MÁQUINAS PRIMÁRIAS

Anselmo Cukla

Calor, trabalho e a primeira lei da termodinâmica

Objetivos de aprendizagem

Ao final deste texto, você deve apresentar os seguintes aprendizados:

- Conceituar trabalho e calor.
- Relacionar trabalho e calor.
- Identificar as implicações teóricas da primeira lei da termodinâmica.

Introdução

Trabalho e calor são formas de transferência de energia de uma substância ou sistema para outra. Para a correta análise das transferências, é necessária a utilização dos modelos matemáticos que governam os sistemas e o seu comportamento termodinâmico. A transferência de calor e o trabalho de um sistema podem ser explicados de forma simples por meio da primeira lei da termodinâmica, também conhecida como lei da conservação de energia.

Neste capítulo, você vai estudar os conceitos relacionados ao trabalho e ao calor e o princípio da termodinâmica que os rege. Esses conceitos são essenciais para que você analise de forma correta muitos problemas que envolvem processos industriais termodinâmicos. Além disso, você vai verificar a relação entre trabalho e calor e vai identificar as implicações teóricas e as aplicações da primeira lei da termodinâmica.

Conceitos de trabalho e calor

Neste tópico, vamos definir as duas grandezas mais importantes utilizadas na área da termodinâmica e, mais especificamente, no estudo da transferência de energia: o trabalho e o calor. Tais conceitos nos levarão ao entendimento da primeira lei da termodinâmica.

Trabalho

Embora o termo trabalho seja muito amplo, é possível especificar a sua definição técnica na área da termodinâmica. Segundo Potter e Somerton (2017), essa definição deve abranger, por exemplo, o trabalho realizado pela expansão dos gases de combustão do motor de um carro, como mostra a Figura 1. O processo de combustão do combustível libera uma quantidade de energia que é transferida para o virabrequim, por meio da viela, movimentando o motor e realizando, assim, uma forma de trabalho. Nesse exemplo, o trabalho é realizado por meio do intercâmbio de energia nos gases do cilindro do motor.

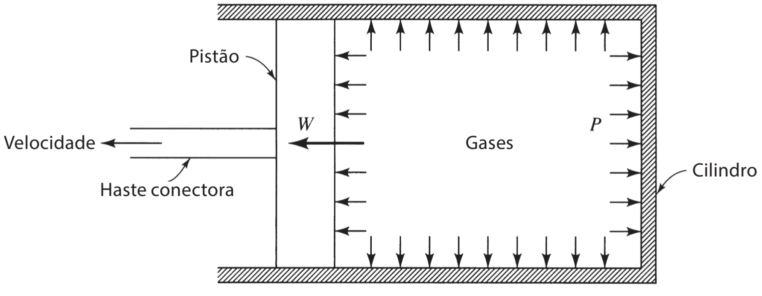


Figura 1. Exemplo de trabalho realizado pelos gases dentro de um motor.
Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 42).

Por definição, na física, o trabalho é designado por W e obtido mediante o produto escalar de uma força (F) pela distância (d), caracterizando o deslocamento de um determinado objeto na direção da força, conforme leciona Potter e Somerton (2017). O trabalho também é definido como a integral de uma força agindo entre os pontos 1 e 2, conforme é apresentado na seguinte equação:

$$\boldsymbol{W} = F \cdot d = \int_1^2 F \cdot dx$$

Essa é uma **definição mecânica de trabalho**.

Já a **definição termodinâmica** diz que o trabalho é uma interação entre um sistema e sua vizinhança. Este é realizado por um sistema se o único efeito externo sobre a vizinhança for, por exemplo, a elevação de um peso, conforme explicam Potter e Somerton (2017). A Figura 2 mostra exemplos de trabalhos realizados por sistemas elétricos. A convenção escolhida para o trabalho positivo é que, se o sistema realiza o trabalho sobre a vizinhança, ele é positivo.

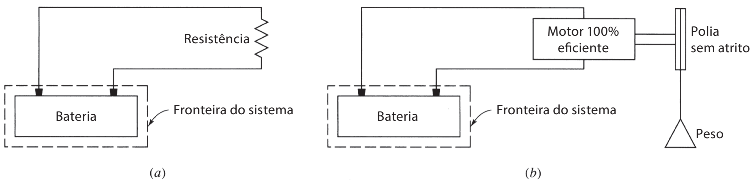


Figura 2. Trabalho realizado por um sistema elétrico: a) trabalho de uma resistência elétrica e b) trabalho realizado por um motor elétrico.

Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 42).

