJ}$. Determine Q_{entra} e W_{ciclo} , ambos em kJ.

2.90 O refrigerador mostrado na Fig. P2.90 opera em regime permanente com uma potência de entrada de 0,15 kW, enquanto rejeita energia por transferência de calor para o ambiente a uma taxa de 0,6 kW. Determine a taxa na qual a energia é removida por meio de transferência de calor do espaço refrigerado, em kW, e o coeficiente de desempenho

do refrigerador.

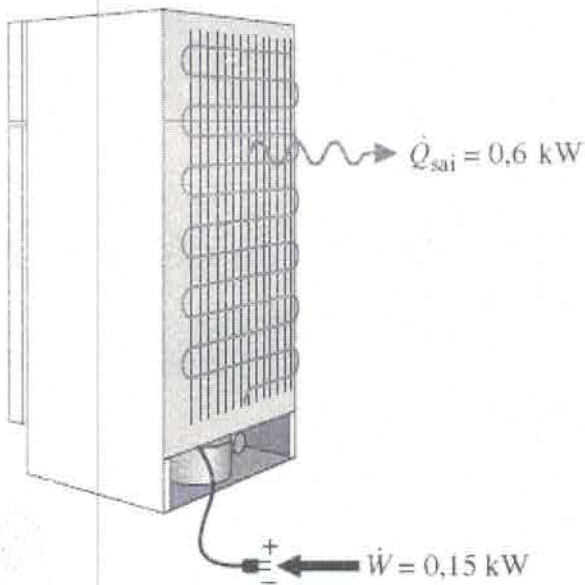


Fig. P2.90

2.91 Para um refrigerador com degelo automático e um freezer na parte superior, o custo anual de eletricidade é de \$55. (a) Calculando a eletricidade a \$0,08 por $\text{kW} \cdot \text{h}$, determine o consumo anual de eletricidade do refrigerador, em $\text{kW} \cdot \text{h}$. (b) Considerando que o coeficiente de desempenho do refrigerador é 3, determine a quantidade de energia removida anualmente de seu espaço refrigerado, em MJ.

2.92 Um aparelho de ar-condicionado remove de um cômodo a energia sob a forma de calor, rejeitando-a para o ambiente externo. Para um sistema operando em regime permanente, o ciclo de operação do equipamento requer $0,434 \text{ kW}$ e tem um coeficiente de desempenho de 6,22. Determine a taxa de remoção de energia em kW . Considerando o valor da energia elétrica \$0,1 por $\text{kW} \cdot \text{h}$, determine o custo de utilização do equipamento durante 24 h.

2.93 Uma unidade de ar-condicionado com um coeficiente de desempenho 2,93 fornece 5000 Btu/h de resfriamento operando durante 8 h por 125 dias. Se o valor da energia elétrica é \$0,1 / $\text{kW} \cdot \text{h}$, determine o custo de utilização do equipamento durante o período estipulado.

2.94 Uma bomba de calor operando em regime permanente recebe energia por transferência de calor da água de um poço a 10°C e rejeita energia por transferência de calor para uma residência a uma taxa de $1,2 \times 10^5 \text{ kJ/h}$. Em um período de 14 dias um medidor de energia elétrica registra que a bomba de calor recebe $1490 \text{ kW} \cdot \text{h}$ de eletricidade. Essas são as únicas formas de transferência de energia envolvidas. Determine (a) a quantidade de energia que a bomba de calor recebe da água do poço em um período de 14 dias por transferência de calor, em kJ, e (b) o coeficiente de desempenho da bomba de calor.

2.95 Uma bomba de calor mantém uma residência a 68°F ($20,0^\circ\text{C}$). Quando operando em regime permanente, a potência de entrada da bomba de calor é de 5 hp ($3,7 \text{ kW}$), e a bomba de calor recebe energia por transferência de calor da água de um poço a 55°F ($12,8^\circ\text{C}$) a uma taxa de 500 Btu/min ($8792,2 \text{ W}$).

(a) Determine o coeficiente de desempenho.

(b) Calculando a eletricidade a \$0,10 por $\text{kW} \cdot \text{h}$, determine o custo da eletricidade em um mês em que a bomba opera por 300 horas.