O trabalho associado com uma unidade de massa é definido como ϖ (não se deve confundir com o peso específico):

$$\varpi = \frac{\boldsymbol{W}}{m}$$

Potter (2017) define que as unidades de trabalho são identificadas como unidades de força multiplicadas por unidades de distância: no Sistema Internacional de Unidades (SI), utiliza-se newton-metros (N·m) ou joules (J); no sistema imperial, usa-se a unidade ft-lbf. Assim:

$$1\,J = 1N \cdot m$$

A taxa de realização de trabalho, designada por *W*, é chamada de potência. No sistema SI, a potência tem as unidades joules por segundo (J/s) ou watts (W); no sistema imperial, ft-lbf/sec. Assim:

$$\dot{W} = \frac{dW}{dt}$$
$$1\,W = 1\,J/s$$

Trabalho para um sistema em rotação: observe que o conceito de trabalho pode ser aplicado ao sistema da Figura 2b, em que o motor possui uma polia.

Nesse caso, podemos utilizar a seguinte expressão para relacionar o trabalho rotacional:

$$dW = F\,dx = F\,r\,d\theta = T\,d\theta$$

Da mesma forma, o trabalho pode ser expresso como o produto de uma força agindo ao longo de um deslocamento *x*. Nesse caso, pode ser relacionado com o torque, o movimento rotacional cujo momento angular é o produto vetorial de $\tau = F \times r$, onde *r* é o raio do ponto do torque. A potência é:

$$\dot{W} = \frac{dW}{dt} = F\frac{dx}{dt} = F \cdot V = Fr\frac{d\theta}{dt} = \tau\omega$$

onde ω é a velocidade angular do eixo.

Trabalho pela pressão dos gases: considere o arranjo pistão-cilindro na Figura 3 como sendo um sistema fechado, considerando que não há efeitos externos como atrito, forças elétricas ou magnéticas atuando sobre o sistema. Dessa forma, quando você move o pistão para cima, correspondendo a uma pequena distância *ds*, isso permite que ocorra uma expansão do gás.

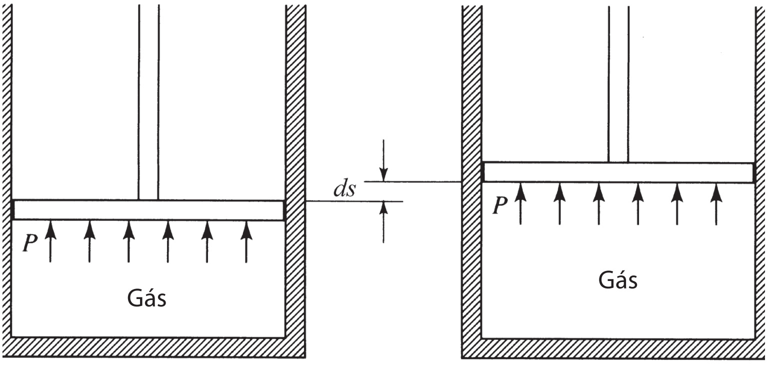


Figura 3. Trabalho realizado por um gás dentro de um sistema pistão-cilindro.
Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 43).

A pressão interna no pistão é expressa como uma pressão absoluta, e o trabalho infinitesimal que o sistema (o gás) realiza no pistão consiste na força multiplicada pela pressão. Assim:

$$dW = PA\,ds$$

onde P é a pressão, A é a área do pistão, W é o trabalho e ds é a distância percorrida pelo cilindro. Assim, o valor de Ads consiste no volume. Portanto:

$$dW = P\,dV$$

Quando o pistão se movimenta de um ponto 1 a um ponto 2:

$$W = \int_1^2 PdV$$

Na Figura 4, é apresentado o diagrama de pressão-volume do sistema descrito. Veja que o trabalho W_{1-2} é diferente de W_{2-1}. Isso se deve ao fato de que o trabalho depende da trajetória a ser percorrida; portanto, o trabalho não está associado a um estado, mas a um processo, conforme lecionam Potter e Somerton (2017).

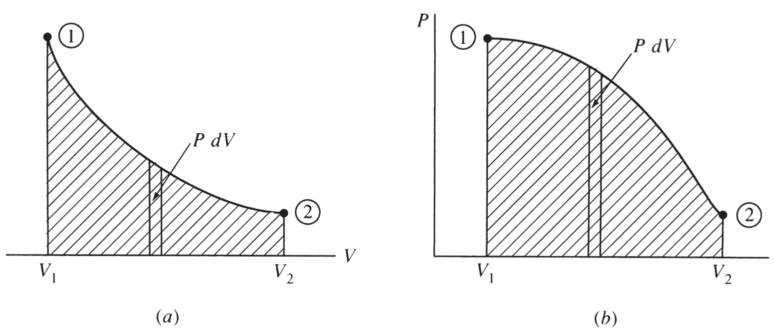


Figura 4. O trabalho de um sistema depende da trajetória percorrida.

Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 43).

Trabalho realizado por uma mola: o trabalho necessário para deformar uma mola linear que possui uma constante elástica K, de um comprimento x_1 até um comprimento x_2 (Figura 5), pode ser calculado utilizando-se a seguinte relação de força:

$$F = Kx$$

onde x é a distância efetiva que a mola será estendida. Assim, para calcular o trabalho, utilizamos o conceito inicial, escrito da seguinte forma:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F\,dx = \int_{x_1}^{x_2} Kx\,dx = \frac{1}{2}K(x_2^2 - x_1^2)$$

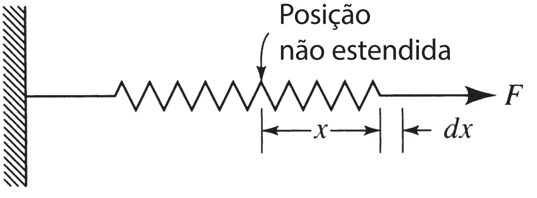


Figura 5. Trabalho realizado por uma mola de constante *K*.
Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 47).

Trabalho realizado por um sistema elétrico: outro tipo de sistema que é utilizado amplamente para calcular a quantidade de trabalho realizado é o sistema elétrico, conforme apresentado na Figura 6. A diferença de potencial V entre os terminais da bateria é a "força" que impulsiona a carga q através do resistor durante o incremento de tempo Δt. A corrente i está relacionada com a carga por $i = dq/dt$. Se a corrente for constante, a carga é $q = i\,\Delta t$. Desse modo, o trabalho elétrico pode ser escrito da seguinte forma:

$$W = V\,i\Delta t$$

Essa forma de cálculo é frequentemente utilizada para se determinar a energia dissipada por um sistema elétrico puramente resistivo.

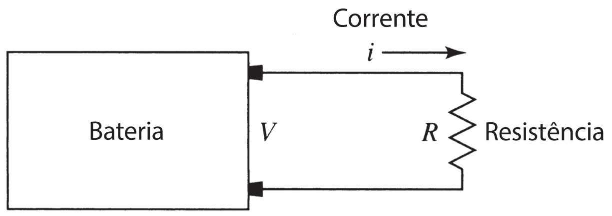


Figura 6. Trabalho realizado por um sistema elétrico.
Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 48).

Trabalho realizado pela gravidade: quando um corpo é erguido em um campo gravitacional, sua energia potencial aumenta. Da mesma forma, quando um corpo é acelerado, sua energia cinética aumenta, conforme lecionam Çengel e Boler (2013). O princípio de conservação da energia exige que uma quantidade equivalente de energia seja transferida para o corpo que é erguido ou acelerado. Dessa forma, ainda conforme Çengel e Boler (2013):

- O trabalho necessário para elevar um corpo é igual à variação da energia potencial do corpo, onde m é a massa do corpo, g é a aceleração da gravidade e h é a altura efetiva de deslocamento. Veja que h pode ser positiva ou negativa, dependendo do sistema de referência a ser utilizado:

$$W = mgh$$

- O trabalho necessário para acelerar um corpo é igual à variação da energia cinética do corpo, onde V_1 e V_2 são as velocidades inicial e final do corpo. Da mesma forma, a energia potencial ou cinética de um corpo representa o trabalho que pode ser obtido do corpo à medida que é abaixado até o nível de referência ou desacelerado até a velocidade zero.

$$W = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)$$

Exemplo

Exemplo 1: energia necessária para um carro subir um aclive

Considere um automóvel pesando 1.200 kg, trafegando à velocidade constante de 90 km/h em uma estrada plana. O automóvel, então, começa a subir uma ladeira com 30° de inclinação em relação à horizontal (figura abaixo). Para que a velocidade do automóvel permaneça constante durante a subida, determine a potência adicional que deve ser fornecida pelo motor.

$$\dot{W}_g = mg\ \Delta z/\Delta t = mgV_{\text{vertical}}$$

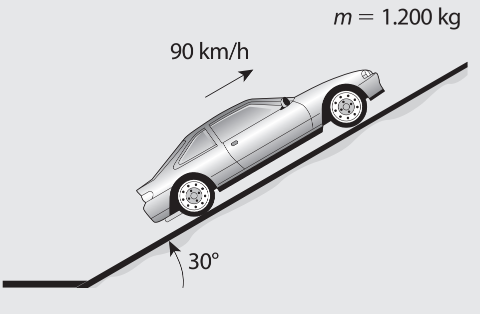
$$= (1.200\ \text{kg})(9{,}81\ \text{m/s}^2)(90\ \text{km/h})(\text{sen}\ 30°)\left(\frac{1\ \text{m/s}}{3{,}6\ \text{km/h}}\right)\left(\frac{1\ \text{kJ/kg}}{1.000\ \text{m}^2/\text{s}^2}\right)$$

$$= 147\ \text{kJ/s} = \mathbf{147\ kW} \qquad (\text{ou } 197\ \text{hp})$$

Fonte: Çengel e Boler (2013, p. 69).

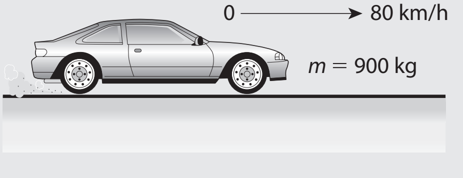
Solução.

Um automóvel deve subir uma ladeira e manter uma velocidade constante. A potência adicional necessária deve ser determinada. A potência adicional necessária é simplesmente o trabalho que precisa ser realizado por unidade de tempo para elevar a altura do automóvel, que é igual à variação da energia potencial do automóvel por unidade de tempo:



Exemplo 2: energia para acelerar um carro

Determine a potência necessária para acelerar um automóvel de 900 kg (mostrado na figura abaixo), indo de uma velocidade inicial de 0 km/h até 80 km/h em 20 s, em uma estrada plana:



Fonte: Çengel e Boler (2013, p. 69).

Solução.

A potência necessária para acelerar um automóvel até uma velocidade especificada deve ser determinada. O trabalho necessário para acelerar um corpo é simplesmente a variação da energia cinética do corpo:

$$W_a = \tfrac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) = \tfrac{1}{2}(900\text{ kg})\left[\left(\frac{80.000\text{ m}}{3.600\text{ s}}\right)^2 - 0^2\right]\left(\frac{1\text{ kJ/kg}}{1.000\text{ m}^2/\text{s}^2}\right)$$
$$= 222\text{ kJ}$$

Assim, a potência média é determinada por:

$$\dot{W}_a = \frac{W_a}{\Delta t} = \frac{222\text{ kJ}}{20\text{ s}} = \mathbf{11{,}1\ kW} \qquad (\text{ou } 14{,}9\text{ hp})$$

Calor

Por definição, o calor é a manifestação física da **energia térmica**. Dessa forma, o calor é a energia transferida através da fronteira de um sistema devido à diferença de temperatura entre o sistema e sua vizinhança. Esse fenômeno também é chamado de transferência de calor, conforme lecionam Potter e Somerton (2017). Pense, por exemplo, em um bloco quente e um bloco frio, ambos com a mesma massa. O bloco quente contém mais energia do que o frio, pois sua atividade molecular é maior, ou seja, sua temperatura é mais elevada. Quando os blocos são colocados em contato um com o outro, a energia flui do bloco quente para o frio por meio da transferência de calor. Com o tempo, os blocos alcançam o **equilíbrio térmico**, com ambos atingindo a mesma temperatura.

A transferência de energia por calor é representada na Figura 7, em que o calor e o trabalho podem atravessar a fronteira de um sistema fechado. Essas duas formas de energia serão discutidas neste capítulo e são a base para a interpretação das leis da termodinâmica. Pense agora em outra situação da vida real: você deixa uma lata de refrigerante gelada sobre uma mesa; ela aquece após um certo tempo, da mesma forma que uma batata assada colocada sobre a mesma mesa esfria. Quando um corpo é deixado em um meio que está a uma temperatura diferente, a transferência de energia ocorre entre o corpo e o meio até que o equilíbrio térmico seja estabelecido, ou seja, até que o corpo e o meio atinjam a mesma temperatura, conforme lecionam Çengel e Boler (2013).

A direção da transferência de energia sempre é do corpo com temperatura mais alta para aquele com temperatura mais baixa. A transferência de energia calórica acontece até que a temperatura de ambos os corpos seja a mesma.

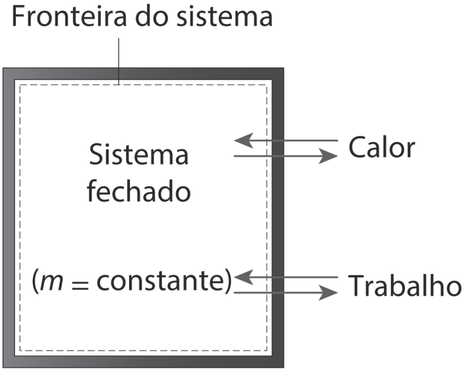


Figura 7. Transferência de energia e trabalho em um sistema fechado.
Fonte: Çengel e Boler (2013, p. 60).