2.96 Uma bomba de calor fornece energia por transferência de calor para uma residência a uma taxa de 40.000 Btu/h

(11,7 kW). O coeficiente de desempenho do ciclo é 2,8.

(a) Determine a potência fornecida ao ciclo, em hp.

(b) Calculando a eletricidade a \$0,085 por kW · h, determine o custo de eletricidade durante o inverno, quando a bomba de calor opera por 2000 horas.

► PROJETOS E PROBLEMAS EM ABERTO: EXPLORANDO A PRÁTICA DE ENGENHARIA

2.1P Visite uma loja local de eletrodomésticos e colete dados sobre as necessidades energéticas de diferentes modelos das várias classes de aparelhos, incluindo refrigeradores com e sem máquinas de gelo, lava-louças e lavadoras e secadoras de roupas, mas não se limite a apenas estes aparelhos. Prepare um relatório listando os diferentes modelos de cada classe com base no consumo de energia, juntamente com uma discussão correspondente considerando o custo a varejo e outras questões pertinentes.

2.2P Selecione um artigo que possa ser produzido usando materiais reciclados como uma lata de alumínio, uma garrafa de vidro, ou uma sacola plástica ou de papel de supermercado. Pesquise os materiais, o consumo energético, os métodos de fabricação, os impactos ambientais e os custos associados com a produção do artigo a partir das matérias-primas e a partir dos materiais reciclados. Escreva um relatório com pelo menos três referências.

2.3P Projete um sistema de proteção contra o vento que possa ser levado e usado em qualquer lugar, para atividades ao ar livre e atividades diárias casuais, incluindo tomar banho de sol, ler, cozinhar e fazer piquenique. O sistema deve ser leve, portátil, fácil de manusear e de baixo custo. Uma restrição importante é que o sistema deve poder ser instalado em qualquer lugar, incluindo superfícies duras, tais como estacionamentos abertos, deques de madeira, pátios de tijolo e concreto, e a praia. Uma análise de custos deve acompanhar o projeto.

2.4P Nos organismos a energia é armazenada na molécula de *adenosina trifosfato*, abreviada como ATP. Diz-se que a ATP atua como uma bateria, armazenando energia quando não solicitada e liberando instantaneamente energia quando necessário. Investigue como a energia é armazenada e o papel da ATP nos processos biológicos. Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências.

2.5P O alcance global da internet deu suporte a um rápido aumento de consumidores e empresas de comércio eletrônico. Alguns dizem que comércio eletrônico resultará em reduções líquidas tanto com relação ao consumo de energia quanto com relação à alteração climática global. Usando a Internet, entrevistas com especialistas e grupos de discussão, identifique diversas formas importantes de comércio eletrônico que podem levar a tais reduções. Relate seus resultados em um memorando com pelo menos três referências.

2.6P Faça uma lista das opções de refrigeração residencial mais comuns em sua localidade. Para essas opções e considerando uma casa de 2300 ft² (213,7 m²), compare os custos de instalação, as emissões de carbono e as taxas anuais de eletricidade. Qual das opções é a mais econômica para uma vida útil de 12 anos? E se a eletricidade custar duas vezes o seu custo atual? Prepare um pôster para apresentar seus resultados.

2.7P A partir de dados da agência regulatória de energia elétrica do seu estado, determine a divisão das fontes de energia para geração de energia elétrica. Qual fração das necessidades de seu estado é suprida por recursos renováveis, como energia eólica, geotérmica, hidrelétrica e solar? Apresente suas descobertas em um relatório que resuma as informações sobre as fontes atuais de energia em seu estado e faça projeções de como suprir a demanda nos próximos 10 anos.

2.8P Apesar da promessa da nanotecnologia (veja *Novos Horizontes* nas Seções 1.6 e 2.2), alguns dizem que estão envolvidos riscos que requerem uma análise minuciosa. Por exemplo, o tamanho pequeno das nanopartículas poderá permitir-lhes evadir das defesas naturais do corpo humano, e a fabricação em nanoescala poderá levar a danos ambientais e ao uso excessivo dos recursos energéticos. Pesquise os riscos que acompanham a produção e a implantação da nanotecnologia difundida. Para cada risco identificado, desenvolva políticas de recomendações para proteger os consumidores e o meio ambiente. Escreva um relatório com pelo menos três referências.