Assim, Çengel e Boler (2013) resumem que o calor é a forma de energia transferida entre dois sistemas (ou entre um sistema e sua vizinhança) em virtude da diferença de temperaturas (Figura 8). Dessa forma, não pode haver qualquer transferência de calor entre dois sistemas que estejam à mesma temperatura.

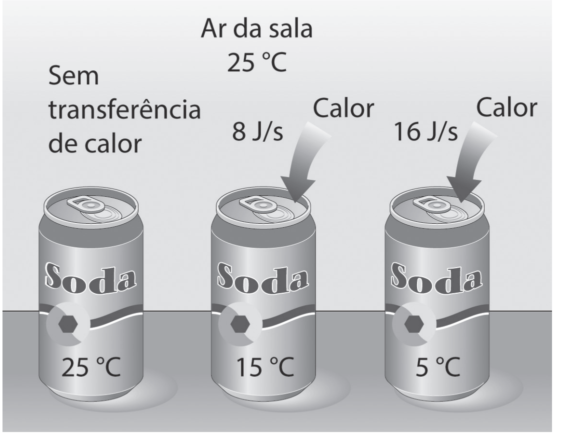


Figura 8. Quanto maior é a diferença de temperatura, maior é a transferência de calor.
Fonte: Çengel e Boler (2013, p. 60).

Segundo Potter e Somerton (2017), o calor, assim como o trabalho, é algo que cruza uma fronteira ou limite de um determinado sistema. Para um processo em particular, entre o estado 1 e o estado 2, a transferência de calor pode ser indicada por Q_{1-2}, mas geralmente é denotada por Q.

Às vezes, é conveniente referir-se à transferência de calor por unidade de massa. A **transferência de calor por unidade de massa** é designada por q e definida por:

$$q = \frac{Q}{m}$$

A taxa de transferência de calor será denotada por $\dot{Q}$, onde o ponto significa a derivada com relação ao tempo, ou "por unidade de tempo". A taxa de transferência de calor $\dot{Q}$ tem a unidade kJ/s, que equivale a kW, conforme explicam Çengel e Boler (2013).

Quando $\dot{Q}$ varia com o tempo, o calor transferido durante o processo é determinado pela seguinte expressão:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}\, dt$$

Se o valor de $\dot{Q}$ é constante, a expressão anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q = \dot{Q}\Delta t$$

sendo que $\Delta t = t_2 - t_1$, o intervalo em que ocorre o processo.

Trabalho e calor

Trabalho e calor são duas formas de energia que apresentam unidades equivalentes. Essas grandezas físicas são intercâmbios energéticos que acontecem como consequência das interações experimentadas pelos sistemas termodinâmicos. Tanto o calor como o trabalho são manifestações externas da energia que são evidenciadas unicamente na fronteira dos sistemas. Além disso, essas manifestações somente serão perceptíveis quando as variáveis físicas experimentarem mudanças nos seus estados termodinâmicos.

Os sistemas podem receber ou ceder energia nas interações que experimentam. A energia é considerada como uma magnitude algébrica, estabelecendo-se os seguintes critérios: o trabalho que o sistema fornece (W_{sai}) é positivo, e o trabalho que o sistema recebe (W_{ent}) é negativo, conforme lecionam Potter e Somerton (2017) e Çengel e Boler (2013). Já o calor subministrado ao sistema (Q_{ent}) é considerado positivo, e o calor cedido pelo sistema (Q_{sai}) é negativo (Figura 9).

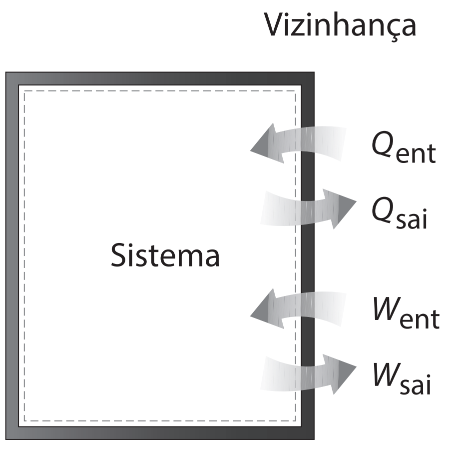


Figura 9. Convenção de direção da energia em forma de calor (*Q*) e trabalho (*W*).
Fonte: Çengel e Bolar (2013, p. 63).

Como vimos, de acordo com Potter e Somerton (2017), o calor é uma forma de energia que é transmitida através do limite de um sistema que está a uma determinada temperatura a outro sistema, que está a uma temperatura mais baixa, devido à diferença de temperatura entre esses corpos. Dessa forma, o trabalho de um sistema termodinâmico acontece a partir da troca de calor com o meio ambiente ou com outro sistema.

É importante conhecer os modos de transferência de calor e o trabalho efetivo que um determinado sistema pode realizar. Assim, existem três **modos de transferência de calor**:

- condução;
- convecção;
- radiação.

A **transferência de calor por condução** ocorre devido à presença de diferenças de temperatura dentro do material e é expressa matematicamente pela lei de Fourier da transferência de calor, que assume a seguinte forma:

$$\dot{Q} = kA\frac{\Delta T}{L}$$

onde k é a condutividade térmica, com unidades de $W/m \cdot K$ (Btu/sec-ft-°R), L é a espessura da parede, ΔT é a diferença de temperatura e A é a área da parede. Em geral, a transferência de calor é relacionada com o fator R comum, a resistividade do material, dada por $R_{mat} = L/k$.

A **transferência de calor por convecção** ocorre quando a energia é transferida de uma superfície sólida para um fluido em movimento. A convecção é expressa em termos da diferença entre a temperatura macroscópica do fluido, T_∞, e a temperatura da superfície, T_s. A lei do resfriamento de Newton expressa isso como:

$$\dot{Q} = h_c A(T_s - T_\infty)$$

onde h_c é o coeficiente de transferência de calor convectivo, com unidades $W/m^2 \cdot K$ (Btu/sec-ft2-°R), e depende das propriedades do fluido (incluindo a sua velocidade) e da geometria da parede.

Já a **radiação** é a energia transferida na forma de fótons. Ela pode ser transferida através de um vácuo perfeito ou de substâncias transparentes, como o ar. A radiação é calculada pela seguinte expressão:

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_{viz}^4)$$

onde σ é uma constante (igual a $5{,}6 \times 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$), ε é a emissividade (que varia entre 0 e 1, em que ε é 1 para um corpo negro), e T_{viz} é a temperatura uniforme da vizinhança. As temperaturas devem ser temperaturas absolutas.

Exemplo

Exemplo 3: cálculo de transferência de calor por condução

Uma parede de 10 m de comprimento e 3 m de altura é composta por uma camada isolante, com $R = 2$ m²·K/W, e uma camada de madeira, com $R = 0{,}15$ m²·K/W. Calcule a taxa de transferência de calor através da parede se a diferença de temperatura é de 40°C.

Solução.

A resistência total ao fluxo de calor através da parede é:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{isolamento}} + R_{\text{madeira}} = 2 + 0{,}5 = 2{,}5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Dessa forma, a taxa de transferência de calor é:

$$\dot{Q} = \frac{A}{R_{\text{total}}} \Delta T = \frac{10 \times 3}{2{,}5} \times 40 = 480 \text{ W}$$

Observe que ΔT, medida em °C, é igual à mesma ΔT medida em kelvins.

Fonte: Potter e Somerton (2017, p. 51).

Implicações teóricas da primeira lei da termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica é também conhecida como **lei da conservação de energia**, nos sistemas isolados. Quando você estudou física básica, utilizou os princípios da conservação de energia para sistemas mecânicos, como as energias cinética e potencial e sua relação com o trabalho. Porém, de forma geral, a conservação de energia inclui também os efeitos da transferência de calor e as mudanças na energia interna. Essa forma geral normalmente é chamada de **primeira lei da termodinâmica**, conforme lecionam Potter e Somerton (2017) e Çengel e Boler (2013).

Assim, a primeira lei da termodinâmica define que a transferência de calor líquida deve ser igual ao trabalho líquido realizado para um sistema executando um ciclo, expresso em forma de equação por:

$$\sum W = \sum Q$$

ou

$$\oint dW = \oint dQ$$

onde a integral anterior faz referência a um ciclo completo.

A primeira lei da termodinâmica pode ser explicada por meio do exemplo a seguir: seja uma massa com determinado peso ligada a uma polia, que movimenta uma hélice dentro de um fluido, conforme mostra a Figura 10. O peso cai uma certa distância, realizando trabalho sobre o sistema, sendo esse trabalho mecânico igual ao peso multiplicado pela distância da queda ($W_{mec} = mgh$). Essa queda produz um aumento da temperatura do sistema (o fluido no tanque) em ΔT. Em seguida, o sistema volta às suas condições iniciais, finalizando o ciclo, e transfere o calor Q gerado ao meio ambiente, como apresentado na Figura 10b, reduzindo assim a temperatura para o valor inicial. A primeira lei afirma que essa transferência de calor será exatamente igual ao trabalho realizado pela gravidade sobre a massa que cai.