2.9P O descarte de baterias apresenta sérios riscos ao ambiente (veja o boxe *Energia e Ambiente*). Pesquise a legislação específica que regula a coleta e o destino dessas baterias. Prepare uma apresentação que sumarie a regulamentação e os programas e serviços existentes para atender a diferentes áreas. Determine os dados baseando-se na eficácia desses esforços para alcançar os devidos benefícios ambientais.

2.10P Um anúncio descreve um aquecedor portátil que afirma reduzir mais de 50% dos custos relativos ao aquecimento em uma casa. Diz-se que o aparelho pode aquecer grandes quartos em minutos, sem que a superfície externa fique com uma temperatura alta, reduzindo a umidade e os níveis de oxigênio ou produzindo monóxido de carbono. Um posicionamento típico está ilustrado na Fig. P2.10P. O aquecedor é um recinto contendo lâmpadas elétricas de infravermelho de quartzo que brilham sobre tubos de cobre. O ar sugado para o recinto por um ventilador escoa sobre os tubos e então é direcionado de volta à sala de estar. De acordo com o anúncio, um aquecedor capaz de aquecer um quarto de até 300 ft² (27,9 m²) de área útil custa cerca de \$400, enquanto um para um quarto com até 1000 ft² (92,9 m²) de área útil custa cerca de \$500. Analise criticamente os méritos técnico e econômico de tais aquecedores. Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências.

2.11P Um inventor propôs *tomar emprestada* água do sistema adutor municipal e armazená-la *temporariamente* em um tanque nas instalações de uma residência equipada com uma bomba de calor. Conforme ilustrado na Fig. P2.11P, a água armazenada atua como o corpo frio para a bomba de calor, e a própria residência atua como o corpo quente. Para manter a temperatura do corpo frio dentro de uma gama adequada de funcionamento, a água é retirada periodicamente do sistema e uma quantidade igual de água, a baixa energia, retorna ao sistema. Como a invenção não requer água *líquida* do sistema, o inventor afirma que nada é pago pelo uso da água. O inventor também afirma que esse tipo de abordagem não apenas fornece um coeficiente de desempenho superior àquele das bombas de calor com *fontes de ar* como também evita custos associados às bombas de calor *de solo*. Assim, o inventor conclui que há uma economia significativa com relação aos custos. Analise criticamente a afirmação do inventor. Escreva um relatório com no mínimo três referências.

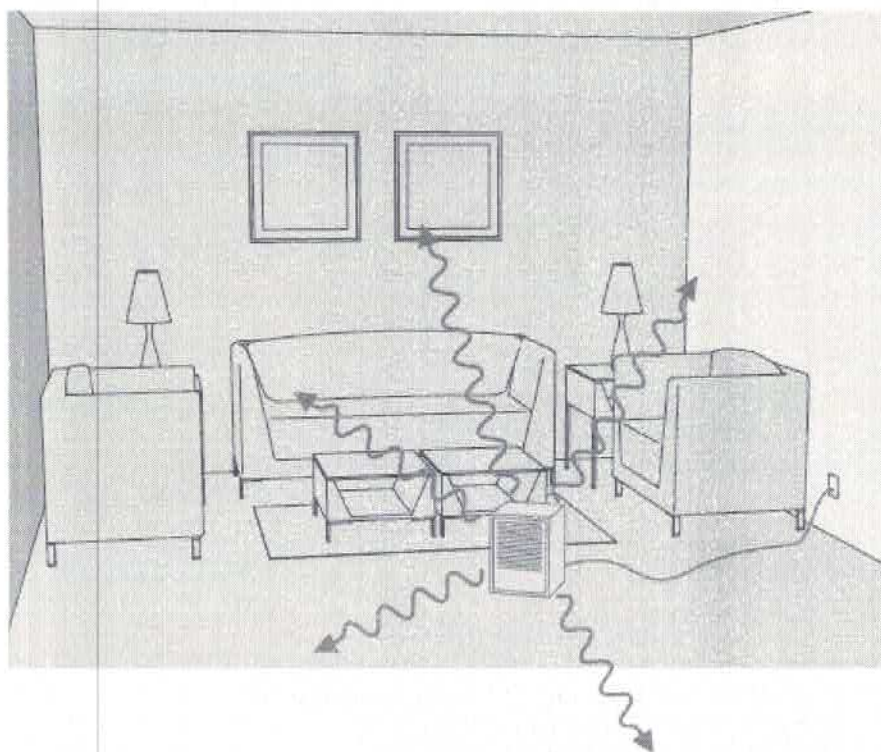


Fig. P2.10P

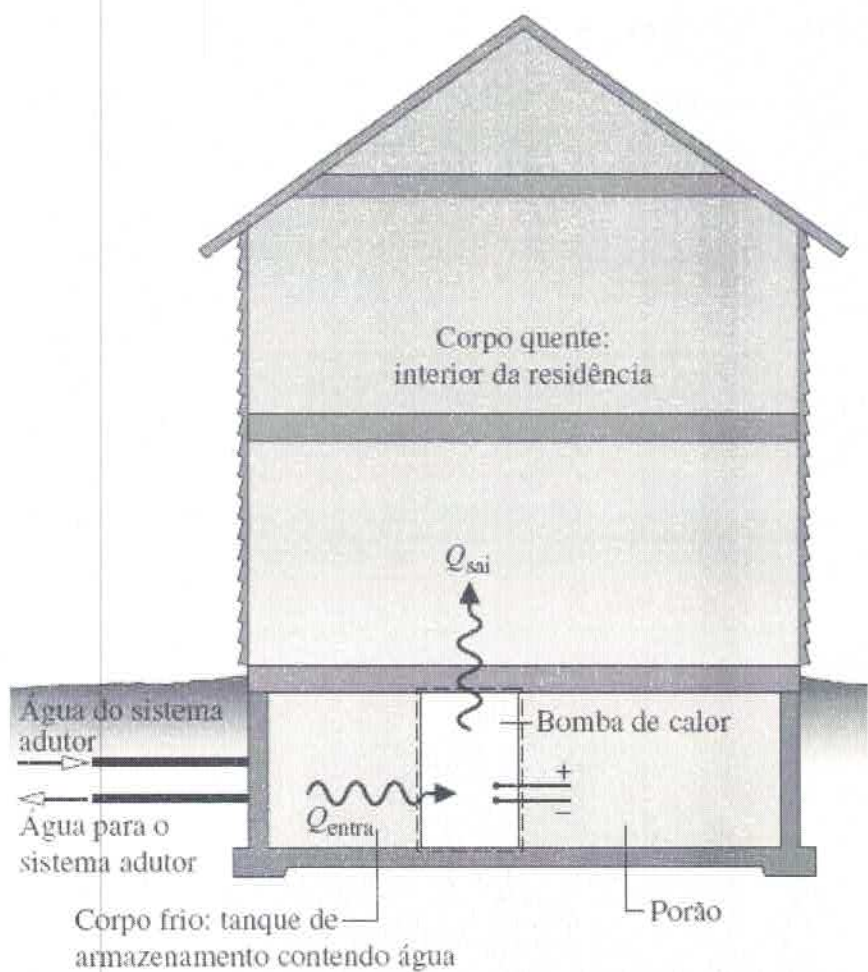


Fig. P2.11P



As fases da matéria – sólida, líquida e vapor – são consideradas na Seção 3.2. © next999/iStockphoto

CONTEXTO DE ENGENHARIA A aplicação do balanço de energia a um sistema de interesse requer o conhecimento das propriedades desse sistema e de como essas propriedades estão relacionadas. Este capítulo tem como **objetivos** apresentar relações de propriedades relevantes à termodinâmica voltada para a engenharia e fornecer diversos exemplos ilustrando o uso do balanço de energia para o sistema fechado, junto com as relações das propriedades consideradas no presente capítulo.