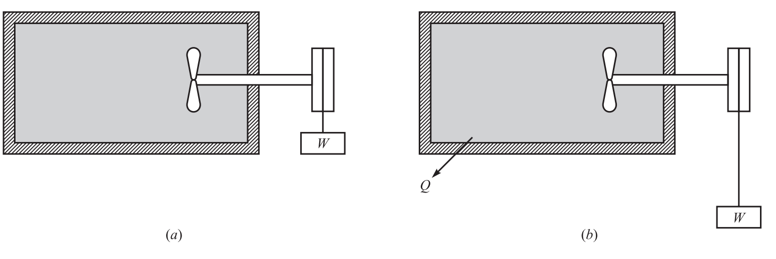


Figura 10. Exemplificando a primeira lei da termodinâmica.
Fonte: Potter e Somerton (2017, p. 63).

Primeira lei da termodinâmica aplicada a processos cíclicos

Geralmente, a primeira lei da termodinâmica é aplicada a **processos cíclicos**, que partem de um estado inicial, passam por diversos processos ou estados e, então, voltam ao estado inicial. Veja a Figura 11, que apresenta um ciclo com duas etapas, A e B. Aplicando-se a primeira lei a esse ciclo, teremos as seguintes expressões:

$$\int_1^2 dQ_A + \int_2^1 dQ_B = \int_1^2 dW_A + \int_2^1 dW_B$$

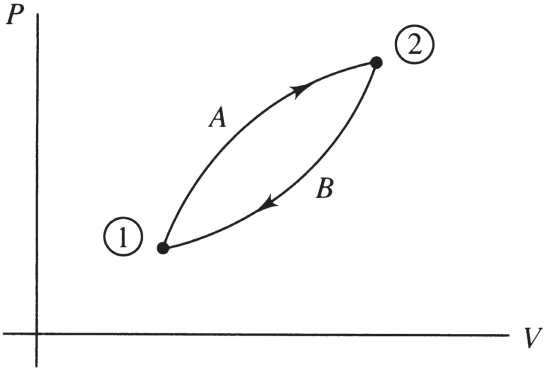


Figura 11. Ciclo termodinâmico de duas etapas.

Fonte: Adaptada de Potter e Somerton (2017, p. 63).

Utilizando as propriedades das integrais, obtemos a seguinte expressão:

$$\int_1^2 dQ_A - \int_2^1 dQ_B = \int_1^2 dW_A - \int_2^1 dW_B$$

ou

$$\int_1^2 (dQ_A - dW_A) = \int_1^2 (dQ_B - dW_B)$$

Ou seja, a quantidade de $Q - W$ do estado 1 para o estado 2 é a mesma tanto para a trajetória A quanto para a trajetória B. Isso significa que esses processos somente dependem dos valores iniciais e finais, e não dos estados ou da trajetória intermediária. Assim, podemos representar, em forma geral:

$$Q_{1-2} - W_{1-2} = E_2 - E_1$$

onde o valor Q_{1-2} é o calor transferido para o sistema durante o processo de mudança do estado 1 para o estado 2, W_{1-2} é o trabalho realizado nesse mesmo processo, e E_1 e E_2 são a quantidade de energia que tem o sistema no estado 1 e no estado 2, respectivamente.

O valor de E representa toda a energia: a energia cinética KE, a energia potencial PE e a energia interna U, o que inclui a energia química. Todas as outras formas de energia também estão incluídas na energia total E. Assim, a primeira lei da termodinâmica assume a forma:

$$Q_{1-2} - W_{1-2} = KE_2 - KE_1 + PE_2 - PE_1 + U_2 - U_1$$
$$Q_{1-2} - W_{1-2} = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) + mg(h_2 - h_1) + U_2 - U_1$$

Para o caso de um sistema isolado que não possui transferência de energia nem trabalho líquido aplicado, a primeira lei da termodinâmica se torna a **lei de conservação de energia**, ou seja:

$$E_1 = E_2$$

Exemplo

Exemplo 4: aplicação da primeira lei da termodinâmica a um ventilador de ar

Um ventilador de 5 hp é usado em uma sala grande para circular o ar. Pressupondo uma sala vedada e bem isolada, determine o aumento da energia interna após 1 h de operação.

Solução.

Pressupõe-se que $Q = 0$. Como $\Delta PE = \Delta KE = 0$, a primeira lei passa a ser $-W = \Delta U$. O trabalho fornecido é:

$$W = (-5\,\text{hp})(1\,\text{h})(746\,W/\text{hp})(3600\,\text{s/h}) = -1{,}343 \times 10^7\ \text{J}$$

O sinal é negativo porque o trabalho é fornecido ao sistema. Por fim, o aumento da energia interna é:

$$\Delta U = -(-1{,}343 \times 10^7) = 1{,}343 \times 10^7\ \text{J}$$

Fonte: Potter e Somerton (2017, p. 64).

Exemplo 5: aplicação da primeira lei da termodinâmica a um sistema pistão-cilindro

Um pistão sem atrito é usado para fornecer uma pressão constante de 400 kPa a um cilindro contendo vapor originalmente a 200°C, com volume de 2 m^3. Calcule a temperatura final se 3.500 kJ de calor são adicionados.

Solução.

A primeira lei da termodinâmica, utilizando-se $\Delta PE = \Delta KE = 0$, é $Q - W = \Delta U$. O trabalho realizado durante o movimento do pistão é:

$$W = \int P\,dV = P(V_2 - V_1) = 400(V_2 - V_1)$$

A massa antes e depois permanece inalterada. Utilizando-se as tabelas de calor, esse fato é expresso como:

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{2}{0{,}5342} = 3{,}744\ \text{kg}$$

O volume V_2 é escrito na forma $V_2 = m = 3{,}744\ v_2$. Dessa forma, utilizando-se u_1 das tabelas de vapor, a primeira lei é:

$$3500 - (400)(3{,}744v_2 - 2) = (u_2 - 2647) \times (3{,}744)$$

Fonte: Potter e Somerton (2017, p. 65).

Exercícios

1. Uma massa de 2 kg está sobre um pistão que tem dentro um gás ideal. Quanto de energia térmica é necessária para levantar 2 cm esse pistão? Considere que toda a energia fornecida se converte em trabalho.

a) 0,572 J.
b) 0,196 J.
c) 0,392 J.
d) 0,763 J.
e) 0,873 J.

2. Um pistão contendo um gás está preso. Caso se forneça 20 J de energia, qual é a variação da energia interna do gás? Se uma massa de 10 kg for colocada sobre o pistão, e se ele for liberado por 5 cm, sendo considerado que não há troca de calor, qual será a variação da energia interna do gás, nessa etapa? Por fim, qual é a variação da energia interna total?

a) A primeira variação é 20 J; a segunda variação é –4,9 J; a variação total é 15,1 J.
b) A primeira variação é 20 J; a segunda variação é +4,9 J; a variação total é 24,9 J.
c) A primeira variação é –20 J; a segunda variação é –4,9 J; a variação total é – 24,9 J.
d) A primeira variação é –20 J; a segunda variação é +4,9 J; a variação total é – 15,1 J.
e) A primeira variação é –20 J; a segunda variação é –4,9 J; a variação total é – 15,1 J.

3. Um reservatório térmico fornece 500 J de calor a um sistema termodinâmico. Se o sistema efetua um trabalho de 350 J, qual é a variação da energia interna do sistema?

a) 200 J.
b) –850 J.
c) –150 J.
d) 850 J.
e) 150 J.

4. Um gás tem volume inicial de 1 m^3; então, ele é expandido para 2 m^3. Se a pressão no processo é dada por $P = 3V^2$, qual é a quantidade de trabalho realizada no processo?

a) 0 J.
b) 7 J.
c) –7 J.
d) 21 J.
e) 15 J.

5. Em um diagrama *pV*, forma-se um retângulo com o lado paralelo ao volume medindo 4 e o lado paralelo à pressão valendo 2. Qual é o trabalho realizado em um ciclo completo?

a) 12 J.
b) 2 J.
c) 4 J.
d) 8 J.
e) 6 J.

Referências

ÇENGEL, Y.; BOLER, M. *Termodinâmica*. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

POTTER, M. C.; SOMERTON, C. W. *Termodinâmica para engenheiros.* 3. ed. São Paulo: Bookman, 2017.

Leituras recomendadas

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da termodinâmica*. São Paulo: Blucher, 2013.

ESPARTEL, L. *Hidráulica aplicada*. Porto Alegre: SAGAH, 2017.

STROBEL, C. *Termodinâmica técnica*. Curitiba: Intersaberes, 2016.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física II:* termodinâmica e ondas. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

Encerra aqui o trecho do livro disponibilizado para esta Unidade de Aprendizagem. Na Biblioteca Virtual da Instituição, você encontra a obra na íntegra.

Conteúdo: