

Primeira lei da termodinâmica: sistemas fechados

CAPÍTULO

3

A primeira lei da termodinâmica representa o princípio de conservação da energia, estabelecendo que a energia total é uma propriedade termodinâmica. Neste capítulo, apresenta-se o conceito de transferência de energia com calor e trabalho e discutem-se os mecanismos de transferência de calor e as diversas formas de trabalho. A equação da primeira lei aplicada a sistemas fechados é desenvolvida, passo por passo, utilizando uma abordagem intuitiva. São definidos os calores específicos e as relações entre entalpia e energia interna de gases perfeitos, em termos de calores específicos e temperatura. Esta abordagem também é feita a sólidos e a líquidos considerados substâncias incompressíveis. Finalmente, discute-se o arrefecimento e o congelamento de alimentos.

CAPÍTULO 3

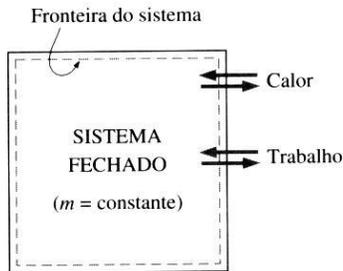
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-1

A energia pode atravessar a fronteira do sistema sob a forma de trabalho e de calor.

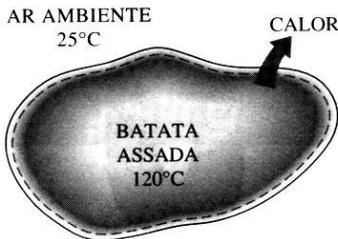


FIGURA 3-2

O calor é transferido do corpo mais quente para o mais frio, devido a uma diferença de temperatura existente entre ambos.

3-1 ■ INTRODUÇÃO

No primeiro capítulo, foi dito que a energia não pode ser criada ou destruída, podendo apenas alterar a sua forma. Este princípio é baseado em observações experimentais, sendo conhecido como a *primeira lei da termodinâmica* ou *princípio de conservação da energia*. A primeira lei pode ser resumida como: Durante uma interacção entre o sistema e a sua vizinhança, a quantidade de energia ganha pelo sistema tem de ser exactamente igual à cedida pela vizinhança.

A energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado, sob duas formas distintas: *trabalho* ou *calor* (Figura 3-1). É importante fazer uma distinção entre estas duas formas de energia, de modo a estabelecer uma base sólida para o desenvolvimento da primeira lei da termodinâmica.

3-2 ■ TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sabe-se por experiência própria que uma lata fresca de refrigerante colocada sobre uma mesa acabará por aquecer e que uma batata quente, também sobre a mesma mesa, arrefecerá com o tempo (Figura 3-2). Quando um corpo é deixado num meio que esteja a uma temperatura diferente, verifica-se uma transferência de energia entre o corpo e o meio ambiente, até que se estabeleça o equilíbrio térmico. Ou seja, o corpo e o meio alcançam a mesma temperatura. A direcção da transferência de energia é sempre no sentido do corpo com maior temperatura para o de menor e, uma vez atingida a igualdade de temperatura, cessa a transferência. Neste processo, diz-se que a energia foi transferida sob a forma de calor.

O **calor** é definido como a *forma de energia que é transferida entre dois sistemas (ou um sistema e a sua vizinhança) devido a um gradiente de temperatura*. Isto é, uma interacção de energia realiza-se sob a forma de calor, apenas se for devida a uma diferença de temperatura. Portanto, não pode ocorrer qualquer transferência de calor entre dois sistemas à mesma temperatura.

Na vida quotidiana, chama-se calor às formas sensíveis e latentes de energia interna e fala-se do conteúdo deste nos corpos. Contudo, em termodinâmica, estas formas de energia são denominadas energia térmica, de modo a evitar qualquer equívoco com transferência de calor.

Diversos termos de uso comum — tal como *escoamento de calor*, *adição de calor*, *rejeição de calor*, *absorção de calor*, *extração de calor*, *ganho de calor*, *perda de calor*, *armazenamento de calor*, *geração de calor*, *calor de reacção*, *libertação de calor*, *calor específico*, *calor sensível*, *calor latente*, *desperdício de calor*, *calor corporal*, *calor de um processo* — não são consistentes com o significado estrito termodinâmico da palavra calor, que limita a sua utilização à transferência de energia térmica durante um processo. Contudo, estas frases estão enraizadas no vocabulário tanto de pessoas leigas como de eruditas, sem existir o perigo de desentendimentos, pois costumam ser interpretadas correctamente em vez de o serem literalmente. (Além disso, não existem alternativas aceitáveis para algumas destas frases.) Por exemplo, a frase calor corporal é interpretada como o conteúdo de energia térmica de um corpo. Igualmente, por *escoamento de calor*

entende-se a *transferência de energia térmica* e não um escoamento de uma substância chamada fluido calórico, embora esta interpretação incorrecta, em que se baseia a teoria calórica, seja a origem desta frase. De forma idêntica, a transferência de calor para um sistema é geralmente referida como *adição de calor* e, para o caso contrário, como *rejeição de calor*. Poderão eventualmente existir razões termodinâmicas na relutância em substituir a palavra calor pelo termo correcto *energia térmica*: é mais rápido e prático dizer, escrever e compreender *calor* do que *energia térmica*.

Calor é energia em transição, sendo identificada apenas quando atravessa uma fronteira de um sistema. Considere a batata quente do exemplo dado anteriormente. Esta contém energia que só assume a forma de transferência de calor quando atravessa a casca (fronteira do sistema) para alcançar o ar, como ilustra a Figura 3-3. Uma vez atingida a vizinhança, o calor torna-se parte integrante da energia interna desta última. Assim, em termodinâmica, a palavra *calor* traduz-se simplesmente por *transferência de calor*.

Um processo durante o qual não existe transferência de calor denomina-se **processo adiabático** (Figura 3-4). Esta última palavra advém do grego *adiabatos*, que quer dizer *não transponível*. Existem duas formas de processos adiabáticos: ou o sistema é convenientemente isolado, de modo a que só uma quantia desprezável de calor possa atravessar a fronteira, ou tanto o sistema como a vizinhança se encontram à mesma temperatura, não existindo uma diferença de potencial que promova a transferência de calor. Um processo adiabático não deve ser confundido com um processo isotérmico. Embora não exista transferência de calor num processo adiabático, o conteúdo de energia do sistema e, portanto, a sua temperatura podem alterar-se por outros modos tais como trabalho.

Como o calor é uma forma de energia, utiliza as unidades usuais de kJ (ou Btu). A quantidade de energia transferida entre dois estados (1 e 2) é simbolizado por Q_{12} ou apenas Q . A transferência de calor *por unidade de massa* de um sistema é denotado por q , sendo determinado por

$$q = \frac{Q}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-1)$$

Por vezes, é desejável conhecer a *taxa de transferência de calor*¹ (a quantidade de calor transferido por unidade de tempo) em vez do valor total num dado intervalo de tempo (Figura 3-5). Esta taxa é simbolizada por \dot{Q} , cujo ponto significa «por unidade de tempo». A taxa de transferência de calor \dot{Q} tem as unidades kJ/s, que são equivalentes a kW. Quando \dot{Q} varia com o tempo, a quantidade de calor transferido durante um processo é determinada pela integração de \dot{Q} em ordem ao intervalo de tempo do processo:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad (\text{kJ}) \quad (3-2)$$

Quando \dot{Q} permanece constante durante um processo, a equação acima reduz-se a

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (3-3)$$

em que $\Delta t = t_2 - t_1$ representa o intervalo de tempo durante o qual decorre o processo.

¹ N. T.: ou potência térmica.

Transferência de calor

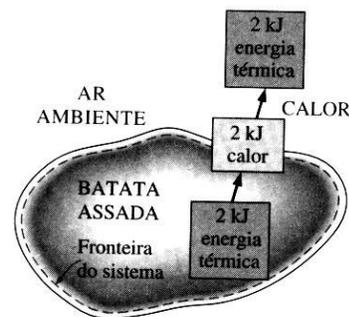


FIGURA 3-3

A energia é reconhecida como calor, apenas quando atravessa a fronteira de um sistema.

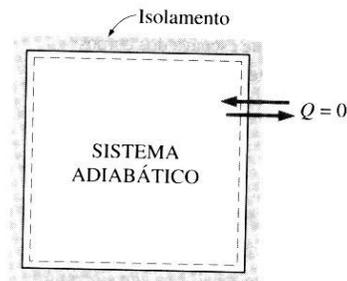


FIGURA 3-4

Durante um processo adiabático, não existem trocas de calor entre o sistema e a vizinhança.

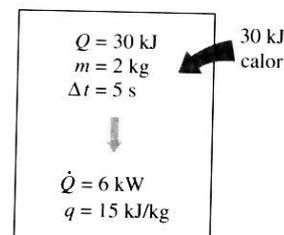


FIGURA 3-5

Relação entre q , Q e \dot{Q} .

CAPÍTULO 3

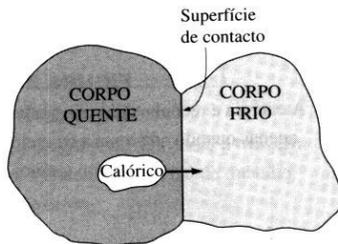
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-6

No início do século XIX, pensava-se que existia um fluido invisível, chamado calórico, que escoava dos corpos mais quentes para os mais frios.

Dados históricos

O calor foi desde sempre traduzido por algo que produz uma sensação de conforto, podendo-se pensar que esta percepção foi uma das primeiras compreendidas pelo homem. Mas foi somente nos meados do século XIX que se atingiu uma verdadeira compreensão da natureza do calor, graças ao desenvolvimento da **teoria cinética**, que trata as moléculas como pequenas esferas que se encontram em movimento, possuindo, portanto, energia cinética. Assim, o calor é definido pela energia associada ao movimento aleatório de átomos e moléculas.

Embora fosse sugerido no século XVIII e inícios do XIX que o calor era uma manifestação de movimento ao nível molecular (chamada a força da vida), até meados do século XIX, a visão dominante deste conceito era baseada na *teoria calórica*, proposta pelo químico francês Antoine Lavoisier (1743-1794) em 1789. Esta teoria estabelece que o calor é uma substância fluida, chamada **calórico**, desprovida de massa, cor, odor e paladar, podendo ser escorrida de um corpo para outro (Figura 3-6). Quando o **calórico** era adicionado a um corpo, a sua temperatura aumentava, verificando-se o contrário quando era retirado. Quando um corpo não conseguia reter mais nenhum **calórico**, da mesma forma que um corpo com água não consegue dissolver mais sal ou açúcar, dizia-se que este estava saturado com calórico. Esta interpretação deu origem aos termos *líquido saturado* e *vapor saturado*, ainda em uso nos dias de hoje.

A teoria calórica foi posta em causa desde a sua apresentação. Esta reconhecia o calor como uma substância, não podendo ser criada ou destruída. No entanto, era do conhecimento geral que era possível gerar calor indefinidamente ao esfregar as mãos ou dois pedaços de madeira. Em 1798, Benjamin Thompson (conde Rumford) (1753-1814) mostrou nas suas publicações que é possível gerar calor continuamente através da fricção. A validade da teoria calórica também foi desafiada por diversas outras. Foi através das experiências cuidadas do inglês James P. Joule (1818-1889), publicadas em 1843, que se convenceram os cépticos de que o calor não era uma substância, findando com a teoria calórica. Embora esta última fosse totalmente abandonada em meados do século XIX, deu um grande contributo para o desenvolvimento da termodinâmica.

Formas de transferência de calor

Existem três formas distintas de transferência de calor: *condução*, *convecção* e *radiação*. O estudo pormenorizado destas formas irá ser apresentado a seguir. Far-se-á depois uma breve descrição, de modo a familiarizar o leitor com os mecanismos básicos destes processos. Todas as formas de transferência de calor requerem a existência de uma diferença de temperatura. A transferência de calor processa-se do meio que tem uma temperatura mais elevada para o que tem uma temperatura mais baixa.

A **condução** é definida como a transferência de energia das partículas com um nível energético superior para as adjacentes com um nível inferior, como resultado da interação entre as partículas. Esta forma de transferência de calor pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. Nos dois últimos, deve-se à colisão das moléculas durante o seu movimento aleatório. Nos sólidos, resulta do efeito combinado da vibração das moléculas no interior da malha e da energia

transportada por electrões livres. Por exemplo, uma lata de refrigerante fresco num recinto quente acaba por aquecer até à temperatura ambiente, devido à transferência de calor do ar para a bebida, atravessando o alumínio da lata por condução (Figura 3-7).

Observa-se que a taxa de condução de calor \dot{Q}_{cond} através de uma parede de espessura constante Δx é proporcional à diferença de temperatura ΔT entre as superfícies e a área A normal à direcção da transferência de calor, sendo inversamente proporcional à espessura da parede. Assim,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = k_f A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (3-4)$$

em que a constante de proporcionalidade k_f representa a **condutibilidade térmica** do material, sendo a medida da capacidade deste conduzir calor (Tabela. 3-1). Materiais como o cobre e a prata são bons condutores eléctricos mas também são bons condutores de calor, apresentando elevados valores de k_f . Outros elementos, como a borracha, a madeira ou o poliestireno expandido, são maus condutores de calor, possuindo valores baixos de k_f .

No caso limite de $\Delta x \rightarrow 0$, a equação dada acima reduz-se à forma diferencial

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k_f A \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (3-5)$$

conhecida como **lei de Fourier** de condução de calor. Esta indica que a taxa de condução de calor numa dada direcção é proporcional ao *gradiente de temperatura* nessa mesma direcção. Como o calor é conduzido na direcção da temperatura decrescente, o gradiente desta torna-se negativo quando a temperatura decresce com o aumento de x . Portanto, o sinal negativo foi adicionado à Equação 3-5, de forma a tornar a transferência de calor positiva no sentido positivo de x .

A temperatura é a medida da energia cinética das moléculas. Num líquido ou gás, esta energia é devida não só ao movimento aleatório das moléculas como também ao vibracional e rotacional. Quando duas moléculas, possuindo diferentes energias cinéticas, colidem, parte da energia da molécula mais energética (temperatura mais elevada) é transferida para a menos energética (temperatura inferior). Este processo é em tudo semelhante à colisão entre dois corpos elásticos com a mesma massa e diferentes velocidades. Parte da energia cinética do corpo mais rápido é transferida para o mais lento.

Nos sólidos, a condução de calor é o resultado de dois efeitos combinados: ao da malha, devido às ondas de vibração induzidas na malha pelo movimento periódico vibracional das moléculas localizadas em posições relativamente fixas e ao efeito da energia transportada pelos electrões livres. A condutibilidade térmica de um sólido é obtida pela adição do efeito da malha e da componente electrónica. Nos metais puros, a condutibilidade é principalmente devida à componente electrónica enquanto que nos não-metais deve-se à componente da malha. Nesta última, a condutibilidade depende fortemente do arranjo molecular. Por exemplo, a condutibilidade térmica do diamante, um sólido cristalino

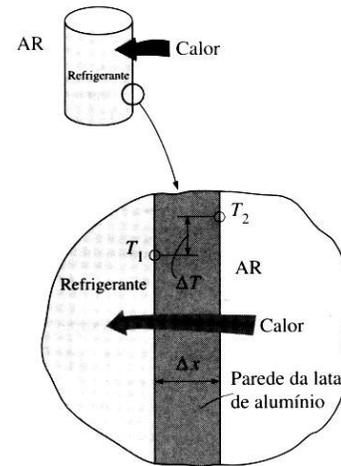


FIGURA 3-7

Condução de calor do ar quente para o refrigerante dentro de uma lata de alumínio através da parede desta.

TABELA 3-1

Condutibilidade térmica de alguns materiais nas condições atmosféricas

Material	Condutibilidade térmica W/(m · K)
Diamante	2300
Prata	429
Cobre	401
Ouro	317
Alumínio	237
Ferro	80,2
Mercúrio (ℓ)	8,54
Vidro	1,4
Tijolo	0,72
Água (ℓ)	0,613
Pele humana	0,37
Madeira (carvalho)	0,17
Hélio (g)	0,152
Borracha macia	0,13
Fibra de vidro	0,043
Ar (g)	0,026
Uretano (espuma ríjida)	0,026

CAPÍTULO 3

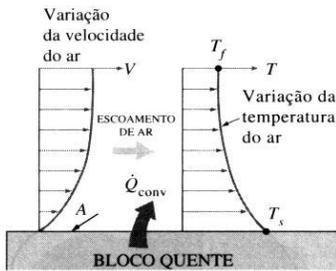
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-8

Transferência de calor de uma superfície quente por convecção.

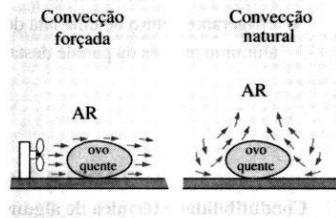


FIGURA 3-9

Arrefecimento de um ovo cozido por convecção forçada e natural.

altamente ordenado, é muito superior ao dos metais puros, como se depreende da Tabela 3-1.

A **convecção** é uma forma de transferência de calor entre a superfície de um sólido e da adjacente líquida ou gasosa em movimento, envolvendo os efeitos combinados da *condução* e do *movimento do fluido*. Quanto mais rápido for este último, maior será a transferência de calor por convecção. Na ausência de qualquer movimento, esta transferência entre a superfície do sólido e do fluido é puramente condutiva. Assim, o movimento do fluido incrementa a transferência de calor mas dificulta a determinação da sua taxa.

Considere o arrefecimento de um bloco quente pela passagem de ar frio pela sua superfície superior (Figura 3-8). A energia é inicialmente transferida para a camada de ar adjacente à superfície, por condução, sendo posteriormente transportada por convecção, ou seja, pelos efeitos combinados de condução no seio do ar, devido ao movimento aleatório das moléculas e ao movimento macroscópico, que retira o ar adjacente à superfície, substituindo-o por ar frio.

No caso de o fluido ser *impelido* a escoar-se no interior de um tubo ou sobre uma superfície externa, através de uma ventoinha, bomba ou através do vento, a convecção denomina-se **convecção forçada**. Se o movimento do fluido for causado por forças de impulsão induzidas por diferenças de densidades, devido à variação de temperatura, a convecção chama-se **convecção natural** ou **livre** (Figura 3-9). Por exemplo, sem o auxílio de uma ventoinha, a transferência de calor da superfície do bloco da Figura 3-8 processa-se por convecção natural, visto que o movimento é causado pela subida do ar mais quente (mais leve), próximo da superfície, e a descida do mais frio (mais pesado). A transferência de calor entre o bloco e o ar que o rodeia será por condução se a diferença de temperatura entre os dois não for suficiente para superar a resistência ao movimento do ar, impedindo o surgimento das correntes de convecção natural.

Os processos de transferência de calor que envolvem *mudança de fase* de um fluido são também considerados convectivos devido ao movimento induzido durante o processo, tal como a subida de bolhas de vapor durante a *ebulição* e a queda de gotículas de água na *condensação*.

A taxa de transferência de calor por convecção \dot{Q}_{conv} é determinada pela **lei de Newton do arrefecimento**:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_s - T_f) \quad (\text{W}) \quad (3-6)$$

em que h é o **coeficiente de transferência de calor por convecção**, A a superfície através da qual se processa a transferência de calor, T_s a temperatura da superfície e T_f a temperatura do fluido afastado da superfície. (Na superfície, a temperatura do fluido é idêntica à do corpo.)

O coeficiente de transferência de calor por convecção h não é uma propriedade do fluido, sendo um parâmetro determinado experimentalmente cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção, como a geometria da superfície, a natureza do movimento, as propriedades e a velocidade do fluido. Os valores típicos de h , em $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, são 2-25 para a convecção natural de gases, 50-1000 para a convecção natural de líquidos, 25-250 para

a convecção forçada de gases, 50-20 000 para a convecção forçada de líquidos, e 2500-100 000 para a convecção em processos de ebulição e de condensação.

A **radiação** é a energia emitida pela matéria, sob a forma de ondas electromagnéticas (fotões), devido a alterações nas configurações electrónicas de átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de energia por radiação não requer a presença de um meio intercalar (Figura 3-10). De facto, esta forma de transferência de energia é a mais rápida (processa-se à velocidade da luz), não sofrendo qualquer decréscimo na presença de vácuo, sendo desta forma que a energia solar alcança a Terra.

Nos estudos de transferência de calor, o interesse recai sobre a **radiação térmica** emitida pelos corpos devido à sua temperatura. Esta difere das outras formas de radiação electromagnética, como os raios X, raios gama, microondas, ondas de rádio e de televisão, porque estas não estão relacionadas com a temperatura. Todos os corpos a uma temperatura acima do zero absoluto emitem radiação térmica.

A radiação é um **fenómeno volumétrico**, e todos os sólidos, líquidos ou gases emitem, absorvem ou transmitem radiação a níveis variados. Contudo, a radiação é considerada um **fenómeno de superfície** no caso de sólidos opacos como os metais, madeira ou pedra, visto que a radiação emitida pela região interior do corpo nunca consegue atingir a superfície, e a incidente é geralmente, absorvida pelas camadas superficiais que apenas medem poucos micrones/ μm .

A taxa máxima de radiação que pode ser emitida da superfície de um corpo a uma temperatura absoluta T_s é dada pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$\dot{Q}_{\text{emit,máx}} = \sigma AT_s^4 \quad (\text{W}) \quad (3-7)$$

em que A é a superfície e $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$, representa a **constante de Stefan-Boltzmann**. Uma superfície idealizada que emite o máximo de radiação denomina-se **corpo negro**, sendo a radiação emitida chamada **radiação de corpo negro**. A emitida por todas as superfícies reais é menor do que a emitida por um corpo negro à mesma temperatura, sendo expressa por

$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \epsilon \sigma AT_s^4 \quad (\text{W}) \quad (3-8)$$

em que ϵ é a **emissividade** da superfície, sendo uma propriedade que varia entre $0 \leq \epsilon \leq 1$ e representa a comparação de uma superfície com um corpo negro, que corresponde a $\epsilon = 1$. A emissividade de alguns tipos de superfícies é dada na Tabela 3-2.

Uma outra propriedade da superfície é a **absorcividade** α , dada pela relação entre a energia incidente e a absorvida pela superfície. Tal como a emissividade, o seu valor varia entre $0 \leq \alpha \leq 1$. Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, sendo portanto um perfeito absorvedor ($\alpha = 1$) e emissor.

Em geral, tanto ϵ como α de uma superfície dependem da temperatura e do comprimento de onda da radiação. A **lei de Kirchhoff** para a radiação estabelece que a emissividade e absorcividade de uma superfície são idênticas à mesma temperatura e comprimento de onda. Na maioria das aplicações práticas, são ignoradas as dependências de ϵ e α com a temperatura e com o comprimento de

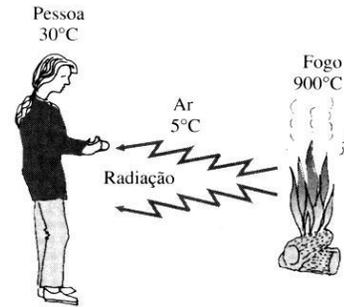


FIGURA 3-10

Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação ocorre entre dois corpos, mesmo que estes estejam separados por um meio mais frio.

TABELA 3-2
Emissividade de alguns materiais a 300 K

Material	Emissividade
Aço inoxidável polido	0,17
Água	0,96
Alumínio anodizado	0,82
Cobre polido	0,03
Folha de alumínio	0,07
Madeira	0,82-0,92
Ouro polido	0,03
Papel branco	0,92-0,97
Pavimento de asfalto	0,85-0,93
Pele humana	0,95
Prata polida	0,02
Terra	0,93-0,96
Tijolo	0,93-0,96
Tinta branca	0,90
Tinta negra	0,98
Vegetação	0,93-0,96

CAPÍTULO 3

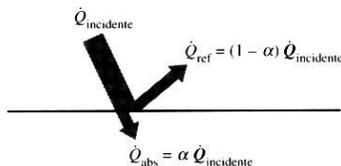
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-11

Absorção de radiação incidente numa superfície opaca de absorvidade α .

onda e a absorvidade média de uma superfície é tida como igual à sua emissividade média. A taxa através da qual uma superfície absorve radiação é dada por (Figura 3-11):

$$\dot{Q}_{\text{abs}} = \alpha \dot{Q}_{\text{inc}} \quad (\text{W}) \quad (3-9)$$

em que \dot{Q}_{inc} representa a taxa de radiação incidente e α a absorvidade da superfície. Para superfícies opacas (não transparentes), a parcela de radiação não absorvida é reflectida, e a diferença entre estes dois valores representa a taxa de transferência de calor por radiação.

Se a absorção for superior à emissão, a superfície *ganha* energia, verificando-se o contrário, isto é, uma perda, se a emissão for superior. Em geral, a determinação do balanço de transferência de calor por radiação entre duas superfícies é um processo complexo, pois depende das propriedades destas, da sua orientação relativa e da interacção do meio circundante. Considere um caso especial de uma superfície de emissividade relativamente pequena ϵ , com área A e temperatura absoluta T_s , que está completamente envolvida por uma outra maior, à temperatura absoluta T_{viz} , sendo interposto um gás (tal como ar) que não intervém no processo (a quantidade de radiação emitida, absorvida ou dispersa pelo meio é desprezável). A taxa de transferência de calor por radiação entre estas duas superfícies é dada por (Figura 3-12):

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (\text{W}) \quad (3-10)$$

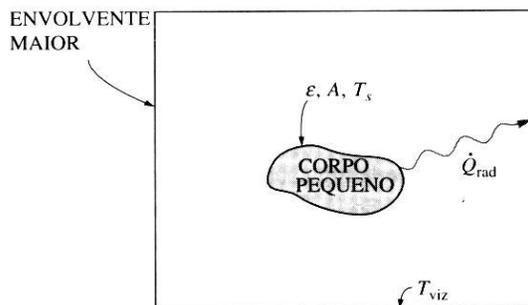
Neste caso especial, a emissividade e a área da superfície envolvente não têm qualquer efeito sobre a taxa de transferência de calor.

EXEMPLO 3-1 Transferência de calor de um corpo humano

Considere uma pessoa de pé num recinto com uma corrente de ar a 20° C. Determine a taxa total de transferência de calor do seu corpo se este apresentar uma superfície exposta de 1,6 m² à temperatura média de 29° C. O coeficiente de transferência de calor por convecção é de 6 W/(m² · °C) (Figura 3-13).

Solução A pessoa está de pé num recinto com corrente de ar. Pretende-se determinar a taxa total de transferência de calor.

FIGURA 3-12
Transferência de calor por radiação entre um corpo e as superfícies envolventes interiores, de dimensões muito superiores em relação ao corpo.



Pressupostos 1 O coeficiente de transferência de calor e a emissividade são constantes e uniformes. 2 A condução de calor através dos pés é desprezável. 3 A perda de calor por evaporação é desprezável.

Análise A transferência de calor entre o corpo e o ar efectua-se por convecção (em vez de condução), visto que o ar próximo da pele e da roupa irá aquecer e elevar-se devido à transferência de calor, formando correntes de convecção natural. Admite-se que o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, determinado experimentalmente para o caso entre um corpo humano e o ar envolvente, seja de 6 W por unidade de área (m^2) e unidade de diferença de temperatura (K ou $^{\circ}C$). Assim, a taxa de transferência de calor é dada pela Equação 3-6:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{conv}} &= hA(T_s - T_p) \\ &= [6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})] (1,6 \text{ m}^2)(29 - 20) ^{\circ}\text{C} \\ &= 86,4 \text{ W}\end{aligned}$$

O corpo também irá ceder calor por radiação para as paredes do recinto. Assume-se que as paredes do recinto se encontram à mesma temperatura do ar. Considerando que o ar não intervém neste processo e que o corpo está completamente envolvido pelas paredes do recinto, a taxa de transferência de calor por radiação entre o corpo e as paredes é dada pela Equação 3-10:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{rad}} &= \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \\ &= (0,95) [5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)] (1,6 \text{ m}^2) [(29 + 273)^4 - (20 + 273)^4] \text{K}^4 \\ &= 81,7 \text{ W}\end{aligned}$$

Note-se que se devem utilizar os valores de temperatura absoluta nos cálculos de radiação. Utilizou-se o valor dado de emissividade para a temperatura do ar inicial, pois não se prevê que este varie significativamente com um ligeiro aumento desta última.

Assim, a taxa de transferência de calor total é dada pela soma das parcelas relativas:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = 86,4 + 81,7 = 168,1 \text{ W}$$

A transferência de calor seria muito superior se a pessoa não estivesse vestida, visto que a temperatura da superfície exposta seria maior. Depreende-se, então, que a roupa serve de barreira contra a transferência de calor.

Discussão Nos cálculos apresentados, desprezou-se a transferência de calor por condução dos pés para o pavimento e a da pele devida à transpiração. O primeiro caso é pouco significativo, enquanto que a transpiração é uma das formas principais de troca de calor em ambientes quentes.

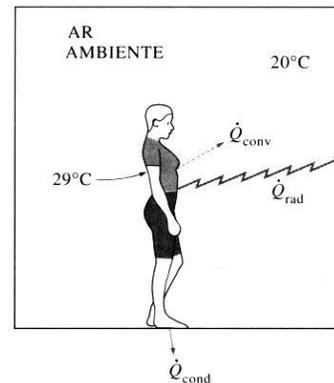


FIGURA 3-13

Transferência de calor de uma pessoa, tal como está descrito no Exemplo 3-1.

3-3 ■ TRABALHO

O trabalho, tal como o calor, é uma interacção energética entre um sistema e a sua vizinhança. Tal como foi mencionado anteriormente, a energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado sob a forma de calor ou de trabalho. Então, *se a energia que atravessa uma fronteira de um sistema fechado não é calor, tem de ser trabalho*. O calor é facilmente reconhecido: ocorre sempre

CAPÍTULO 3

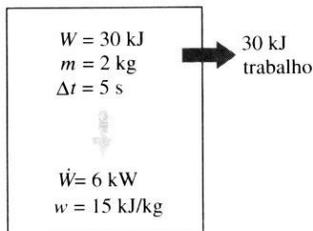
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-14

Relações entre w , W e \dot{W} .

$$w = \frac{W}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-11)$$

O trabalho realizado por unidade de tempo denomina-se **potência**, sendo representado por \dot{W} (Figura 3-14) e a sua unidade é kJ/s ou kW.

O calor e o trabalho são *quantidades direccionais*, sendo necessário para a sua descrição completa tanto a *magnitude* como a *direcção*. Para tal, adoptou-se uma convenção de sinais cuja forma geralmente aceite é a **convenção de sinais formal** que é estabelecida como: *o calor transferido para um sistema e o trabalho realizado por este são positivos; a transferência de calor para fora do sistema e o trabalho realizado neste são negativos*. Outra forma de definir esta convenção consiste na utilização de índices que representam a *entrada* ou a *saída* (Figura 3-15). Por exemplo, o trabalho admitido de 5 kJ pode ser expresso como $W_{\text{adm}} = 5 \text{ kJ}$, enquanto que uma perda de calor de 3 kJ pode ser denotada por $Q_{\text{sai}} = 3 \text{ kJ}$. Quando a direcção da interacção de energia é desconhecida, pode-se simplesmente *atribuir* uma pela utilização do índice correspondente. Um resultado positivo indica que a suposição era correcta enquanto que um negativo revela o contrário. Este processo é idêntico ao empregue na resolução de problemas de física estática em que se atribui um sinal a uma força cujo sentido é desconhecido. Se o resultado apresentar um sinal negativo, a direcção é a contrária à escolhida. Neste livro, utiliza-se a *abordagem intuitiva* que não necessita da adopção de uma convenção de sinais formal, não sendo necessária a cuidada atribuição de valores negativos a certas interacções.

Note-se que a quantidade que é transferida de ou para o sistema não é uma propriedade, visto que o valor desta depende de mais de um estado. O calor e o trabalho são *mecanismos de transferência de energia* entre o sistema e a vizinhança, existindo diversas semelhanças entre estes:

1. Ambos são reconhecidos na fronteira do sistema, à medida que a atravessam. Ou seja, tanto o trabalho como o calor são fenómenos de *fronteira*.
2. Os sistemas possuem energia, mas não trabalho ou calor.
3. Ambos estão associados a um *processo* e não a um estado. Ao contrário das propriedades, trabalho e calor não têm nenhum significado num estado.

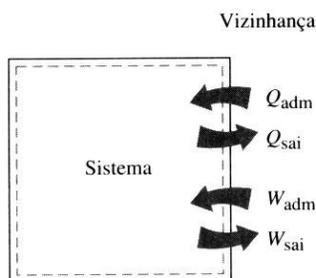


FIGURA 3-15

Especificação das direcções
de calor e de trabalho.

4. Ambas são *funções de caminho* (ou seja, as suas magnitudes dependem tanto do caminho seguido durante um processo como dos estados finais).

As **funções de caminho** têm **diferenciais inexactos** denotados pelo símbolo δ . Assim, o diferencial da quantidade de calor ou de trabalho é representado respectivamente por δQ ou δW e não dQ ou dW . Contudo, as propriedades são **funções de estado** (ou seja, dependem apenas do estado e não do caminho seguido para o alcançar), contendo **diferenciais exactos**, designados pelo símbolo d . Por exemplo, uma pequena variação de volume é representada por dV , e a variação total de volume durante um processo entre os estados 1 e 2 é

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 = \Delta V$$

Ou seja, a variação de volume durante um processo 1-2 é sempre igual ao volume do estado 2 menos o do estado 1, independentemente do caminho seguido (Figura 3-16). Contudo, o trabalho total realizado durante o processo 1-2 é

$$\int_1^2 \delta W = W_{12} \quad (\text{não } \Delta W)$$

Então, o trabalho total é obtido pela adição dos valores dos diferenciais (δW) ao longo do caminho do processo. O integral de δW não é igual a $W_2 - W_1$ (ou seja, o trabalho do estado 2 menos o do estado 1), que não tem qualquer significado, porque o trabalho não é uma propriedade e, num dado estado, os sistemas não possuem trabalho.

EXEMPLO 3-2 Queima de uma vela num recinto fechado

Uma vela é queimada num recinto fechado e isolado. Tomando este (o ar e a vela) como o sistema, determine se existe (a) alguma transferência de calor durante a queima e (b) a variação de energia interna do sistema.

Solução (a) As superfícies interiores das paredes do recinto formam a fronteira do sistema, como indicam as linhas a traço interrompido (Figura 3-17). Como foi mencionado anteriormente, o calor é identificado quando atravessa uma fronteira. Como o recinto é isolado, considera-se que o sistema é adiabático, não existindo troca de calor através da fronteira. Assim, para este processo, $Q = 0$.

(b) Com base no Capítulo 1, a energia interna envolve formas variadas de energia (sensível, latente, nuclear). Durante o processo descrito, parte da energia química é convertida em energia sensível. Como não existe nem aumento nem decréscimo da energia total do sistema, $\Delta U = 0$.

EXEMPLO 3-3 Aquecimento de uma batata num forno

Uma batata, inicialmente à temperatura ambiente de 25°C, é colocada num forno mantido a 200°C, tal como é ilustrado pela Figura 3-18. Existe alguma transferência de calor durante este processo?

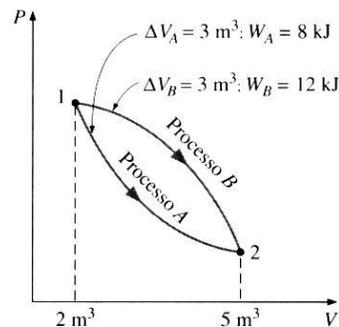


FIGURA 3-16

As propriedades são funções de estado, mas o trabalho e o calor são de caminho (as suas magnitudes dependem do caminho percorrido).

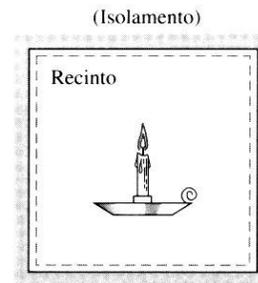


FIGURA 3-17

Esquema para o Exemplo 3-2.

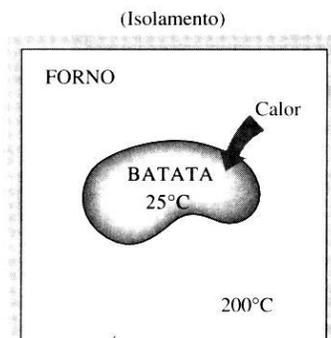


FIGURA 3-18

Esquema para o Exemplo 3-3.

CAPÍTULO 3

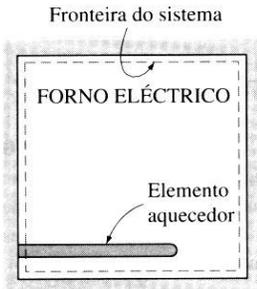
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-19

Esquema para o exemplo 3-4.

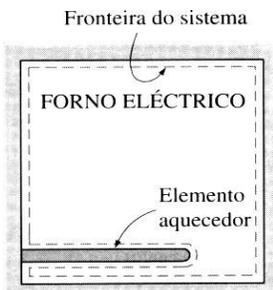


FIGURA 3-20

Esquema para o Exemplo 3-5.

Solução Este problema não está convenientemente definido, pois não é especificado o sistema. Assume-se que se observa a batata, sendo esta o sistema, e a sua casca, a fronteira. Uma parte da energia do forno irá atravessar esta fronteira devido à diferença de temperatura. Assim, este é um processo que envolve transferência de calor.

EXEMPLO 3-4 Aquecimento de um forno através de transferência de trabalho

Um forno eléctrico bem isolado é aquecido através de uma resistência eléctrica. Se o forno inteiro, incluindo a resistência, for considerado como o sistema, determine se este processo é de interacção de calor ou de trabalho?

Solução Neste problema, as superfícies interiores do forno formam a fronteira do sistema, como mostra a Figura 3-19. O conteúdo de energia do forno aumenta durante o processo, evidenciado por um incremento de temperatura. A transferência de energia para o forno não é causada por uma diferença de temperatura entre o seu interior e o ambiente circundante, sendo devida ao fluxo de electrões que atravessam a fronteira do sistema. Assim, esta é uma interacção de trabalho.

EXEMPLO 3-5 Aquecimento de um forno através de transferência de calor

Responda à questão do Exemplo 3-5 tomando a atmosfera interior do forno, excluindo o elemento aquecedor, como o sistema.

Solução Desta vez, a fronteira do sistema incluirá somente a superfície exterior do elemento aquecedor e o interior do forno, como ilustra a Figura 3-20. Portanto, os electrões não irão atravessar esta fronteira, e a energia gerada no interior do aquecedor será transferida para o ar, devido à diferença de temperatura entre o elemento e o interior do forno. Assim, este é um processo de transferência de calor.

Discussão Para ambos os casos, a quantidade de energia transferida para o ar é a mesma. Estes dois exemplos mostram que a mesma interacção pode tomar a forma de calor ou de trabalho, dependendo da selecção do sistema.

Trabalho eléctrico

Foi indicado no Exemplo 3-4 que os electrões, ao atravessarem a fronteira do sistema, produzem trabalho eléctrico neste. Num campo eléctrico, os electrões de um condutor deslocam-se sob o efeito de forças electromotrizes, produzindo trabalho. Quando N coulombs de electrões se movem através de uma diferença de potencial V , o trabalho eléctrico é

$$W_e = VN$$

que também pode ser expresso sob a força de potência através de

$$\dot{W}_e = VI \quad (\text{W}) \quad (3-12)$$

em que \dot{W}_e representa a **potência eléctrica**, e I o número de electrões por unidade

de tempo, ou seja, a *corrente* (Figura 3-21). Em geral, tanto V como I variam com o tempo, e o trabalho eléctrico efectuado durante um intervalo Δt é expresso por

$$W_e = \int_1^2 VI dt \quad (\text{kJ}) \quad (3-13)$$

Quando V e I permanecem constantes durante Δt , a expressão anterior reduz-se a

$$W_e = VI \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (3-14)$$

EXEMPLO 3-6 Identificação das interações de calor e de trabalho

Um pequeno reservatório contendo água com gelo a 0°C é colocado no meio de um maior e bem isolado, cheio de óleo, como mostra a Figura 3-22. Inicialmente, todo o sistema se encontra em equilíbrio térmico a 0°C . Liga-se uma resistência eléctrica no óleo, produzindo um trabalho eléctrico de 10 kJ. Após algum tempo, verifica-se que todo o sistema se encontra novamente a 0°C , tendo-se derretido algum gelo. Considere o óleo como o sistema A e a água como o B . Discuta as interações de trabalho e de calor para o sistema A , para o B e para a combinação dos dois.

Solução As fronteiras de cada sistema estão indicadas na figura por uma linha ou traço interrompido. Note-se que a do sistema B forma a parte interior da fronteira do A .

Sistema A: Quando o aquecedor é ligado, os electrões atravessam a fronteira exterior, produzindo trabalho eléctrico. Como este é efectuado no sistema, $W_{A,\text{adm}} = 10 \text{ kJ}$. Devido a esta adição de energia, a temperatura do óleo subirá, criando um gradiente de temperatura que resulta num escoamento de calor deste para a água através da sua fronteira comum. Como o óleo foi restituído à sua temperatura inicial de 0°C , a energia cedida sob a forma de calor tem de ser igual à energia ganha sob a forma de trabalho. Portanto, $Q_{A,\text{sai}} = 10 \text{ kJ}$.

Sistema B: A única interacção de energia na fronteira do sistema B é o escoamento de calor do sistema A . Todo o calor cedido pelo óleo é ganho pela água, ou seja, $W_B = 0$ e $Q_{B,\text{adm}} = 10 \text{ kJ}$.

Sistema combinado: A fronteira exterior do sistema A forma a fronteira total da combinação dos dois. A única interacção de energia desta última é o trabalho eléctrico. Devido a o reservatório ser isolado, não existiram trocas de calor nesta fronteira. Portanto, $W_{\text{comb,adm}} = 10 \text{ kJ}$ e $Q_{\text{comb}} = 0$. Note-se que o escoamento de calor do óleo para a água é um processo interno do sistema combinado, não sendo portanto reconhecido como calor, pois é simplesmente uma redistribuição da energia interna.

3-4 ■ FORMAS MECÂNICAS DE TRABALHO

Existem diversos modos de produzir trabalho, cada um relacionado de alguma forma com uma força a actuar ao longo de uma distância (Figura 3-23). Na mecânica elementar, o trabalho efectuado por uma força constante F actuando sobre um corpo deslocado a uma distância s na mesma direcção é dado por

$$W = Fs \quad (\text{kJ}) \quad (3-15)$$

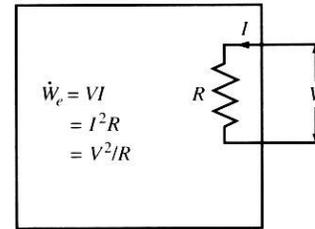


FIGURA 3-21

Potência eléctrica em termos de resistência R , corrente I e diferença de potencial V .

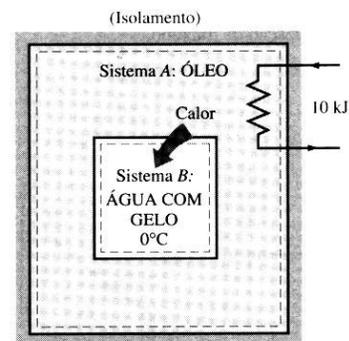


FIGURA 3-22

Esquema para o Exemplo 3-6.

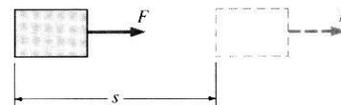


FIGURA 3-23

O trabalho realizado é proporcional à força aplicada (F) e à distância percorrida (s).

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-24

Se não existir movimento, não há realização de trabalho.

Se a força F não for constante, o trabalho efectuado é obtido pela adição (ou seja, integração) das suas quantidades diferenciais:

$$W = \int_1^2 F ds \quad (\text{kJ}) \quad (3-16)$$

Obviamente é necessário conhecer o modo como varia a força com o deslocamento para o cálculo do integral. As Equações 3-15 e 3-16 indicam somente a magnitude do trabalho, sendo o seu sinal determinado através de considerações físicas: O trabalho é considerado negativo, se for efectuado num sistema por uma força exterior que actua na direcção do movimento, e positivo se a direcção da força for contrária à do movimento. Existem dois requisitos para a existência da interacção sob a forma de trabalho entre um sistema e a sua vizinhança: (1) deve existir uma força a actuar na fronteira e (2) esta tem de movimentar-se. Devido a estes factos, a existência de forças na fronteira que não provoquem um deslocamento desta, não constitui uma interacção de trabalho. De forma idêntica, o deslocamento da fronteira sem a existência de forças que se opõem ou promovem este movimento (tal como a expansão de um gás para um espaço vazio), não produz trabalho, pois não existe transferência de energia.

Em diversos problemas de termodinâmica, a forma mecânica é o único tipo de trabalho envolvido, sendo associado ao deslocamento da fronteira ou movimento do sistema completo (Figura 3-24).

Em seguida, serão discutidas algumas das formas mais comuns de trabalho mecânico.

Trabalho de deslocamento de uma fronteira

Uma forma de trabalho vulgarmente encontrada na prática está associada com a expansão ou a compressão de um gás contido num dispositivo cilindro-êmbolo. Durante este processo, parte da fronteira (superfície interior do êmbolo) move-se alternadamente. Assim, o trabalho de compressão é denominado **trabalho de deslocamento de uma fronteira** ou simplesmente **trabalho de fronteira** (Figura 3-25). Este também pode ser denominado trabalho $P dv$, pelas razões expostas de seguida.

Este tipo de trabalho é a forma primária presente em motores de combustão interna onde a expansão dos gases em combustão força o deslocamento do êmbolo que por sua vez faz rodar a cambota.

O trabalho de fronteira associado a motores e a compressores não pode ser determinado com precisão apenas através de uma análise termodinâmica, devido à rapidez de movimento do êmbolo, que não permite aos gases contidos manter o equilíbrio. Desta forma, não é possível caracterizar os estados intermédios do processo, impedindo o traçado de um caminho que por sua vez impossibilita a determinação analítica do trabalho. Assim, o trabalho de fronteira em motores de combustão interna ou em compressores é determinado por medição directa.

Nesta secção será analisado o trabalho de fronteira em processos de *quase-equilíbrio*, nos quais o sistema permanece sempre em equilíbrio. Este tipo de processos, também denominados *quase-estáticos*, é uma aproximação

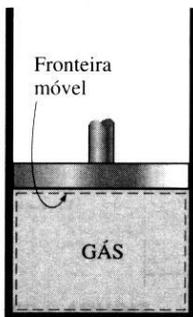


FIGURA 3-25

O trabalho associado a uma fronteira em movimento denomina-se trabalho de fronteira.

do processo real existente em motores térmicos a baixas velocidades. Sob condições idênticas, o emprego de processos de quase-equilíbrio traduz-se num débito máximo de trabalho em motores térmicos e uma menor necessidade em compressores. Em seguida, será analisado o trabalho associado a uma fronteira em movimento num processo de quase-equilíbrio.

Considere um gás contido num dispositivo cilindro-êmbolo, ilustrado na Figura 3-26. A sua pressão inicial é P , o volume total, V , e a área da superfície inferior do êmbolo, A . Se este efectua um deslocamento ds num processo de quase-equilíbrio, o trabalho diferencial efectuado é

$$\delta W_f = F ds = PA ds = P dV \quad (3-17)$$

Isto é, o trabalho de fronteira na forma diferencial é igual ao produto da pressão absoluta P pela variação diferencial de volume do sistema, dV . Note-se na Equação 3-17 que P é a pressão absoluta, sempre positiva. Contudo, a variação de volume, dV , é positiva durante um processo de expansão (aumento de volume), e negativa durante um processo de compressão (decréscimo de volume), implicando que o trabalho de fronteira seja positivo durante a expansão e negativo durante a compressão. A Equação 3-17 pode ser interpretada como uma expressão do trabalho saído de fronteira, $W_{f\text{ sai}}$.

O trabalho de fronteira total efectuado durante um processo completo de movimento do êmbolo é obtido pela adição de todos os trabalhos diferenciais desde o estado inicial ao final:

$$W_f = \int_1^2 P dV \quad (\text{kJ}) \quad (3-18)$$

Este integral só pode ser calculado através do conhecimento da relação funcional entre P e V durante um processo. Isto é, $P = f(V)$, sendo esta simplesmente a equação do caminho do processo num diagrama P - V .

O processo de quase-equilíbrio de expansão descrito acima está ilustrado num diagrama P - V da Figura 3-27. Neste, o diferencial da área, dA , é igual ao diferencial de trabalho, $P dV$. A área total abaixo da curva 1-2 é obtida pela adição das áreas diferenciais:

$$\text{Área} = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 P dV$$

A comparação desta equação com a Equação 3-18 revela que a área abaixo da curva de processo num diagrama P - V é igual, em valor, ao trabalho realizado durante um processo de quase-equilíbrio de expansão ou de compressão num sistema fechado. (Isto representa, num diagrama P - V , o trabalho de fronteira realizado por unidade de massa.)

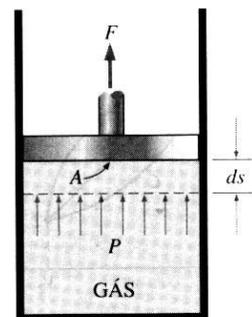


FIGURA 3-26

O gás realiza uma quantidade diferencial de trabalho δW_f , à medida que desloca o êmbolo uma distância ds .

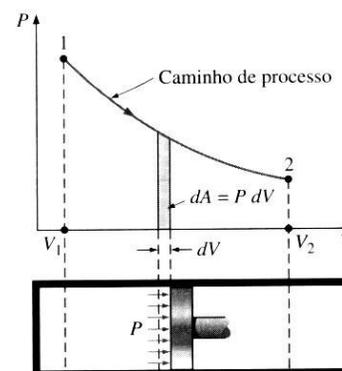


FIGURA 3-27

A área abaixo da curva de processo num diagrama P - V representa o trabalho de fronteira.

CAPÍTULO 3

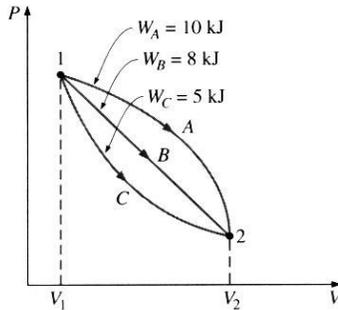
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-28

O trabalho de fronteira realizado durante um processo depende do caminho percorrido e dos estados finais.

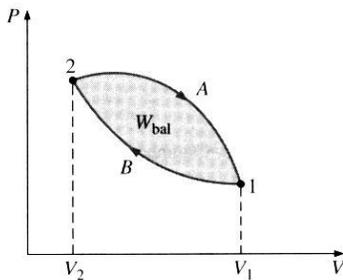


FIGURA 3-29

O trabalho total realizado durante um ciclo é igual à diferença entre o realizado pelo sistema e o realizado neste.

Um gás pode seguir diferentes caminhos, à medida que se expande desde o estado 1 até ao 2, variando o valor de Pdv , e sendo o trabalho diferente consoante o caminho percorrido (Figura 3-28), como era de esperar, pois o trabalho é uma função de caminho. Caso contrário, os dispositivos cíclicos, tais como motores térmicos ou centrais térmicas, não conseguiriam produzir trabalho, pois o realizado numa parte do ciclo iria ser consumido na outra, sendo o resultado final nulo. O ciclo ilustrado na Figura 3-29 apresenta um balanço positivo (área sombreada, W_{bal}) devido ao facto de o trabalho realizado durante a expansão (área abaixo do caminho A) ser superior ao consumido durante a compressão (área abaixo do caminho B).

Se a relação entre P e V , durante uma expansão ou uma compressão, é dada em termos de dados experimentais, não é possível o cálculo analítico do integral, sendo necessário o traçado de um diagrama de processo P - V , de forma a determinar o valor do trabalho graficamente.

Em termos estritos, a pressão P da Equação 3-18 é a actuante na superfície interior do êmbolo, sendo igual à do interior do cilindro, apenas se o processo for de quase-equilíbrio. A Equação 3-18 pode ser utilizada numa situação de não quase-equilíbrio desde que se utilize o valor da *pressão actuante na superfície inferior do êmbolo*. (Além disto, não é possível estabelecer a pressão de um sistema num processo de não quase-equilíbrio, visto que as propriedades são definidas para estados de equilíbrio.) Portanto, pode-se generalizar a expressão de trabalho de fronteira pelo seguinte:

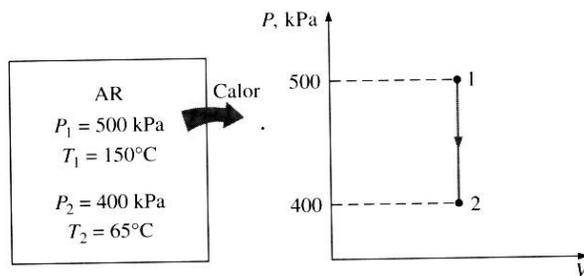
$$W_f = \int_1^2 P_i dV$$

em que P_i representa a pressão na superfície inferior do êmbolo.

Note-se que o trabalho é um mecanismo de interacção de energia entre um sistema e a sua vizinhança, e W_f representa a quantidade de energia transferida do sistema durante um processo de compressão (ou para o sistema durante um processo de expansão). Por exemplo, num motor de combustão interna, o trabalho de fronteira efectuado durante a expansão de gases quentes é utilizado para superar as forças de atrito desenvolvidas pelo êmbolo, escoar o ar atmosférico e rodar a cambota. Assim:

$$W_f = W_{\text{atrito}} + W_{\text{atm}} + W_{\text{cambota}} = \int_1^2 (F_{\text{atrito}} + P_{\text{atm}} A + F_{\text{cambota}}) dx$$

Obviamente que o trabalho despendido para superar o atrito surgirá como calor, e a energia transmitida através da cambota será por sua vez transferida para outros componentes (como as rodas) para desempenhar outras funções. Note-se que a energia transferida pelo sistema sob a forma de trabalho tem de ser igual à energia recebida pela cambota, a atmosfera e a utilizada para superar o atrito.

**FIGURA 3-30**

Esquema e diagrama P - V para o Exemplo 3-7.

A utilização da expressão de trabalho de fronteira (Equação 3-18) não está limitada a processos de quase-equilíbrio de gases, podendo também ser empregue para sólidos e líquidos.

EXEMPLO 3-7 Trabalho de fronteira durante um processo a volume constante

Um reservatório rígido contém ar a 500 kPa e 150°C. Como resultado da transferência de calor da vizinhança, a temperatura e a pressão desceram para 65°C e 400 kPa, respectivamente. Determine o trabalho de fronteira realizado neste processo.

Solução Um esboço do sistema e o diagrama P - V do processo são apresentados na Figura 3-30.

Análise O trabalho de fronteira pode ser determinado pela Equação 3-18:

$$W_f = \int_1^2 P dV = 0$$

Isto era esperado, pois um reservatório apresenta sempre um volume constante, tornando $dV = 0$ na equação dada, não havendo trabalho de fronteira durante este processo. Este facto também é evidente pela observação do diagrama P - V , pois a área abaixo da linha do processo é igual a 0.

EXEMPLO 3-8 Trabalho de fronteira durante um processo a pressão constante

Um dispositivo cilindro-êmbolo sem atrito contém 10 lbm de vapor de água a 60 psia e 320°F. Fornece-se calor ao sistema, até que se atinja a temperatura de 400°F. Sabendo que o êmbolo tem massa constante e que o seu movimento é livre, determine o trabalho realizado pelo vapor durante este processo.

Solução Um esboço do sistema e o diagrama P - V do processo são apresentados na Figura 3-31.

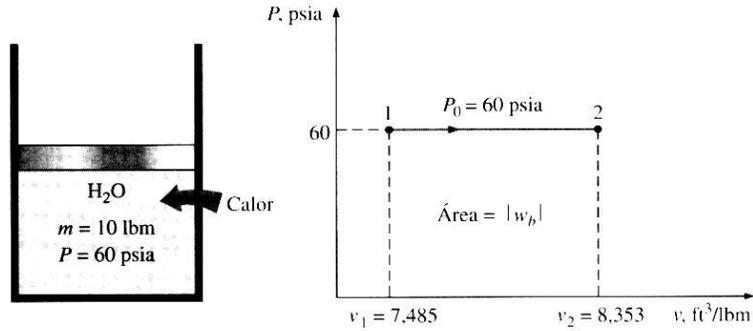
Pressuposto O processo de expansão é de quase-equilíbrio

Análise Embora o enunciado não seja explícito, a pressão do vapor mantém-se constante ao longo do tempo, visto que tanto a pressão atmosférica como o peso do êmbolo não variam, sendo este um processo a pressão constante.

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-31

Esquema e diagrama P - V
para o Exemplo 3-8.

Da Equação 3-18:

$$W_f = \int_1^2 P \, dV = P_0 \int_1^2 dV = P_0(V_2 - V_1)$$

ou

$$W_f = mP_0(v_2 - v_1) \quad (3-19)$$

visto que $V = mv$. Da tabela de vapor sobreaquecido (Tabela A-6E), o volume específico é de $v_1 = 7,485 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ no estado 1 (60 psia e 320°F) e $v_2 = 8,535 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ para o estado 2 (60 psia e 400°F). Substituindo estes valores, tem-se:

$$W_b = (10 \text{ lbm})(60 \text{ psia})[(8,353 - 7,485) \text{ ft}^3/\text{lbm}] \left(\frac{1 \text{ Btu}}{5,404 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3} \right) = 96,4 \text{ Btu}$$

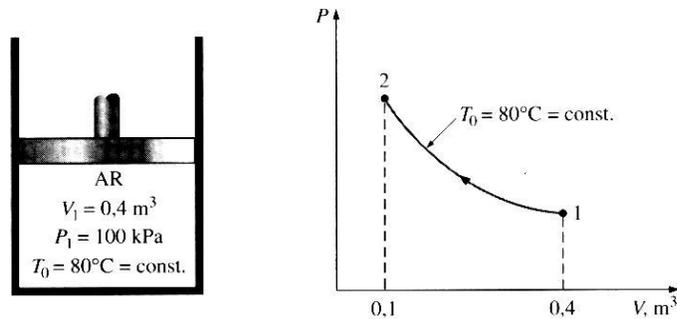
Discussão O sinal positivo indica que o trabalho foi efectuado pelo sistema. Ou seja, o vapor utilizou 96,4 Btu da sua energia para produzir trabalho. O valor deste também poderia ser determinado pelo cálculo da área abaixo da curva de processo num diagrama P - V que, para este caso, seria $P_0 \Delta V$.

EXEMPLO 3-9 Trabalho de fronteira durante um processo isotérmico

Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente $0,4 \text{ m}^3$ de ar a 100 kPa e 80°C . O ar é comprimido para $0,1 \text{ m}^3$, de forma a que a temperatura se mantenha constante. Determine o trabalho realizado durante este processo.

Solução Um esboço do sistema e o diagrama P - V do processo são apresentados na Figura 3-32.

FIGURA 3-32

Esquema e diagrama P - V
para o Exemplo 3-9.

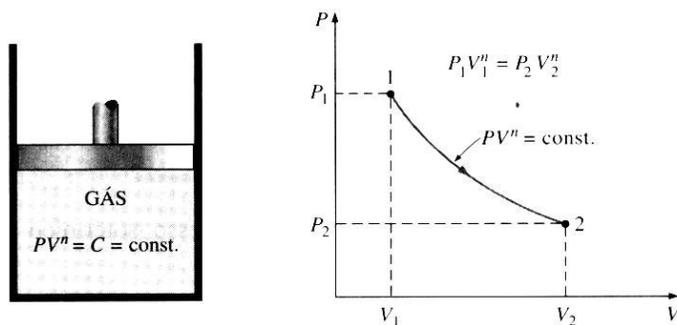


FIGURA 3-33
Esquema e diagrama P - V
para processos politrópicos.

Pressupostos 1 O processo de compressão é de quase-equilíbrio. 2 Às condições especificadas, o ar pode ser considerado como um gás perfeito, visto estar a uma temperatura elevada e pressão baixa em relação aos valores do ponto crítico.

Análise Para um gás ideal a uma temperatura constante T_0 :

$$PV = mRT_0 = C \quad \text{ou} \quad P = \frac{C}{V}$$

em que C é constante. Substituindo na Equação 3-18, tem-se

$$W_f = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C \int_1^2 \frac{dV}{V} = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3-20)$$

Nesta expressão, $P_1 V_1$ pode ser substituído por $P_2 V_2$ ou mRT_0 e V_2/V_1 por P_1/P_2 , visto que $P_1 V_1 = P_2 V_2$

Substituindo os valores na equação anterior:

$$W_f = (100 \text{ kPa})(0,4 \text{ m}^3) \left(\ln \frac{0,1}{0,4} \right) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = -55,45 \text{ kJ}$$

Discussão O sinal negativo indica que o trabalho é realizado sobre o sistema, sendo sempre o caso para compressores.

Processos politrópicos

Durante um processo de expansão ou compressão de um gás, a pressão e o volume relacionam-se por $PV^n = C$, em que n e C são constantes. Este tipo de processo denomina-se politrópico, podendo a pressão ser expressa por

$$P = CV^{-n} \quad (3-21)$$

Substituindo esta relação na Equação 3-18, obtém-se

$$W_f = \int_1^2 P dV = \int_1^2 CV^{-n} dV = C \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \quad (3-22)$$

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

visto que $C = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$. No caso de um gás perfeito ($PV = mRT$), esta equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$W_f = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n}, n \neq 1 \quad (\text{kJ}) \quad (3-23)$$

O caso particular de $n = 1$ representa um processo isotérmico.

Trabalho gravitacional

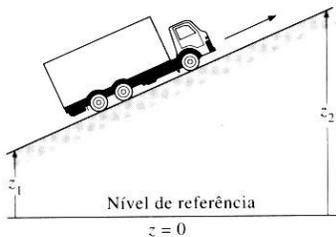
O **trabalho gravitacional** pode ser definido como o trabalho realizado por (ou contra) um campo de forças gravitacional, sendo a força actuante igual a

$$F = mg$$

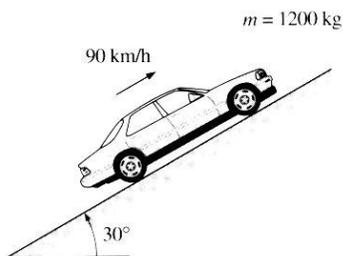
em que m representa a massa do corpo e g é a aceleração da gravidade que se supõe constante. Assim, o trabalho necessário para elevar um corpo desde a cota z_1 até à z_2 é

$$W_g = \int_1^2 F dz = mg \int_1^2 dz = mg (z_2 - z_1) \quad (\text{kJ}) \quad (3-24)$$

em que $z_2 - z_1$ representa a distância vertical percorrida (Figura 3-34). Esta expressão é geralmente reconhecida como a *variação de energia potencial*. Conclui-se, pela observação da Equação 3-24, que o trabalho gravitacional depende somente do estado final, independentemente do caminho percorrido para o alcançar e que a sua magnitude é igual à variação de energia potencial do sistema.

**FIGURA 3-34**

Os veículos necessitam de mais potência (trabalho gravitacional por unidade de tempo) quando sobem uma colina.

**FIGURA 3-35**

Esquema para o Exemplo 3-10.

EXEMPLO 3-10 Potência necessária para um automóvel subir um declive

Considere um automóvel de 1200 kg a deslocar-se numa estrada plana a um velocidade constante de 90 km/h. A estrada apresenta agora uma inclinação de 30° com a horizontal (Figura 3-35). Determine a potência adicional necessária para o automóvel manter a velocidade durante a subida.

Solução A potência adicional necessária é igual ao trabalho gravitacional por unidade de tempo, necessário para elevar o automóvel, traduzido pela variação de energia potencial por unidade de tempo:

$$\begin{aligned} \dot{W}_g &= mg \Delta z / \Delta t = mg v_{\text{vertical}} \\ &= (1200 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)(90 \text{ km/h})(\text{sen } 30^\circ) \left(\frac{1 \text{ m/s}}{3,6 \text{ km/h}} \right) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \\ &= 147 \text{ J/s} = \mathbf{147 \text{ kW}} \quad (\text{ou } 197 \text{ cv}) \end{aligned}$$

Portanto, o motor do automóvel terá de produzir quase 200 cv de potência adicional, de modo a manter a velocidade de 90 km/h durante a subida.

Trabalho de aceleração

O trabalho associado com a variação de velocidade de um sistema denomina-se **trabalho de aceleração**. O trabalho de aceleração necessário para acelerar um corpo de massa m com uma velocidade inicial de v_1 até à final v_2 (Figura 3-36) é determinado através da definição de aceleração da segunda lei de Newton:

$$\left. \begin{aligned} F &= ma \\ a &= \frac{dv}{dt} \end{aligned} \right\} F = m \frac{dv}{dt}$$

O diferencial de deslocamento ds está relacionado com a velocidade v através de

$$v = \frac{ds}{dt} \rightarrow ds = v dt$$

Substituindo as relações anteriores na expressão do trabalho (Equação 3-16), tem-se

$$W_a = \int_1^2 F ds = \int_1^2 \left(m \frac{dv}{dt} \right) (v dt) = m \int_1^2 v dv = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (3-25)$$

O trabalho necessário para acelerar um corpo é independente do caminho seguido e é equivalente à *variação de energia cinética* do corpo.

EXEMPLO 3-11 Potência necessária para acelerar um automóvel

Determine a potência necessária para acelerar um automóvel de 900 kg mostrado na Figura 3-37, desde o repouso até 80 km/h em 20 s e ao nível do mar.

Solução O trabalho de aceleração é calculado através da Equação 3-25:

$$\begin{aligned} W_a &= \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} (900 \text{ kg}) \left[\left(\frac{80\,000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} \right)^2 - 0^2 \right] \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \\ &= 222,2 \text{ kJ} \end{aligned}$$

A potência média é determinada por

$$W = \frac{W_a}{\Delta t} = \frac{222,2 \text{ kJ}}{20 \text{ s}} = \mathbf{11,1 \text{ kW}} \text{ (ou } 14,9 \text{ cv)}$$

Este último valor representa a potência necessária para superar o atrito, a resistência ao rolamento e outras imperfeições.

Trabalho de veio

A transmissão de energia através de um veio em rotação é muito comum nas aplicações de engenharia (Figura 3-38). Vulgarmente, o binário T no veio é constante, o que indica que a força F aplicada também o é. Para um binário

Formas mecânicas de trabalho

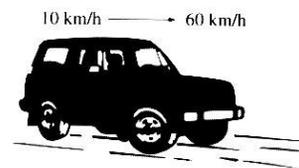


FIGURA 3-36

Os veículos necessitam de mais potência (trabalho de aceleração por unidade de tempo) quando aceleram.

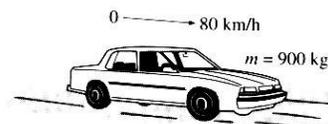


FIGURA 3-37

Esquema para o Exemplo 3-11.

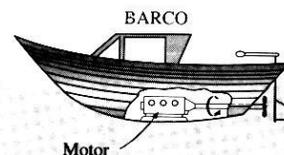


FIGURA 3-38

Na prática, é comum encontrar-se casos de energia transmitida através de veios em rotação.

CAPÍTULO 3

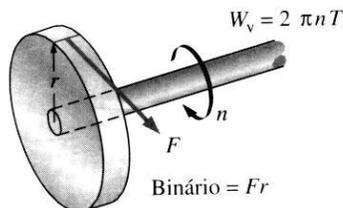
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-39

O trabalho de veio é proporcional ao binário aplicado e à velocidade de rotação.

dado, o trabalho efectuado durante n rotações é determinado da seguinte forma: A força F actuando num braço r gera um binário T de (Figura 3-39):

$$T = Fr \rightarrow F = \frac{T}{r}$$

Esta força actua ao longo de uma distância s , relacionada com o raio r por

$$s = (2\pi r)n$$

Então, o trabalho de veio é determinado pela Equação 3-15:

$$W_v = Fs = \left(\frac{T}{r}\right)(2\pi r n) = 2\pi nT \quad (\text{kJ}) \quad (3-26)$$

A potência transmitida através de um veio é dada pelo trabalho de veio por unidade de tempo, expresso por

$$\dot{W}_v = 2\pi \dot{n} T \quad (\text{kW}) \quad (3-27)$$

em que \dot{n} representa o número de rotações por unidade de tempo.

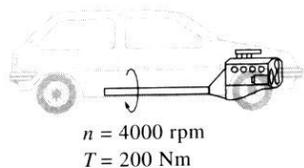


FIGURA 3-40

Esquema para o Exemplo 3-12.

EXEMPLO 3-12 Transmissão de potência através de um veio de um automóvel

Determine a potência transmitida através de um veio de um automóvel quando o binário aplicado é de $200 \text{ N} \cdot \text{m}$, e o veio roda a 4000 rotações por minuto (rpm).

Solução A Figura 3-40 apresenta um esboço do automóvel. A potência de veio é determinada pela Equação 3-27:

$$\begin{aligned} \dot{W}_v &= 2\pi \dot{n} T = (2\pi) \left(4000 \frac{1}{\text{min}}\right) (200 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1000 \text{ N} \cdot \text{m}}\right) \\ &= 83,7 \text{ kW} \quad (\text{ou } 112,2 \text{ cv}) \end{aligned}$$

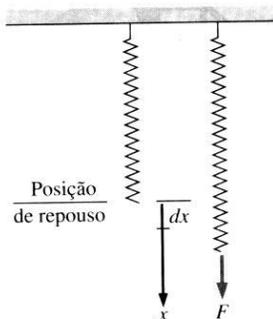


FIGURA 3-41

Alongamento de uma mola devido à influência de uma força.

Trabalho de uma força elástica

Sabe-se que, quando se aplica uma força a uma mola, o comprimento desta altera-se (Figura 3-41). O trabalho efectuado por uma força F que provoca um deslocamento de valor diferencial dx numa mola é dado por

$$\delta W_{\text{mola}} = F dx \quad (3-28)$$

Para se determinar o trabalho total da mola, é necessário conhecer a relação entre F e x . Para molas elásticas lineares, o deslocamento x é proporcional à força aplicada (Figura 3-42). Isto é:

$$F = kx \quad (\text{kN}) \quad (3-29)$$

em que k é a constante da mola cuja unidade é kN/m. O deslocamento x é medido a partir de uma posição de repouso da mola (isto é, $x = 0$ quando $F = 0$). Substituindo na Equação 3-28 e integrando, obtém-se

$$W_{\text{mola}} = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) \quad (\text{kJ}) \quad (3-30)$$

em que x_1 e x_2 representam os deslocamentos inicial e final, medidos a partir da posição de repouso.

EXEMPLO 3-13 Expansão de um gás contra uma mola

Um dispositivo cilindro-êmbolo contém $0,05 \text{ m}^3$ de gás inicialmente a 200 kPa . Neste estado, uma mola cuja constante é de 150 kN/m toca no êmbolo sem exercer qualquer força. É transferido calor para o gás, causando a elevação do êmbolo e a compressão da mola, até que o volume do cilindro duplique. Sabendo que a área do êmbolo é de $0,25 \text{ m}^2$, determine (a) a pressão final no interior do cilindro, (b) o trabalho total realizado pelo gás e (c) a fração do trabalho efectuado na compressão da mola.

Solução Um esboço da sistema e o diagrama P - V do processo são mostrados na Figura 3-43.

Pressupostos 1 O processo de expansão é de quase-equilíbrio. 2 Considera-se o comportamento da mola linear.

Análise (a) O volume do cilindro no estado final é:

$$V_2 = 2V_1 = (2)(0,05 \text{ m}^3) = 0,1 \text{ m}^3$$

então o deslocamento do êmbolo (e da mola) é de

$$x = \frac{\Delta V}{A} = \frac{(0,1 - 0,05) \text{ m}^3}{0,25 \text{ m}^2} = 0,2 \text{ m}$$

A força aplicada pela mola no estado final é determinada pela Equação 3-29

$$F = kx = (150 \text{ kN/m})(0,2 \text{ m}) = 30 \text{ kN}$$

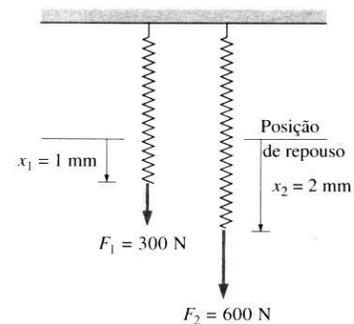
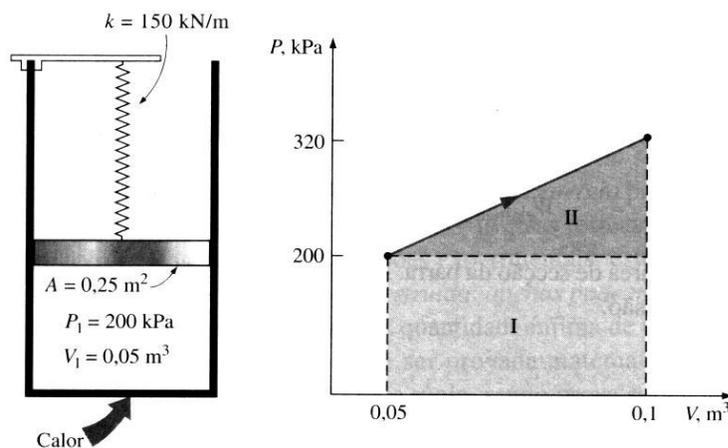


FIGURA 3-42

O deslocamento de uma mola linear duplica com o dobro da força aplicada.

FIGURA 3-43

Esquema e diagrama P - V para o Exemplo 3-13.

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

A pressão adicional aplicada pela mola no gás é

$$P = \frac{F}{A} = \frac{30 \text{ kN}}{0,25 \text{ m}^2} = 120 \text{ kPa}$$

Sem a mola, a pressão iria manter-se constante a 200 kPa, à medida que o êmbolo se deslocava. Mas devido ao efeito da mola, este valor aumenta linearmente desde 200 kPa para

$$200 + 120 = 320 \text{ kPa}$$

no estado final.

(b) A forma mais simples de determinar o trabalho realizado é traçar o processo num diagrama P - V e calcular a área abaixo da curva. Da Figura 3-43, a área abaixo da linha do processo (trapézio) é dada por

$$W = \text{área} = \frac{(200 + 320) \text{ kPa}}{2} [(0,1 - 0,05) \text{ m}^3] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 13 \text{ kJ}$$

Note-se que trabalho é realizado pelo sistema.

(c) O trabalho representado pela área rectangular (região I) é realizado contra o êmbolo e a atmosfera, e o representado pela área triangular (região II) é realizado contra a mola, então,

$$W_{\text{mola}} = \frac{1}{2} [(320 - 200) \text{ kPa}] (0,05 \text{ m}^3) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 3 \text{ kJ}$$

Este resultado também poderia ser obtido através da Equação 3-30:

$$W_{\text{mola}} = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) = \frac{1}{2} (150 \text{ kN/m}) [(0,2 \text{ m})^2 - 0^2] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kN} \cdot \text{m}} \right) = 3 \text{ kJ}$$

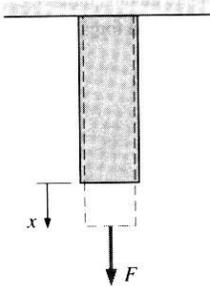


FIGURA 3-44

Sob a influência de uma força, uma barra sólida comporta-se como uma mola.

Trabalho realizado em barras sólidas elásticas

Os sólidos são vulgarmente modelados como molas lineares, devido ao facto de se contraírem ou alongarem sob a acção de uma força, retomando a dimensão original quando esta cessa, como ilustra a Figura 3-44. Isto é válido desde que a força não exceda a região elástica, de modo a evitar deformações permanentes (plásticas). Portanto, as equações dadas para uma mola linear podem ser aplicadas em barras sólidas elásticas. Alternativamente, pode-se determinar o trabalho associado à expansão ou à contracção de uma barra pela substituição da pressão P pela *tensão normal* $\sigma_n = F/A$ na expressão do trabalho de fronteira:

$$W_{\text{elástico}} \int_1^2 \sigma_n dV = \int_1^2 \sigma_n A dx \quad (\text{kJ}) \quad (3-31)$$

em que A é a área de secção da barra. Note-se que a tensão normal utiliza as unidades de pressão.

Trabalho associado à distensão de um filme líquido

Considere-se um filme líquido, como o sabão, suspenso numa armação (Figura 3-45). Sabe-se por experiência que é necessário uma força para distender o filme através do elemento móvel da armação. Esta força é utilizada para superar a coesão entre as moléculas na interface líquido-ar. Estas forças microscópicas são perpendiculares a qualquer linha da superfície, e a força gerada por estas, por unidade de comprimento, denomina-se **tensão superficial** σ_s , cuja unidade é N/m. Portanto, o trabalho associado à distensão de um filme pode também ser chamado *trabalho de tensão superficial*, sendo determinado por

$$W_{\text{superfície}} = \int_1^2 \sigma_s dA \quad (3-32)$$

em que $dA = 2b dx$ representa a variação da área do filme. O factor 2 é devido ao facto de existirem duas superfícies em contacto com o ar. A força actuando no elemento móvel da armação é dada por $F = 2b\sigma_s$.

Formas não mecânicas de trabalho

A descrição anterior representa uma extensa análise de formas mecânicas de trabalho. No entanto existem na prática formas não mecânicas que podem ser tratadas de uma forma singular, desde que se identifique uma *força generalizada* F , actuando na direcção de um *deslocamento generalizado* x . Assim, o trabalho associado com o deslocamento diferencial sob a influência de uma força é determinado através de $\delta W = F \cdot dx$.

Alguns exemplos são o **trabalho eléctrico**, em que a força generalizada é a *tensão* (potencial eléctrico), e o deslocamento generalizado, a *carga eléctrica*; o **trabalho magnético** tomando o *campo magnético* e o *momento dipolar*; o **trabalho de polarização eléctrico**, tomando o *campo eléctrico* e a *polarização do meio* (a soma dos momentos de rotação de um dipolo eléctrico das moléculas). A descrição pormenorizada de formas de trabalho não mecânicas pode ser encontrada na literatura especializada.

3-5 ■ A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Até agora, foram consideradas individualmente diversas formas de energia, como o calor Q , o trabalho W e a energia total E , não se estabelecendo nenhuma relação entre estas durante um processo. A *primeira lei da termodinâmica*, também conhecida pelo *princípio de conservação da energia* proporciona uma base sólida para o estudo das relações entre as diversas formas de energia e as suas interacções. Baseada em observações experimentais, esta lei estabelece que *a energia não pode ser criada ou destruída; apenas pode mudar de forma*. Portanto, deve-se ter em conta qualquer quantidade ínfima de energia durante um processo. A primeira lei não pode ser provada matematicamente, mas não é conhecido nenhum processo que a viole, sendo prova suficiente da sua validade.

A primeira lei da termodinâmica

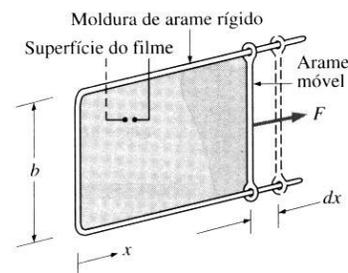


FIGURA 3-45

Estirar um filme líquido com um arame móvel.

CAPÍTULO 3

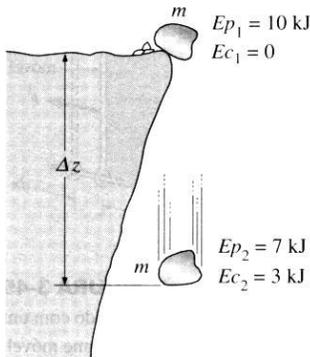
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-46

A energia não pode ser criada ou destruída, apenas pode mudar de forma.

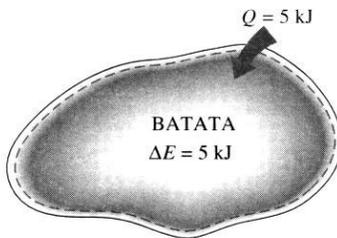


FIGURA 3-47

O aumento da energia de uma batata num forno é igual à quantidade de calor transferida para esta.

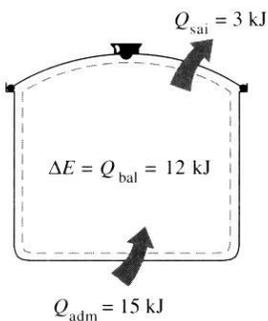


FIGURA 3-48

Na ausência de interações de trabalho, a variação de energia do sistema é igual à transferência de calor total.

Sabe-se que uma pedra atirada a uma certa altura possui energia potencial, sendo parte desta convertida em cinética, à medida que cai (Figura 3-46). Dados experimentais mostram que a diminuição de energia potencial ($mg \Delta z$) é igual ao aumento de energia cinética [$m(V_2^2 - V_1^2)/2$] quando a resistência aerodinâmica é desprezável, confirmando o princípio de conservação da energia.

Considere um sistema que sofre uma série de processos adiabáticos, desde um dado estado 1 até ao estado 2. Sendo adiabáticos, não pode existir troca de calor, verificando-se no entanto diversas formas de interação de trabalho. Medições cuidadosas durante essas experiências indicam que, *para todos os processos adiabáticos entre dois estados definidos num sistema fechado, o trabalho realizado é sempre o mesmo, independentemente da natureza do sistema ou das características do processo*. Esta frase, baseada nas experiências de Joule na primeira metade do século XIX, não pode ser extraída de qualquer outro princípio físico, sendo portanto reconhecida como um princípio fundamental, chamado **primeira lei da termodinâmica** ou somente **primeira lei**.

Uma consequência da primeira lei é a existência e a definição da propriedade *energia total E*. Considerando que num sistema fechado o balanço do trabalho é o mesmo para os todos os processos adiabáticos, o seu valor depende somente dos estados finais, correspondendo a uma alteração da propriedade do sistema, sendo esta a energia total. Note-se que a primeira lei não faz referência ao valor da *energia total* de um sistema fechado. Estabelece-se que a sua *variação* durante um processo adiabático tem de ser igual ao trabalho realizado. Portanto, atribui qualquer valor arbitrário à energia total de um sistema de modo, a estabelecer um ponto de referência.

Embora esteja implícito o princípio da energia na primeira lei, a essência desta é a existência da propriedade *energia total*, sendo vista como o fundamento do princípio de *conservação da energia*. Em seguida será desenvolvida a relação entre a primeira lei e a conservação da energia para sistemas fechados, auxiliado por alguns exemplos familiares.

De seguida consideram-se alguns processos que envolvem transferência de calor sem interações de trabalho. Como exemplo, considere-se uma batata a assar dentro de um forno (Figura 3-47). Como resultado da transferência de calor, a energia da batata irá aumentar. Desprezando qualquer transferência de massa (através da água), o aumento de energia total será igual ao aumento de transferência de calor. Se forem fornecidos 5 kJ à batata, o aumento de energia desta irá ser também de 5 kJ.

Considere-se como outro exemplo o aquecimento da água numa panela ao lume (Figura 3-48). Se o disco transferir 15 kJ de calor para a água, sendo 3 kJ perdidos para o ar, o aumento de energia da água irá ser igual ao balanço de transferência de calor, ou seja, 12 kJ.

Considere-se um sistema com um recinto bem isolado (adiabático) aquecido por um radiador eléctrico (Figura 3-49); como resultado do trabalho eléctrico, a energia do sistema irá aumentar e, como é adiabático, não existem trocas de

calor da, ou para a, vizinhança ($Q = 0$). O princípio de conservação da energia estabelece que o trabalho eléctrico efectuado no sistema tem de ser igual ao aumento de energia deste.

Em seguida, substitui-se o aquecedor por um agitador (Figura 3-50). Como resultado do processo de agitação, a energia do sistema irá aumentar. Novamente devido à inexistência de troca de calor entre o sistema e a vizinhança ($Q = 0$), o trabalho realizado pelo agitador irá aumentar a energia do sistema.

É do conhecimento comum que a temperatura do ar aumenta quando comprimido (Figura 3-51). Isto deve-se à energia transferida sob a forma de trabalho de fronteira, e na ausência de qualquer troca de calor ($Q = 0$) a totalidade do trabalho irá ser armazenada no ar como parte da sua energia total. O princípio de conservação da energia requer que o aumento de energia do sistema seja igual ao trabalho de fronteira realizado.

É possível estender as discussões anteriores, de modo a envolver simultaneamente várias interações de calor e trabalho. Se um sistema ganha 12 kJ de calor no decorrer de um processo enquanto se realiza neste 6 kJ de trabalho, verifica-se um aumento de energia de 8 kJ (Figura 3-52). Ou seja, durante o processo, a variação de energia do sistema é igual ao balanço de transferência de energia para o (ou do) sistema.

Balanço de energia

Com base na discussão anterior, o princípio de conservação da energia pode ser expresso do seguinte modo: *durante um processo, a variação (aumento ou diminuição) da energia total de um sistema é igual à diferença entre a energia total que entra e a energia total que sai.* Ou seja:

$$\left(\text{Energia total que entra no sistema} \right) - \left(\text{Energia total que sai do sistema} \right) = \left(\text{Variação da energia total do sistema} \right)$$

ou

$$E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

Esta equação é vulgarmente referida como **balanço de energia**, sendo aplicável a qualquer tipo de sistema que sofre qualquer processo. A utilização correcta desta equação para resolver problemas de engenharia depende do entendimento de vários tipos de energia e do reconhecimento das formas de transferência de energia.

Variação da energia de um sistema, $\Delta E_{\text{sistema}}$

A determinação da variação da energia de um sistema durante um processo envolve a avaliação da energia no início e no fim do processo, registando-se a sua diferença.

$$\text{Variação da energia} = \text{Energia no estado final} - \text{Energia no estado inicial}$$

A primeira lei da termodinâmica

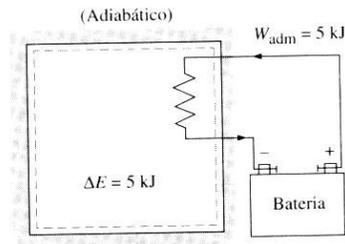


FIGURA 3-49

O trabalho (eléctrico) realizado no sistema adiabático é igual ao aumento de energia deste.

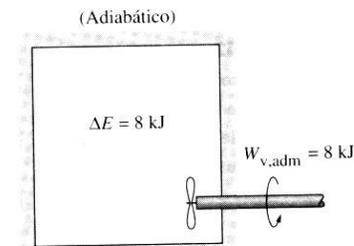


FIGURA 3-50

O trabalho (de veio) realizado no sistema adiabático é igual ao aumento de energia deste.

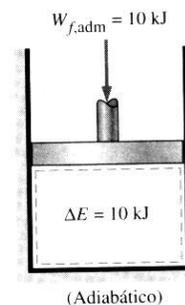


FIGURA 3-51

O trabalho (de fronteira) realizado no sistema adiabático é igual ao aumento de energia deste.

CAPÍTULO 3
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

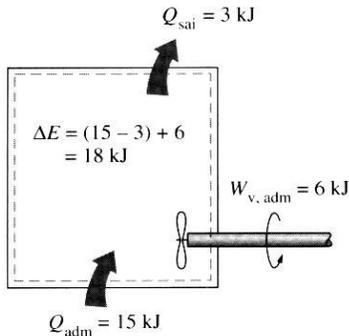


FIGURA 3-52

Durante um processo, a variação da energia do sistema é igual ao balanço de trabalho e de calor transferido entre o sistema e a sua vizinhança.

Sistemas estacionários

$$\begin{aligned} z_1 = z_2 &\rightarrow \Delta Ep = 0 \\ v_1 = v_2 &\rightarrow \Delta Ec = 0 \\ \Delta E &= \Delta U \end{aligned}$$

FIGURA 3-53

Para sistema estacionários, $\Delta Ec = \Delta Ep = 0$, portanto, $\Delta E = \Delta U$.

ou

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} = E_2 - E_1 \quad (3-33)$$

Note-se que a energia é uma propriedade, e o valor desta não se altera, a menos que exista uma mudança do estado do sistema. Portanto, a variação da energia do sistema é zero se não existir nenhuma mudança do estado. A energia pode também existir sob numerosas formas, tais como interna (sensível, latente, química e nuclear), cinética, potencial, eléctrica e magnética, constituindo a sua soma a *energia total* E do sistema. Na ausência de efeitos eléctricos, magnéticos e de tensão superficial (ou seja, sistemas compreensíveis simples), a variação da energia total de um sistema durante um processo é igual à soma da variação da sua energia interna, cinética e potencial, podendo ser expressa por

$$\Delta E = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep \quad (3-34)$$

em que

$$\Delta U = m(u_2 - u_1)$$

$$\Delta Ec = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2)$$

$$\Delta Ep = mg(z_2 - z_1)$$

Quando são dados os estados inicial e final, os valores da energia interna específica u_1 e u_2 podem ser determinados directamente através das tabelas das propriedades ou relações termodinâmicas.

A maioria dos sistemas encontrados na prática são estacionários, ou seja, não envolvem nenhuma variação da sua velocidade ou elevação durante o processo (Figura 3-53). Então, nos **sistemas estacionários**, a variação da energia cinética e potencial é zero ($\Delta Ec = \Delta Ep = 0$) e a variação da energia total reduz-se a $\Delta E = \Delta U$. Durante o processo, a energia de um sistema varia, mesmo que apenas uma das formas de energia varie, enquanto as restantes permanecem inalteradas.

Mecanismos de transferência de energia, E_{adm} e E_{sai}

A energia pode ser transferida de/ou para um sistema, sob três formas: *calor*, *trabalho* e *escoamento de massa*. As interações de energia podem ser identificadas na fronteira do sistema, à medida que atravessam esta, representando o ganho ou a perda pelo sistema durante um processo. As duas únicas formas de interacção de energia associadas com a massa constante ou sistema fechado, são a *transferência de calor e trabalho*.

- 1. Transferência de calor, Q** A transferência de calor para o sistema (ganho) aumenta o nível de energia das moléculas e, portanto, a energia interna, enquanto a transferência do sistema (perda) reduz o nível de energia, sendo retirada do sistema, cedida pelas moléculas.
- 2. Trabalho, W** Uma interacção de energia que não seja causada pela diferença de temperatura entre o sistema e a vizinhança realiza-se como trabalho. Um êmbolo em movimento, um veio em rotação, um condutor

eléctrico que atravessa a fronteira do sistema são exemplos de interacções de trabalho. A transferência deste (trabalho efectuado no sistema) aumenta o nível de energia do sistema, verificando-se o contrário quando o sistema realiza trabalho. Motores térmicos, hidráulicos, a vapor ou turbinas a gás produzem trabalho, enquanto compressores, bombas ou misturadores o consomem.

- 3. Escoamento de massa, m** O escoamento de massa de ou para o sistema é um mecanismo adicional de transferência de energia. Quando esta entra num sistema, o nível aumenta, devido a a massa transportar energia, verificando-se o contrário quando a massa deixa o sistema. Os sistemas que envolvem um balanço de energia com escoamento de massa são explicados em pormenor no Capítulo 4.

Sabendo que a energia pode ser transferida sob a forma de calor, trabalho e massa, o seu balanço é igual à diferença entre as quantidades transferidas para dentro e para fora do sistema. O balanço de energia pode ser apresentado de uma forma mais explícita como

$$E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}} = (Q_{\text{adm}} - Q_{\text{sai}}) + (W_{\text{adm}} - W_{\text{sai}}) + (E_{\text{massa, adm}} - E_{\text{massa, sai}}) \quad (3-35)$$

$$= \Delta E_{\text{sistema}}$$

em que os índices «adm» e «sai» denotam «de entrada» ou «de saída», respectivamente. Todos os termos à direita representam quantidades, sendo portanto *positivos*. A direcção de qualquer transferência é caracterizada pelos índices anteriores, não sendo necessário adoptar uma convenção formal de sinais. No caso de a direcção ser desconhecida, atribui-se uma (entrada ou saída) na resolução do problema. Se o resultado for negativo, a direcção escolhida é oposta à realmente verificada, sendo necessário inverter o sentido assumido inicialmente.

A transferência de calor Q é nula quando o sistema é adiabático, o trabalho W é zero em sistemas que não envolvam interacções de trabalho, e o transporte de energia com a massa E_{massa} é igual a zero quando não existe escoamento de massa (sistemas fechados).

O balanço de energia para qualquer sistema sujeito a qualquer processo pode ser simplificado como

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \quad (\text{kJ}) \quad (3-36)$$

ou, sob a **forma de escoamento**:

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \quad (\text{kW}) \quad (3-37)$$

CAPÍTULO 3

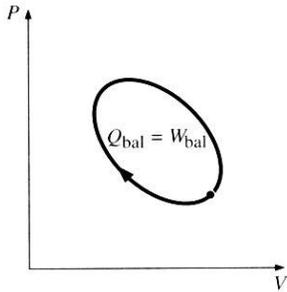
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-54

Para um ciclo $\Delta E = 0$, portanto, $Q = W$.

Para escoamentos estacionários, as quantidades totais durante um intervalo de tempo Δt estão relacionadas com as quantidades por unidade de tempo, por

$$Q = \dot{Q}\Delta t, \quad W = \dot{W}\Delta t, \quad \text{e} \quad \Delta E = \Delta \dot{E}\Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (3-38)$$

O balanço de energia pode ser expresso por **unidade de massa** através de

$$e_{\text{adm}} - e_{\text{sai}} = \Delta e_{\text{sistema}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-39)$$

obtido pela divisão da Equação 3-36 pela massa do sistema. Na forma diferencial, a equação do balanço de energia é

$$\delta E_{\text{adm}} - \delta E_{\text{sai}} = dE_{\text{sistema}} \quad \text{ou} \quad \delta e_{\text{adm}} - \delta e_{\text{sai}} = de_{\text{sistema}} \quad (3-40)$$

Para um sistema fechado que realiza um **ciclo**, os estados final e inicial são idênticos e, portanto, $\Delta E_{\text{sistema}} = E_2 - E_1 = 0$. Então, o balanço de energia para um ciclo transforma-se em $E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}} = 0$ ou $E_{\text{adm}} = E_{\text{sai}}$. Sabendo que um sistema fechado não envolve qualquer escoamento de massa ao longo da fronteira, o balanço de energia para um ciclo pode ser expresso em termos de uma interação de trabalho e de energia, como

$$W_{\text{sal, sai}} = Q_{\text{bal, adm}} \quad \text{ou} \quad \dot{W}_{\text{bal, sai}} = \dot{Q}_{\text{bal, adm}} \quad (\text{para um ciclo}) \quad (3-41)$$

Isto é, a produção de trabalho durante um ciclo é igual à admissão de calor (Figura 3-54).

As equações de balanço de energia (ou primeira lei) apresentadas são de natureza intuitiva e de fácil utilização quando se conhecem as magnitudes e as direcções dos componentes intervenientes. No entanto, nos exemplos de cálculo mais comuns, estes dados não são facultados, sendo necessário arbitrar uma direcção de trabalho e de calor. Nessas situações, assume-se que o calor é transferido *para o sistema* (calor admitido) e que o trabalho é realizado *pelo sistema* (trabalho saído). A primeira lei, ou equação de balanço de energia, torna-se, para o caso de um sistema fechado,

$$Q - W = \Delta E \quad (3-42)$$

Ou seja, a diferença entre o calor admitido e o trabalho realizado é igual à variação da energia do sistema. Se o resultado obtido para Q ou W for negativo, indica que a direcção escolhida é contrária à realmente verificada. Diversas formas «tradicionais» da expressão da primeira lei são apresentadas na Figura 3-55.

A primeira lei não pode ser provada matematicamente. No entanto, não existe na natureza nenhum processo conhecido que a viole, sendo prova suficiente da sua validade. Note-se que, se fosse possível prová-la através de outros princípios físicos, seria consequência destes, em vez de ser uma lei física fundamental.

As energias sob a forma de calor ou de trabalho diferem pouco, não sendo aparentemente necessário efectuar qualquer distinção. Afinal, a variação da energia de um sistema é igual à quantidade de energia que atravessa as fronteiras do sistema, não se diferenciando quer sob a forma de trabalho quer sob a forma de calor. Aparentemente, as expressões da primeira lei poderiam ser mais simples

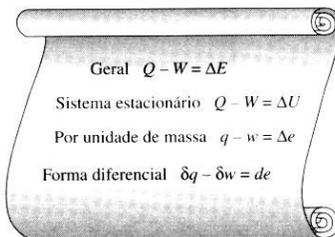


FIGURA 3-55

Diversas formas da relação da primeira lei aplicada a sistemas fechados.

se existisse somente uma quantidade, denominada interação de energia, para representar o trabalho e o calor, pois, do ponto de vista da primeira lei, o trabalho e o calor são idênticos. Contudo, do ponto de vista da segunda lei, estes diferem consideravelmente, como se verá em capítulos subsequentes.

EXEMPLO 3-14 Arrefecimento de um fluido num reservatório

Um reservatório rígido contém um fluido quente que arrefece à medida que é agitado por uma roda de pás. Inicialmente, a energia interna do fluido é de 800 kJ. Durante o processo de arrefecimento, o fluido perde 500 kJ de calor e o agitador fornece 100 kJ sob a forma de trabalho. Determine a energia interna final do fluido. Despreze a energia armazenada no agitador.

Solução Toma-se o conteúdo do reservatório como o sistema (Figura 3-56) que é fechado, visto não existir troca de massa na fronteira. Como o volume do reservatório é constante, não existe trabalho de fronteira, e $v_2 = v_1$. O calor cedido é pelo sistema e o trabalho é realizado neste.

Pressupostos O reservatório é estacionário, sendo as variações da energia cinética e da energia potencial iguais a zero, $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$. Portanto, $\Delta E = \Delta U$. A energia interna é a única forma que pode variar durante o processo.

Análise Aplicando o balanço de energia ao sistema, obtém-se

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$\begin{aligned} W_{v, \text{ adm}} - Q_{\text{ sai}} &= \Delta U = U_2 - U_1 \\ 100 \text{ kJ} - 500 \text{ kJ} &= U_2 - 800 \text{ kJ} \\ U_2 &= \mathbf{400 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

Portanto, a energia interna final do sistema é de 400 kJ.

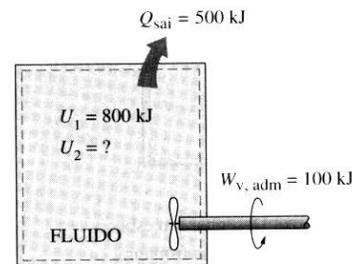


FIGURA 3-56

Esquema para o Exemplo 3-14.

3-6 ■ ABORDAGEM SISTEMÁTICA NA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS

Nesta altura, concentraram-se os esforços na compreensão dos princípios básicos da termodinâmica. Com base neste conhecimento, é possível resolver problemas de engenharia mais complexos. O conhecimento é uma componente essencial na resolução de problemas, mas os problemas em termodinâmica, particularmente os mais complexos, necessitam também de uma abordagem sistemática. Uma abordagem por sequência permite a um engenheiro resolver uma série de problemas simples que compõem um problema mais complexo (Figura 3-57).

Uma abordagem correcta na resolução de problemas de termodinâmica é apresentada em seguida através de um exemplo simples. Aconselha-se que o leitor domine esta abordagem e a empregue criteriosamente, de modo a evitar erros comuns na resolução de certos problemas.

EXERCÍCIO MODELO

Um reservatório de $0,1 \text{ m}^3$ contém inicialmente vapor a 500 kPa e 200° C . O vapor é arrefecido, apenas quando a sua temperatura atinge 50° C . Determine o calor transferido durante o processo e a pressão final no interior do reservatório.

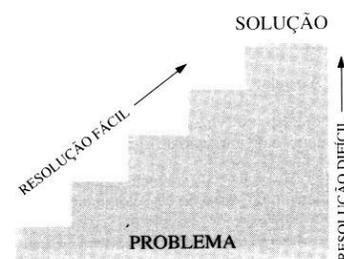


FIGURA 3-57

A abordagem por passos pode simplificar a resolução de um problema.

CAPÍTULO 3

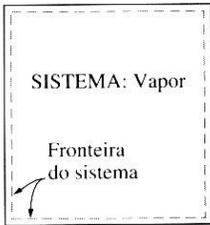
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-58

1.º Passo: Desenhar um esboço do sistema e da sua fronteira.

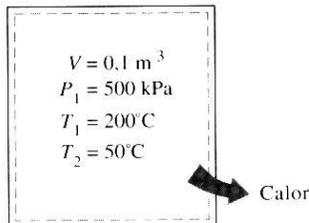


FIGURA 3-59

2.º Passo: Listar a informação dada no esboço.

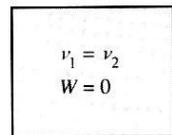


FIGURA 3-60

3.º Passo: Procurar simplificações.

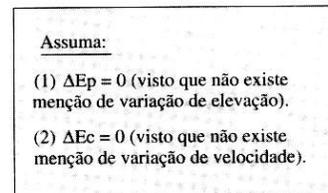


FIGURA 3-61

4.º Passo: Efectuar pressupostos, se necessário.

1.º Passo: Identificação do sistema e desenho de um esboço deste

É sempre aconselhável iniciar a resolução de um problema pela realização de um esboço do sistema físico. Este não tem de ser muito elaborado, sendo importante o traçado da fronteira através de linhas a traço interrompido (Figura 3-58). Desta forma, define-se correctamente a região do sistema onde se aplicam as equações do princípio de conservação.

Para problemas mais simples, a escolha do sistema pode ser bastante óbvia (para o caso em estudo, o vapor contido no reservatório), sendo mais complexa para problemas que incluam vários dispositivos como parte integrante. Nesses casos, é imprescindível a identificação do sistema antes de se proceder à sua análise.

2.º Passo: Listar a informação dada no esboço

Num exercício típico, a informação está espalhada ao longo do enunciado, e a listagem dos dados com a notação correcta permite visualizar o problema de uma forma mais simples (Figura 3-59). As interacções de calor e de trabalho, se existirem, devem ser incluídas no esboço com as respectivas direcções.

3.º Passo: Existência de processos particulares

Durante um dado processo, nem todas as propriedades variam e nem todos os processos envolvem transferência de calor ou de trabalho simultaneamente. Geralmente, uma propriedade principal, como a pressão ou a temperatura, permanece constante, simplificando a análise. No caso apresentado, tanto a pressão como a temperatura variam, mas o volume específico mantém-se constante, visto que um reservatório rígido apresenta um volume fixo ($V = \text{constante}$) e a massa é também fixa ($m = \text{constante}$) (Figura 3-60). Então:

$$v = \frac{V}{m} = \text{constante} \rightarrow v_2 = v_1$$

Se o processo fosse isotérmico, ter-se-ia $T_2 = T_1$ e, no caso adiabático, $Q = 0$. O sistema em estudo não envolve fronteiras móveis ou outras formas de trabalho, sendo portanto $W = 0$.

4.º Passo: Estabelecer pressupostos

Os pressupostos simplificativos utilizados na resolução devem ser mencionados e correctamente justificados, evitando os de validade duvidosa. Alguns pressupostos mais utilizados em termodinâmica são baseados em processos de quase-equilíbrio, assumindo-se um gás como perfeito, desprezando variações das energias cinética e potencial e trocas de calor em sistemas isolados.

O sistema em estudo pode ser considerado estacionário, visto não haver qualquer indicação do contrário. Então, as variações das energias cinética e potencial são nulas.

5.º Passo: Aplicação das equações de conservação

Podem então aplicar-se as equações de conservação, tais como a de massa ou de energia. Começa-se pela forma geral destas equações, simplificando-as com base

nos pressupostos estabelecidos (Figura 3-62), não devendo efectuar-se as substituições, antes deste ponto.

6.º Passo: Traçado do diagrama de processo

Os diagramas de processo, como $P-v$ ou $T-v$, são extremamente úteis para a visualização dos estados finais e iniciais de um sistema e do caminho percorrido. No caso em estudo, o volume permanece inalterado, figurando um segmento de recta vertical num diagrama $T-v$ (Figura 3-63). Para o caso de substâncias puras, os diagramas de processo devem ser traçados relativamente às linhas de saturação. Deste modo é aparente a região presente no problema. Através do diagrama da Figura 3-63 pode visualizar-se que o vapor se encontra sobreaquecido no estado inicial e saturado no final.

7.º Passo: Determinação das propriedades necessárias e das variáveis desconhecidas

As propriedades desconhecidas para qualquer estado podem ser determinadas, através das relações termodinâmicas e das tabelas de propriedades. As primeiras são admissíveis numa região limitada, de modo a evitar qualquer erro; a sua validade deve ser verificada antes da utilização dos dados. A equação dos gases perfeitos é provavelmente a equação termodinâmica mais utilizada em erro. Mesmo que o seu uso seja limitado a gases a baixa pressão (relativamente ao ponto crítico), por vezes emprega-se em relação a substâncias que nem estão na fase gasosa.

Quando se retiram dados das tabelas de propriedades, é necessário conhecer-se em que fase se apresenta, ou seja, líquido comprimido, mistura de líquido e de vapor saturado ou vapor sobreaquecido. Isto pode ser facilmente realizado pela comparação de uma propriedade conhecida com o valor da tabela de líquido e de vapor saturado.

No exercício dado, são fornecidos os valores da temperatura e da pressão inicial (Figura 3-64). O vapor neste estado existe como sobreaquecido, visto que a sua temperatura é superior à de saturação à mesma pressão (isto é, $200^\circ\text{C} > T_{\text{sat @ } 500\text{ kPa}} = 151,9^\circ\text{C}$). Então, os valores iniciais de volume específico e de energia interna podem ser retirados directamente das tabelas de vapor sobreaquecido. No estado final, o vapor existe como uma mistura saturada, visto que o volume específico v_2 é superior a v_f , mas inferior a v_g à temperatura final, $v_f < v_2 < v_g$.

Deve-se prestar atenção às unidades das diversas quantidades quando se substituem os valores nas equações. A utilização de unidades inconsistentes é uma das principais razões da ocorrência de erros. Qualquer resultado duvidoso deve ser tomado como indicação da existência de um erro, devendo-se verificar novamente a resolução.

A abordagem descrita é utilizada nos problemas seguintes, sem ser mencionado cada passo explicitamente. Em certos casos, alguns passos podem não ser aplicáveis ou necessários. Contudo, é imprescindível dar ênfase à importância de se efectuar uma abordagem lógica e ordenada na resolução de problemas. A maioria das dificuldades encontradas na resolução não é devida

Abordagem sistemática na resolução de problemas

<p>Massa: $m_2 = m_1 = m$</p> <p>Energia: $E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}} = \Delta E_{\text{sistema}}$</p> <p>$-Q_{\text{sai}} = m(u_2 - u_1)$</p>
--

FIGURA 3-62

5.º Passo: Aplicar as equações de conservação relevantes e simplificá-las.

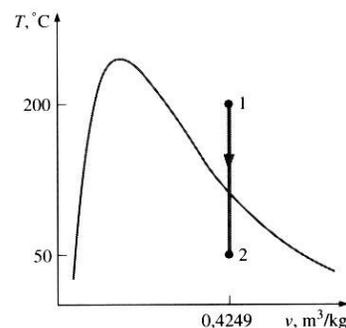


FIGURA 3-63

6.º Passo: Esboçar o processo num diagrama de propriedades.

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

<p>Estado 1: $P_1 = 500 \text{ kPa}$ } $v_1 = 0,4249 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ } $u_1 = 2642,9 \text{ kJ/kg}$</p> <p>Estado 2: $v_2 = v_1 = 0,4269 \text{ m}^3/\text{kg}$ $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow v_f = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ $v_g = 12,03 \text{ m}^3/\text{kg}$ $u_f = 209,32 \text{ kJ/kg}$ $u_g = 2443,5 \text{ kJ/kg}$ (Tabela A-4)</p> <p>$P_2 = P_{\text{sat @ } 50^\circ\text{C}} = 12,349 \text{ kPa}$ $v_2 = v_f + x_2 v_{fg}$ $0,4249 = 0,001 + x_2(12,03 - 0,001)$</p>	<p>$x_2 = 0,0352$ $u_2 = u_f + x_2 u_{fg}$ $= 209,32 + (0,0352)(2443,5 - 209,32)$ $= 288,0 \text{ kJ/kg}$</p> <p>$m = \frac{V}{v} = \frac{0,1 \text{ m}^3}{0,4249 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,235 \text{ kg}$</p> <p>$\frac{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}{\text{Energia transferida por calor, trabalho e massa}} = \frac{\Delta E_{\text{sistema}}}{\text{Variação das energias: interna, cinética, potencial, etc}}$</p> <p>$-Q_{\text{sai}} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$ $Q_{\text{sai}} = m(u_1 - u_2)$ $= (0,235 \text{ kg})(2642,9 - 288)$ $= 553,4 \text{ kJ}$</p>
--	---

FIGURA 3-64

7.º Passo: Determinar as propriedades requeridas e resolver o problema.

à falta de conhecimentos, mas à falta de coordenação. O leitor é encorajado a seguir esta abordagem na resolução de problemas, até que desenvolva uma própria que melhor se adapte.

EXEMPLO 3-15 Aquecimento de um gás a pressão constante

Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 25 g de vapor de água saturado, mantido à pressão constante de 300 kPa. Liga-se uma resistência eléctrica no interior, fazendo passar 0,2 A durante 5 min com uma tensão de 120 V. Ao mesmo tempo, ocorre uma perda de calor de 3,7 kJ. (a) Mostre que, para um processo isocórico num sistema fechado, o trabalho de fronteira W_f e a variação de energia interna ΔU podem ser combinados num único termo ΔH . (b) Determine a temperatura final do vapor.

Solução Toma-se como sistema o conteúdo do cilindro, incluindo a resistência eléctrica (Figura 3-65). Tratando-se de um sistema fechado, não existe troca de massa em qualquer ponto da fronteira. Sabe-se que um dispositivo cilindro-êmbolo apresenta geralmente uma fronteira móvel e, portanto, trabalho de fronteira W_f . A pressão permanece constante durante o processo, sendo $P_2 = P_1$. O calor é cedido pelo sistema, e o trabalho eléctrico W_f é realizado neste.

Pressupostos 1 O reservatório é estacionário resultando em variações nulas das energias cinética e potencial, $\Delta Ec = \Delta Ep = 0$. Portanto, $\Delta E = \Delta U$. A energia interna é a única que pode variar durante o processo. 2 Os condutores eléctricos constituem uma pequena parte do sistema, podendo a variação de energia destes ser desprezada.

Análise (a) A resolução desta alínea necessita de uma análise geral para um sistema fechado, sujeito a um processo isocórico de quase-equilíbrio. Toma-se a direcção da transferência de calor, Q , como sendo para o sistema e o trabalho, W , realizado por este.

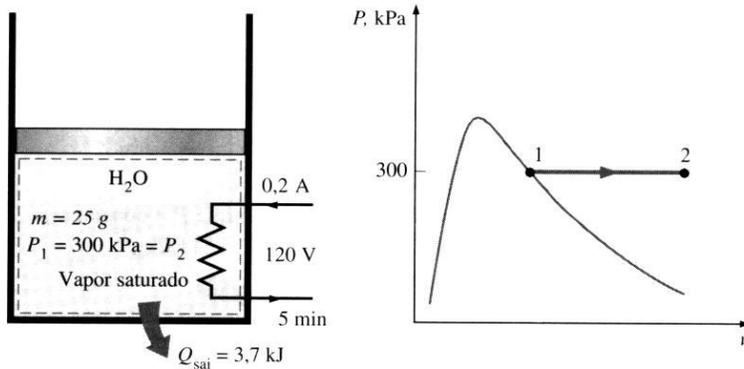


FIGURA 3-65
Esquema e diagrama P - v
para o Exemplo 3-15.

O trabalho é expresso pela soma do trabalho de fronteira e de outras formas (eléctrico ou de veio). Então, o balanço de energia pode ser escrito como

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$Q - W_{\text{outro}} - W_f = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Para um processo a pressão constante, o trabalho de fronteira é dado pela Equação 3-19, sendo $W_f = P_0(V_2 - V_1)$. Substituindo na expressão anterior, tem-se

$$Q - W_{\text{outro}} - P_0(V_2 - V_1) = U_2 - U_1$$

$$\text{Mas } P_0 = P_2 = P_1 \rightarrow Q - W_{\text{outro}} = (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$$

Como $H = U + PV$, temos

$$Q - W_{\text{outro}} = H_2 - H_1 \quad (\text{kJ}) \quad (3-43)$$

que é a equação pretendida (Figura 3-66). Esta equação é muito conveniente na análise de sistemas fechados sujeitos a um processo isocórico de quase-equilíbrio, visto que o trabalho de fronteira é traduzido pela entalpia, não sendo necessário o seu cálculo.

(b) Para este caso, a única forma de trabalho é o eléctrico, podendo ser determinado a partir da Equação 3-14:

$$W_e = VI\Delta t = (120 \text{ V})(0,2 \text{ A})(300 \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ kJ/s}}{1000 \text{ VA}} \right) = 7,2 \text{ kJ}$$

$$\text{Estado 1: } \left. \begin{array}{l} P_1 = 300 \text{ kPa} \\ \text{vapor saturado} \end{array} \right\} h_1 = h_V @ 300 \text{ kPa} = 2725,3 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-5})$$

A entalpia no estado final pode também ser determinada directamente da Equação 3-43, expressando-se, como quantidades negativas, o calor e o trabalho realizado no sistema (visto que as suas direcções são contrárias às assumidas). Alternativamente, pode-se utilizar a expressão geral de balanço de energia com a simplificação de que o trabalho de fronteira é traduzido pela substituição de ΔU por ΔH , para o caso de um processo de expansão ou de compressão a pressão constante:

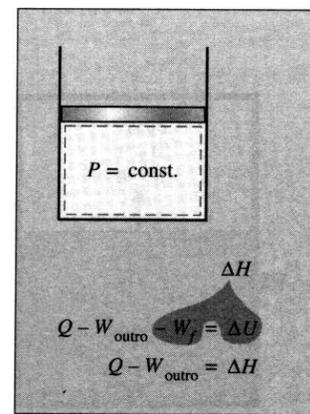


FIGURA 3-66
Para um sistema fechado sujeito
a um processo de quase-equilíbrio.
 $P = \text{constante}$, $\Delta U + W_f = \Delta H$.

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$\begin{aligned} W_{e, \text{adm}} - Q_{\text{sai}} - W_b &= \Delta U \\ W_{e, \text{adm}} - Q_{\text{sai}} &= \Delta H = m(h_2 - h_1) \quad (\text{visto que } P = \text{constante}) \\ 7,2 \text{ kJ} - 3,7 \text{ kJ} &= (0,025 \text{ kg})(h_2 - 2725,3 \text{ kJ/kg}) \\ h_2 &= 2865,3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

O estado final está completamente definido pela pressão e pela entalpia. A temperatura é dada por

$$\text{Estado 2:} \quad \left. \begin{array}{l} P_1 = 300 \text{ kPa} \\ h_2 = 2865,3 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} T_2 = 200^\circ \text{ C} \quad (\text{Tabela A-6})$$

Portanto, no final deste processo, o vapor irá estar a uma temperatura de 200° C.

Discussão Em termos estritos, a variação da energia potencial do vapor não é nula, visto que o centro de gravidade do sistema se elevou ligeiramente. Assumindo uma variação de cota de 1 m (valor exagerado), a variação da energia potencial seria (Equação 3-24) de 0,0002 kJ. Este valor é extremamente baixo em comparação com os outros termos da primeira lei. Portanto, neste tipo de problemas, o termo da energia potencial é sempre desprezado.

EXEMPLO 3-16 Expansão livre de água num reservatório vazio

Um reservatório está dividido em duas partes iguais. Inicialmente, um lado contém 5 kg de água a 200 kPa e 25° C e o outro encontra-se vazio. Retira-se a separação, permitindo à água expandir-se, à medida que ocupa todo o volume. O reservatório é deixado em repouso até que a temperatura da água retorne ao valor inicial de 25° C. Determine (a) o volume do reservatório, (b) a pressão final e (c) o calor transferido neste processo.

Solução Toma-se como sistema o conteúdo do reservatório incluindo o espaço vazio (Figura 3-67). Este é um sistema fechado, visto que não existe troca de massa através da fronteira. Quando a separação é removida, a água ocupa a totalidade do reservatório (provavelmente como uma mistura de líquido e de vapor).

Pressupostos **1** O sistema é estacionário e portanto as variações de energia cinética e de energia potencial são nulas, $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ e $\Delta E = \Delta U$. **2** A direcção da transferência de calor é para o sistema (ganho de calor, Q_{adm}). Um resultado negativo de Q_{adm} indicará que a direcção assumida não é a correcta, sendo portanto uma perda de calor. **3** O volume do reservatório rígido é constante, não existindo transferência de energia sob a forma de trabalho de fronteira. **4** Durante o processo, a temperatura da água permanece constante. **5** Não existe qualquer outra forma de trabalho.

Análise (a) Inicialmente, a água do reservatório está sob a forma de líquido comprimido, pois a sua pressão (200 kPa) é superior à de saturação a 25° C (3,169 kPa). Tratando o líquido comprimido como líquido saturado à temperatura dada tem-se

$$v_1 \cong v_f @ 25^\circ \text{ C} = 0,001\,003 \text{ m}^3/\text{kg} \cong 0,001 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tabela A-4})$$

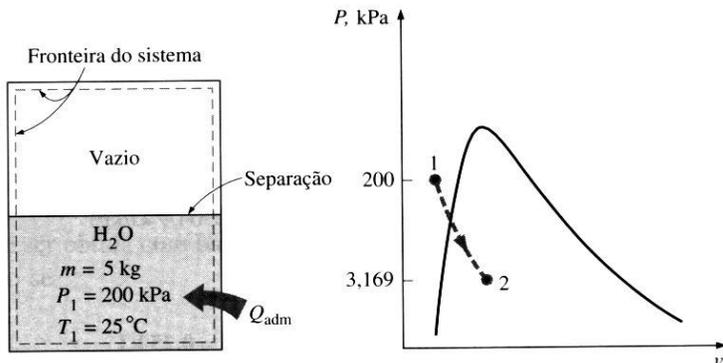


FIGURA 3-67

Esquema e diagrama P-v para o Exemplo 3-16.

Então, o volume inicial da água é de

$$V_1 = m v_1 (5\text{kg})(0,001 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0,005 \text{ m}^3$$

O volume total do reservatório é de duas vezes este valor:

$$V_{\text{res}} = (2)(0,005 \text{ m}^3) = \mathbf{0,01 \text{ m}^3}$$

(b) No estado final o volume específico da água é de

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0,01 \text{ m}^3}{5 \text{ kg}} = 0,002 \text{ m}^3/\text{kg}$$

que representa o dobro do valor inicial do volume específico. Este é o resultado esperado, visto que o volume duplica, enquanto a massa permanece constante. A 25° C:

$$v_f = 0,001003 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \text{e} \quad v_g = 43,36 \text{ m}^3/\text{kg} \quad (\text{Tabela A-4})$$

Como $v_f < v_2 < v_g$, no estado final, a água encontra-se em líquido e vapor saturado, sendo a pressão, a de saturação a 25° C:

$$P_2 = P_{\text{sat @ } 25^\circ \text{C}} = \mathbf{3,169 \text{ kPa}} \quad (\text{Tabela A-4})$$

(c) Com base nos pressupostos, o balanço de energia do sistema pode ser expresso por

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$Q_{\text{adm}} = \Delta U = m(u_2 - u_1)$$

Note-se que, embora a água se dilate durante este processo, o sistema escolhido incluiu somente fronteiras fixas (linhas a traço interrompido), sendo o trabalho de fronteira igual a zero (Figura 3-68). Então $W = 0$, visto que o sistema não envolve qualquer outra forma de trabalho. (Poder-se-á chegar à mesma conclusão escolhendo a água como sistema?) Inicialmente,

$$u_1 \cong u_f @ 25^\circ \text{C} = 104,88 \text{ kJ/kg}$$

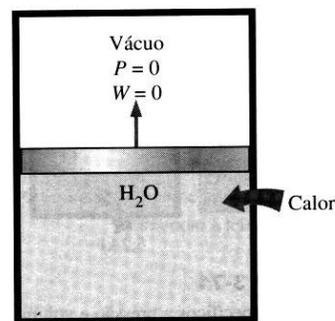


FIGURA 3-68

A expansão para o vácuo não envolve trabalho e, portanto, não existe transferência de energia.

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica: sistemas fechados

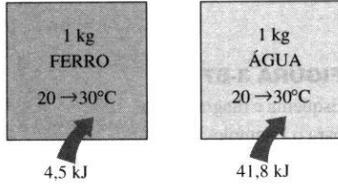


FIGURA 3-69

São necessárias diferentes quantidades de energia para aumentar a temperatura de diferentes substâncias no mesmo valor.

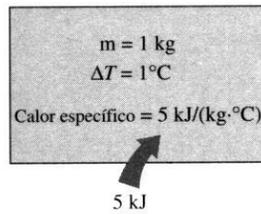


FIGURA 3-70

O calor especificado é a energia necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância, em 1 grau.

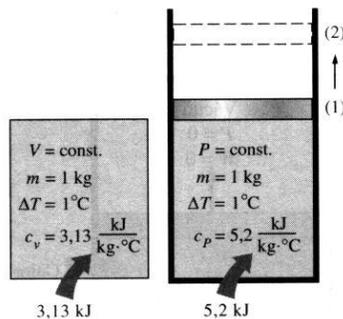


FIGURA 3-71

Calores específicos a pressão e volume constantes, c_p e c_v (valores de hélio).

O título do estado final é determinado através dos dados de volume específico:

$$x_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_{fg}} = \frac{0,002 - 0,001}{43,36 - 0,001} = 2,3 \times 10^{-5}$$

Então:

$$\begin{aligned} u_2 &= u_f + x_2 u_{fg} \\ &= 104,88 \text{ kJ/kg} + (2,3 \times 10^{-5})(2304,9 \text{ kJ/kg}) \\ &= 104,93 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Substituindo, obtém-se

$$Q_{\text{adm}} = (5 \text{ kg})[(104,93 - 104,88) \text{ kJ/kg}] = \mathbf{0,25 \text{ kJ}}$$

Discussão O sinal positivo indica que a direção assumida é correcta e o calor é transferido para a água.

3-7 ■ CALORES ESPECÍFICOS

Sabe-se, por experiência, que são necessárias diferentes quantidades de energia para aumentar a temperatura, em 1° C, a substâncias diferentes de igual massa. Por exemplo, são necessários cerca de 4,5 kJ de energia para aumentar a temperatura a 1 kg de ferro, de 20 para 30° C, sendo no entanto necessários cerca de nove vezes esta energia (mais precisamente 41,8 kJ) para aumentar a temperatura a 1 kg de água líquida (Figura 3-69). Portanto, é necessário conhecer uma propriedade que permita comparar a capacidade de armazenamento de energia das várias substâncias. Esta propriedade denomina-se calor específico.

O **calor específico** é definido como a *energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em 1° C* (Figura 3-70). Em geral, esta energia irá depender da forma como o processo é efectuado. Em termodinâmica, distinguem-se dois tipos de calores específicos: **calor específico a volume constante**, c_v , e **calor específico a pressão constante**, c_p .

Fisicamente, o calor específico a volume constante, c_v , pode ser visto como a *energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em 1° C, mantendo o volume constante*. A energia necessária para realizar o mesmo, mas a pressão constante, denomina-se calor específico a uma pressão constante, c_p , como ilustra a Figura 3-71. O calor específico a pressão constante, c_p é sempre superior ao c_v , pois, a pressão constante, é permitido ao sistema expandir-se, e a energia do trabalho desta expansão também tem de ser fornecida ao sistema.

De seguida tentar-se-ão expressar os calores específicos em termos de outras propriedades termodinâmicas. Considerando um sistema fechado estacionário sujeito a um processo a volume constante ($w_b = 0$), a equação da primeira lei para este processo pode ser expressa na forma diferencial como

$$\delta q - \delta w_{\text{outros}} = du$$

O termo do lado esquerdo desta equação ($\delta q - \delta w_{\text{outros}}$) representa a quantidade de energia transferida para o sistema sob a forma de calor e / ou de trabalho. Através da definição de c_v , esta energia deve ser igual a $c_v dT$, em que dT representa a variação diferencial de temperatura. Assim:

$$c_v dT = du \quad \text{a volume constante}$$

ou

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (3-44)$$

De forma análoga, uma expressão para o calor específico a pressão constante c_p pode ser obtida com base no processo a pressão constante ($w_b + \Delta u = \Delta h$), obtendo-se

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (3-45)$$

As Equações 3-44 e 3-45 definem c_v e c_p , sendo a sua interpretação dada na Figura 3-72.

Note-se que c_v e c_p são expressos em termos de outras propriedades; assim, estes são também propriedades. Tal como qualquer outra propriedade, os calores específicos de uma substância dependem do estado que, em geral, é especificado através de duas propriedades intensivas independentes. Ou seja, em energia necessária para aumentar a temperatura em 1° C irá ser diferente para temperaturas e pressões diferentes (Figura 3-73). Mas esta diferença não é geralmente muito grande.

Podem-se fazer algumas observações das Equações 3-44 e 3-45. Em primeiro lugar, estas equações são *relações de propriedades* e, como tal, são *independentes do tipo de processo*, sendo válidas para *qualquer* substância sujeita a qualquer processo. A única relevância que c_v tem com um processo a volume constante é que este representa a energia transferida para o sistema durante um processo a volume constante por unidade de massa por unidade de aumento de temperatura. É deste modo que os valores de c_v são determinados. De modo idêntico, a energia transferida para o sistema por unidade de massa por unidade de temperatura durante um processo a pressão constante representa c_p .

Uma outra observação que se pode fazer das equações anteriores é que c_v está relacionado com as variações de *energia interna*, e c_p com as de *entalpia*. De facto, seria mais correcto definir c_v como a *variação de energia interna de uma substância por unidade de variação de temperatura a volume constante*. Igualmente, c_p pode ser definido como *variação de entalpia de uma substância por unidade de variação de temperatura a pressão constante*. Por outras palavras, c_v representa a medida de a variação de energia interna de uma substância com a temperatura e c_p a medida de variação da entalpia de uma substância com a temperatura.

A energia interna e a entalpia de uma substância podem ser alteradas pela transferência de *energia sob qualquer forma*, sendo o calor uma delas. Portanto, o termo *energia específica* é provavelmente mais próprio do que *calor específico*, pois implica que a energia é transferida (e armazenada) sob a forma de calor.

As unidades mais comuns para calores específicos são kJ/(kg · °C) ou kJ/(kg · K). Note-se que estas duas unidades são *idênticas*, visto que ΔT (° C) = ΔT (K), e uma variação de temperatura de 1° C é equivalente a uma variação de 1 K (ver

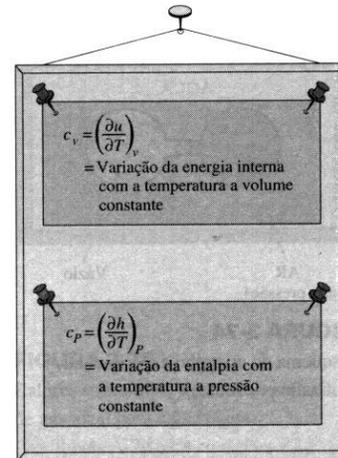


FIGURA 3-72

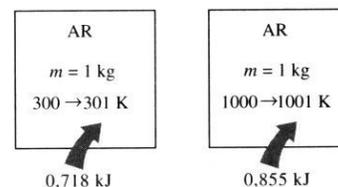
Definições formais de c_v e c_p 

FIGURA 3-73

O calor específico de uma substância varia com a temperatura.

CAPÍTULO 3

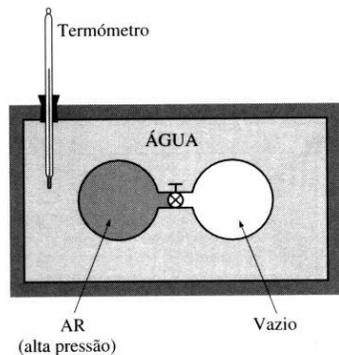
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-74

Esquema do aparelho experimental utilizado por Joule.

$$\begin{aligned} u &= u(T) \\ h &= h(T) \\ c_v &= c_v(T) \\ c_p &= c_p(T) \end{aligned}$$

FIGURA 3-75

Para gases perfeitos, u , h , c_v e c_p variam somente com a temperatura.

a Secção 1-10). Os calores específicos são por vezes dados numa *base molar*, sendo denotados por \bar{c}_v e \bar{c}_p , com as unidades $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot ^\circ\text{C})$ ou $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$.

3-8 ■ ENERGIA INTERNA, ENTALPIA E CALORES ESPECÍFICOS DE GASES PERFEITOS

No Capítulo 2, definiu-se um gás perfeito quando a temperatura, a pressão e o volume específico são relacionados por

$$Pv = mRT$$

Demonstra-se matematicamente (Capítulo 11) e experimentalmente (Joule, 1843) que a energia interna de um gás perfeito é apenas função da temperatura. Ou seja,

$$u = u(T) \quad (3-46)$$

Na sua experiência clássica, Joule submergiu dois reservatórios ligados por um tubo e uma válvula num banho de água, como mostra a Figura 3-74. Inicialmente, um reservatório continha ar a alta pressão, e o outro, vácuo. Quando se atingiu um equilíbrio térmico, abriu-se a válvula permitindo a passagem de ar de um reservatório para o outro, até que se atingisse a igualdade de pressões. Joule não observou qualquer variação de temperatura na água e admitiu que não houve transferência de calor. Como também não se realizou trabalho, concluiu que a energia interna do ar não variou, embora o volume e a pressão se alterassem. Portanto, pensou que a energia interna era apenas função da temperatura e não da pressão ou do volume específico. (Joule mais tarde demonstrou que, para gases que se desviam significativamente do comportamento de um gás perfeito, a energia interna não é apenas função da temperatura.)

Usando a definição de entalpia e a equação de estado de gás perfeito, tem-se

$$\left. \begin{aligned} h &= u + Pv \\ Pv &= RT \end{aligned} \right\} h = u + RT$$

Como R é uma constante e $u = u(T)$, deduz-se que a entalpia de um gás perfeito é também apenas função da temperatura:

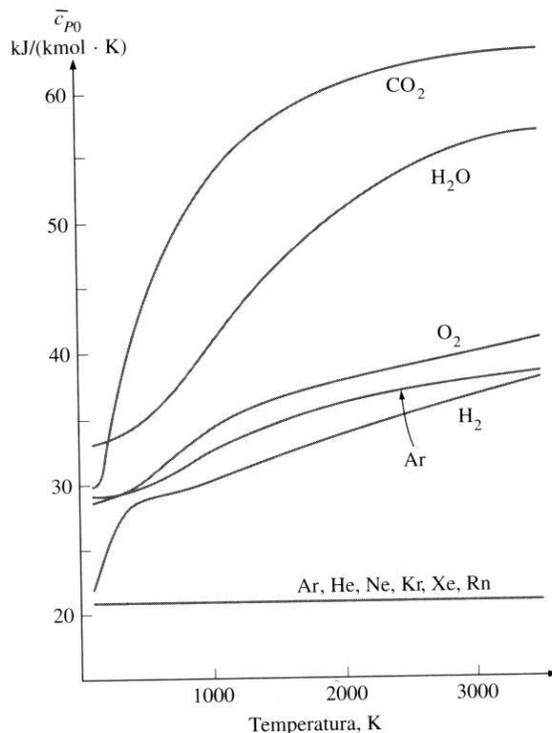
$$h = h(T)$$

Como u e h dependem só da temperatura para gás perfeito, os calores específicos c_v e c_p também dependem somente da temperatura. Portanto, *a uma dada temperatura, u , h , c_v e c_p de um gás perfeito irão apresentar valores fixos independentemente do volume específico ou da pressão* (Figura 3-75). Para gases perfeitos, as derivadas parciais das Equações 3-44 e 3-45 podem ser substituídas por derivadas vulgares. Então as variações diferenciais da energia interna e da entalpia de um gás perfeito podem ser expressas por

$$du = c_v(T)dT \quad (3-48)$$

e

$$dh = c_p(T)dT \quad (3-49)$$

**FIGURA 3-76**

Calores específicos a pressão constante de gás ideal para alguns gases (ver Tabela A-2c para equações \bar{c}_{p0}).

As variações da energia interna ou da entalpia para um gás perfeito durante um processo desde o estado 1 até ao estado 2 são determinadas pela integração das equações anteriores:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_2^1 c_v(T) dt \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-50)$$

e

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \int_2^1 c_p(T) dt \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-51)$$

Para calcular estes integrais, é necessário conhecer as relações de c_v e c_p em função da temperatura.

A baixas pressões, todos os gases reais se aproximam do comportamento de um gás perfeito, portanto os seus calores específicos dependem apenas da temperatura. Os calores específicos de gases reais a baixas pressões são chamados *calores específicos de gases perfeitos*, ou *calores específicos a pressão zero*, sendo vulgarmente denotados por c_{v0} e c_{p0} . Expressões analíticas exactas para calores específicos de gases perfeitos, baseadas em medições directas ou em cálculo com base no comportamento estatístico das moléculas, estão disponíveis, como polinómios de grau 3, no apêndice (Tabela A-2c) para diversos gases. O traçado de dados de $\bar{c}_{p0}(T)$ para alguns gases comuns é dado na Figura 3-76.

O uso de dados de calor específico de gases perfeitos está limitado a baixas pressões, mas estes dados podem também ser usados para pressões moderadamente altas, com precisão razoável, desde que o gás não se desvie significativamente do comportamento de gás perfeito.

AR		
T, K	u, kJ/kg	h, kJ/kg
0	0	0
300	214,17	300,19
310	221,25	310,24

FIGURA 3-77

Utiliza-se a temperatura de 0 K como referência, na preparação das tabelas de gases perfeitos.

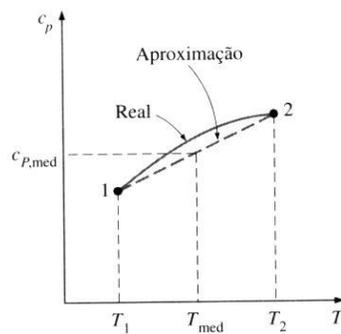


FIGURA 3-78

Para intervalos de temperatura pequenos, pode assumir-se que os calores específicos variam linearmente com a temperatura.

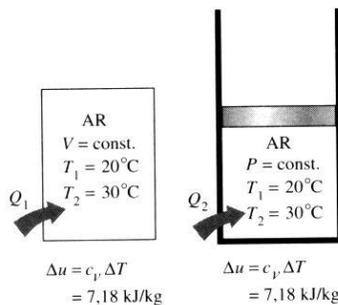


FIGURA 3-79

A relação $\Delta u = c_v \Delta T$ é válida para qualquer tipo de processos, a volume constante ou não.

As integrações das Equações 3-50 e 3-51 são directas mas bastante morosas, portanto pouco práticas. Para evitar estes cálculos complexos e demorados, os dados de u e h para um certo número de gases têm sido tabelados para pequenos intervalos de temperatura. Estas tabelas são obtidas pela escolha arbitrária de um ponto de referência e calculando os integrais das Equações 3-50 e 3-51 tomando o estado 1 como referência. Nas tabelas de gases perfeitos apresentadas em apêndice, o 0 K é escolhido como o estado de referência, e tanto à entalpia como à energia interna é atribuído o valor de 0 para este estado (Figura 3-77). A escolha do estado de referência não afecta os cálculos de Δu ou Δh . Os dados de u e h são apresentados em kJ/kg para o ar (Tabela A-17) e em kJ/kmol para outros gases (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2O e H_2). A unidade kJ/kmol é muito conveniente na análise termodinâmica de reacções químicas.

Algumas observações podem ser feitas da Figura 3-76. Os calores específicos de gases com moléculas complexas (com dois ou mais átomos) são elevados, aumentando com a temperatura. A variação do calor específico com a temperatura é suave e pode ser tomada como linear num intervalo estreito de temperaturas (inferior a $100^\circ C$). As equações de calor específico das Equações 3-50 e 3-51 podem ser substituídas pela média constante de valores de calor específico. Assim, as integrações destas equações podem ser efectuadas, resultando

$$u_2 - u_1 = c_{v,med}(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-52)$$

$$h_2 - h_1 = c_{p,med}(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-53)$$

Os valores de calor específico para alguns gases comuns são listados em função da temperatura na Tabela A-2b. Os valores médios de calores específicos $c_{p,med}$ e $c_{v,med}$ são avaliados a partir desta tabela a uma temperatura média $(T_1 + T_2)/2$, como mostra a Figura 3-78. Se a temperatura final T_2 não é conhecida, os calores específicos podem ser determinados à temperatura T_1 ou à temperatura média prevista. Então, T_2 pode ser determinado utilizando estes valores de calor específico. O valor de T_2 pode ser refinado, se necessário, pelo cálculo dos calores específicos à nova temperatura média.

Outra forma de determinar os calores específicos médios é através de T_1 e T_2 , tomando a sua média. Geralmente, ambos os métodos dão bons resultados.

Outra observação que pode ser feita da Figura 3-76 é de que os calores específicos de um gás perfeito monoatômico, tal como árgon, néon, ou hélio, permanecem constantes a qualquer temperatura. Assim, Δu e Δh podem ser facilmente calculados através das Equações 3-52 e 3-53.

Note-se que as equações de Δu e Δh apresentadas não se restringem a qualquer tipo de processos, sendo válidas para todos. A presença de calor específico a volume constante c_v numa equação não significa que esta equação seja válida somente para processos a volume constante. Pelo contrário, a equação $\Delta u = c_{v,med} \Delta T$ é válida para qualquer gás perfeito sujeito a qualquer processo (Figura 3-79). O mesmo se aplica para c_p e Δh .

Em resumo, existem três formas de determinar as variações da energia interna e da entalpia para gases perfeitos (Figura 3-80):

1. Pela utilização de dados tabelados de u e h . Esta é a forma mais fácil e precisa quando se tem acesso a tabelas.

2. Pela utilização das equações de c_v ou c_p como função da temperatura, calculando os integrais. Este processo é muito inconveniente para o cálculo manual mas desejável para o cálculo computadorizado. Os resultados obtidos são muito precisos.
3. Pela utilização de calores específicos médios. Este é o processo mais simples e o mais conveniente quando não existem tabelas de propriedades disponíveis. Os resultados obtidos são bastante precisos se os intervalos de temperatura não forem muito grandes.

Equações de calores específicos para gases perfeitos

A relação especial entre c_p e c_v para gases perfeitos pode ser obtida pela diferenciação da equação $h = u + RT$, dando

$$dh = du + R dT$$

Substituindo dh por $c_p dT$ e du por $c_v dT$ e dividindo a expressão resultante por dT , obtém-se

$$c_p = c_v + R \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})] \quad (3-54)$$

Esta equação é importante para gases perfeitos, pois permite a determinação de c_v através do conhecimento de c_p e da constante de gás R .

Quando os calores específicos são dados numa base molar, R na equação acima deve ser substituída pela constante universal de gases R_u (Figura 3-81).

Ou seja,

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R_u \quad [\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})] \quad (3-55)$$

Nesta altura, introduz-se outra propriedade de gases perfeitos denominada **relação de calores específicos** k definida como

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (3-56)$$

A relação de calores específicos também varia com a temperatura, mas esta variação é pequena. Para gases monoatômicos, o valor é essencialmente constante e igual a 1,667. Muitos gases diatômicos, incluindo o ar, têm uma relação de calores específicos de cerca de 1,4 à temperatura ambiente.

AR a 300 K

$$\left. \begin{array}{l} c_v = 0,718 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ R = 0,287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{array} \right\} c_p = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

ou

$$\left. \begin{array}{l} \bar{c}_v = 20,80 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \\ R_u = 8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) \end{array} \right\} \bar{c}_p = 29,114 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

Energia interna, entalpia e calores específicos de gases perfeitos

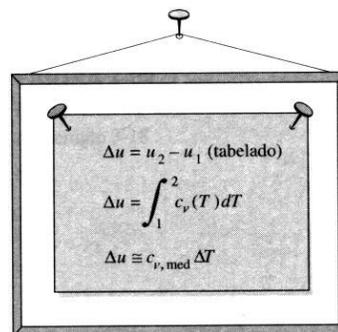


FIGURA 3-80

Três formas de calcular Δu .

FIGURA 3-81

O c_p de um gás perfeito pode ser determinado pelo conhecimento de c_v e R .

Exemplo 3-17 Cálculo de ΔU de um gás perfeito

Ar a 300 K e 200 kPa é aquecido a pressão constante até 600 K. Determine a variação de energia interna do ar por unidade de massa, usando (a) dados das tabelas de ar (Tabela A-17), (b) a forma funcional de calor específico (Tabela A-2c) e (c) o valor médio de calor específico (Tabela A-2b).

Solução Nas condições especificadas, o ar pode ser considerado como gás perfeito, visto que está a uma temperatura elevada e a uma baixa pressão em relação ao ponto crítico. A variação da energia interna de gases perfeitos depende somente das temperaturas inicial e final. Então, a solução dada em seguida é válida para qualquer tipo de processo.

Análise (a) Uma forma de determinar a variação da energia interna do ar é retirar os valores de u a T_1 e T_2 da Tabela A-17 e calcular a diferença:

$$\begin{aligned} u_1 &= u @ 300 \text{ K} = 214,07 \text{ kJ/kg} \\ u_2 &= u @ 600 \text{ K} = 434,78 \text{ kJ/kg} \\ \text{então, } \Delta u &= u_2 - u_1 = (434,78 - 214,07) \text{ kJ/kg} = \mathbf{220,71 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$

(b) O $\bar{c}_p(T)$ do ar encontra-se na Tabela A-2c sob a forma de um polinómio de grau 3:

$$\bar{c}_p(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$$

em que $a = 28,11$, $b = 0,1967 \times 10^{-2}$, $c = 0,4802 \times 10^{-5}$ e $d = -1,966 \times 10^{-9}$.
Da Equação 3-55:

$$\bar{c}_v(T) = \bar{c}_p - R_u = (a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3$$

Da Equação 3-50:

$$\Delta \bar{u} = \int_1^2 \bar{c}_v(T) dT = \int_{T_1}^{T_2} [(a - R_u) + bT + cT^2 + dT^3] dT$$

Calculando o integral e substituindo os valores, obtém-se

$$\Delta \bar{u} = 6447,15 \text{ kJ/kmol}$$

A variação da energia interna por unidade de massa é determinada dividindo este valor pela massa molar do ar (Tabela A-1):

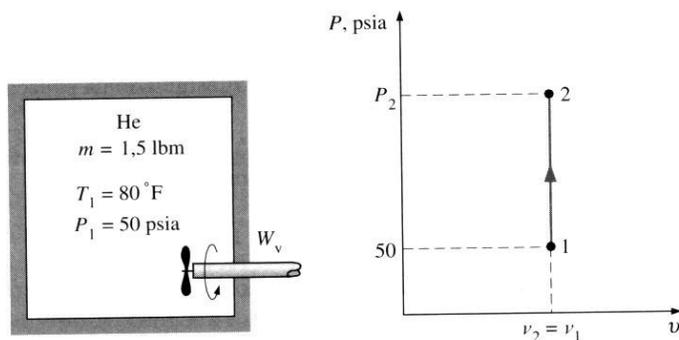
$$\Delta u = \frac{\Delta \bar{u}}{M} = \frac{6447,15 \text{ kJ/kmol}}{28,97 \text{ kg/kmol}} = \mathbf{222,55 \text{ kJ/kg}}$$

que difere do resultado exacto em 0,8%.

O valor médio do calor específico a volume constante $c_{v,\text{med}}$ é determinado a partir da Tabela A-2b, com base no valor médio da temperatura $(T_2 + T_1) / 2 = 450 \text{ K}$, sendo

$$c_{v,\text{med}} = c_v @ 450 \text{ K} = 0,733 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

$$\begin{aligned} \text{Então, } \Delta u &= c_{v,\text{med}}(T_2 - T_1) = [0,733 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}][(600 - 300) \text{ K}] \\ &= \mathbf{219,9 \text{ kJ/kg}} \end{aligned}$$



Energia interna, entalpia
e calores específicos
de gases perfeitos

FIGURA 3-82

Esquema e diagrama P - v para o Exemplo 3-18.

Esta resposta difere do valor exacto (220,71 kJ/kg) apenas em 0,4%. Este valor não é surpreendente, visto que o pressuposto de que c_v varia linearmente com a temperatura é razoável, pois os intervalos são de apenas algumas centenas de graus. Se fosse utilizado o valor de c_v a $T_1 = 300$ K em vez de T_{med} , o resultado seria de 215,4 kJ/kg sendo o erro de cerca de 2%. Erros desta magnitude são aceitáveis na maioria dos casos de engenharia.

Exemplo 3-18 Aquecimento de um gás num reservatório por agitação

Um reservatório rígido contém inicialmente 1,5 lbm de hélio a 80° F e 50 psia. Uma hélice com potência de 0,02 cv agita o interior do reservatório durante 30 min. Determine (a) temperatura final e (b) a pressão final do hélio.

Solução Toma-se o conteúdo do reservatório como sistema (Figura 3-82). Este é um sistema fechado, pois não existe troca de massa na fronteira durante o processo. Observa-se que a hélice realiza trabalho no sistema.

Pressupostos 1 O hélio é um gás perfeito, visto estar a uma temperatura elevada em relação ao valor do ponto crítico de -451° F. 2 Podem ser usados calores específicos constantes para o hélio. 3 O sistema é estacionário, logo as variações das energias potencial e cinética são nulas, $\Delta Ec = \Delta Ep = 0$ e $\Delta E = \Delta U$. 4 O volume do reservatório é constante, não existindo trabalho de fronteira, $V_2 = V_1$. 5 O sistema é adiabático, não se verificando portanto transferência de calor.

Análise (a) A quantidade de trabalho realizado pela hélice no sistema é

$$W_h = \dot{W}_h \Delta t = (0,02 \text{ cv})(0,5\text{h}) \left(\frac{2545 \text{ Btu/h}}{1 \text{ cv}} \right) = 25,45 \text{ Btu}$$

Com base nos pressupostos e observações, o balanço de energia do sistema pode ser expresso como

$$\underbrace{\dot{E}_{adm} - \dot{E}_{sai}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{sistema}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$W_{h,adm} = \Delta U = m(u_2 - u_1) = m_{cv,med}(T_2 - T_1)$$

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

Como foi referido anteriormente, os calores específicos dos gases perfeitos monoatômicos (hélio incluído) são constantes. O valor de c_v do hélio é determinado através da Tabela A-Ea, sendo $c_v = 0,753 \text{ Btu}/(\text{lbm} \cdot ^\circ\text{F})$. Substituindo na equação anterior, obtém-se

$$25,45 \text{ Btu} = (1,5 \text{ lbm})[0,735 \text{ Btu}/(\text{lbm} \cdot ^\circ\text{F})](T_2 - 80^\circ \text{F})$$

$$T_2 = 102,5^\circ \text{F}$$

(b) A pressão final é determinada através da equação dos gases perfeitos

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

em que V_1 e V_2 são idênticos, anulando-se. Assim, a pressão final é

$$\frac{50 \text{ psia}}{(80 + 460) \text{ R}} = \frac{P_2}{(102,5 + 460) \text{ R}}$$

$$P_2 = 53,1 \text{ psia}$$

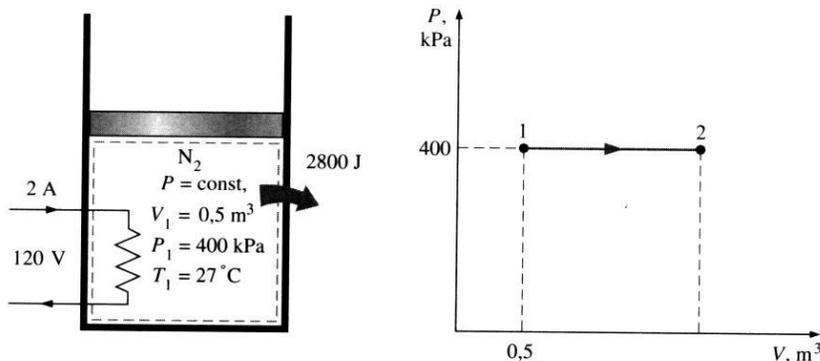
Exemplo 3-19 Aquecimento de um gás através de uma resistência

Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente $0,5 \text{ m}^3$ de azoto gasoso a 400 kPa e 27°C . Liga-se no interior uma resistência eléctrica fazendo passar 2 A durante 5 min com uma tensão de 120 V . O azoto expande-se a pressão constante, verificando-se uma perda de calor de 2800 J durante o processo. Determine a temperatura final do azoto utilizando os dados da Tabela A-18.

Solução Toma-se o conteúdo do cilindro como sistema (Figura 3-83). Este é um sistema fechado, visto que não existe troca de massa na fronteira durante o processo. Observa-se que o dispositivo cilindro-êmbolo envolve realização de trabalho de fronteira, W_f . O calor é cedido pelo sistema, e o trabalho eléctrico W_e é realizado neste.

Pressupostos 1 O azoto é um gás perfeito, visto que está a uma temperatura elevada e a baixa pressão em relação aos valores do ponto crítico de -147°C e $3,39 \text{ MPa}$. 2 O sistema é estacionário, sendo a variação de energia cinética e potencial igual zero, $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ e $\Delta E = \Delta U$. 3 A pressão permanece constante durante o processo, $P_1 = P_2$.

FIGURA 3-83
Esquema e diagrama P - V
para o Exemplo 3-19.



Análise Em primeiro lugar determina-se o trabalho eléctrico realizado no azoto:

$$W_e = VI\Delta t = (120 \text{ V})(2 \text{ A})(5 \times 60 \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ kJ/s}}{1000 \text{ VA}} \right) = 72 \text{ kJ}$$

O número de moles de azoto é determinado através da equação dos gases perfeitos:

$$N = \frac{P_1 V_1}{R_u T_1} = \frac{(400 \text{ kPa})(0,5 \text{ m}^3)}{[8,314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})](300 \text{ K})} = 0,080 \text{ kmol}$$

No caso de gases diferentes do ar, é conveniente trabalhar com o número de moles em vez da massa, visto os dados de h e u serem apresentados numa base molar (Figura 3-84). Com base nos pressupostos e observações, o balanço de energia do sistema pode ser expresso por

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$W_{e,\text{adm}} - Q_{\text{sai}} - W_f = \Delta U$$

$$W_{e,\text{adm}} - Q_{\text{sai}} = \Delta H = m(h_2 - h_1) = N(\bar{h}_2 - \bar{h}_1)$$

Como $\Delta U + W_f \equiv \Delta H$ para um sistema fechado sujeito a um processo de expansão ou de compressão de quase-equilíbrio a pressão constante. Da tabela de azoto, $\bar{h}_1 = \bar{h} @ 300\text{K} = 8723 \text{ kJ/kmol}$. O único valor desconhecido da equação anterior é o de \bar{h}_2 , sendo

$$72 \text{ kJ} - 2,8 \text{ kJ} = (0,08 \text{ kmol})(\bar{h}_2 - 8723 \text{ kJ/kmol})$$

$$\bar{h}_2 = 9588 \text{ kJ/kmol}$$

O valor da temperatura correspondente a esta entalpia é

$$T_2 = 56,7^\circ \text{ C}$$

Energia interna, entalpia e calores específicos de gases perfeitos

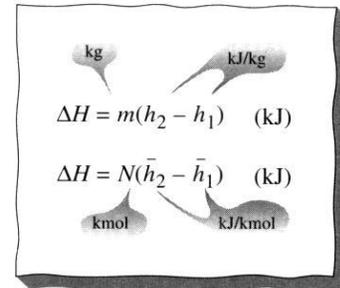


FIGURA 3-84

Duas formas equivalentes de determinar a variação da entalpia total ΔH .

Exemplo 3-20 Aquecimento de um gás a pressão constante

Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente ar a 150 kPa e 27°C. Neste estado, o êmbolo encontra-se em repouso sobre um batente, como mostra a Figura 3-85, com um volume de 400 l. A massa do êmbolo é tal que é necessária uma pressão de 350 kPa para o mover. O ar é aquecido, até o seu volume duplicar. Determine (a) temperatura final, (b) o trabalho realizado pelo ar, e (c) o calor transferido pelo ar.

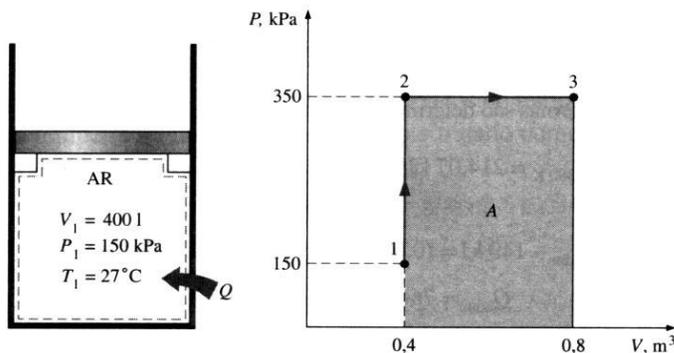


FIGURA 3-85

Esquema e diagrama P - V para o Exemplo 3-20.

Solução Toma-se o interior do cilindro como sistema (Figura 3-85). Este é o sistema fechado, visto que não existe troca de massa através da fronteira durante o processo. Observa-se que o dispositivo cilindro-êmbolo envolve uma fronteira móvel e, portanto, trabalho de fronteira. O trabalho de fronteira é também realizado pelo sistema, e o calor é transferido deste.

Pressupostos **1** O ar é um gás perfeito, visto que está a uma temperatura elevada e a uma baixa pressão em relação aos valores do ponto crítico de -141°C e $3,77\text{ MPa}$. **2** O sistema é estacionário, sendo as variações das energias cinética e potencial iguais a zero, $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ e $\Delta E = \Delta U$. **3** O volume permanece constante, até que o êmbolo inicie o seu movimento, e a pressão permanece constante a partir deste instante. **4** Não existe trabalho eléctrico, de veio ou de qualquer outra forma.

Análise (a) A temperatura final pode ser determinada facilmente através do emprego da equação dos gases perfeitos entre os estados 1 e 3, da seguinte forma:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_3 V_3}{T_3} \rightarrow \frac{(150\text{ kPa})(V_1)}{300\text{ K}} = \frac{(350\text{ kPa})(2V_1)}{T_3}$$

$$T_3 = \mathbf{1400\text{ K}}$$

(b) O trabalho realizado pode ser determinada a partir da Equação 3-18 por integração, mas para este caso é muito mais simples calcular a área abaixo da curva do processo no diagrama P - V , como ilustra a Figura 3-85:

$$A = (V_2 - V_1)(P_2) = (0,4\text{ m}^3)(350\text{ kPa}) = 140\text{ m}^3\cdot\text{kPa}$$

Portanto:

$$W_{13} = \mathbf{140\text{ kJ}}$$

O trabalho é realizado pelo sistema (elevação do êmbolo e expulsão do ar atmosférico).

(c) Com base nos pressupostos e observações, o balanço de energia do sistema entre os estados final e inicial (processo 1-3) pode ser expresso como

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$Q_{\text{adm}} - W_{f, \text{sai}} = \Delta U = m(u_3 - u_1)$$

A massa do sistema pode ser determinada através da equação dos gases perfeitos:

$$m = \frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{(150\text{ kPa})(0,4\text{ m}^3)}{[0,287\text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{K})](300\text{ K})} = 0,697\text{ kg}$$

As energias internas são determinadas através da tabela do ar (Tabela A-17), sendo

$$u_1 = u_{@300\text{ K}} = 214,07\text{ kJ/kg} \quad \text{e} \quad u_3 = u_{@1400\text{ K}} = 1113,52\text{ kJ/kg}$$

Então:

$$Q_{\text{adm}} - 140\text{ kJ} = (0,697\text{ kg})[1113,52 - 214,07]\text{ kJ/kg}$$

$$Q_{\text{adm}} = \mathbf{766,9\text{ kJ}}$$

O sinal positivo indica que o calor é transferido para o sistema.

3-9 ■ ENERGIA INTERNA, ENTALPIA E CALORES ESPECÍFICOS DE SÓLIDOS E DE LÍQUIDOS

Uma substância cujo volume específico (densidade) é constante denomina-se **substância incompressível**. Os volumes específicos de sólidos e líquidos permanecem essencialmente constantes durante um processo (Figura 3-86). Portanto, podem ser tratados como substâncias incompressíveis, sem detrimento da precisão. Deve supor-se o volume constante, de forma a implicar que a energia associada, como a variação do volume, é desprezada em comparação com outras formas de energia. De outra forma, esta suposição seria ridícula para o estudo de esforços térmicos em sólidos (causados pela variação do volume com a temperatura) ou a análise de termômetros de líquidos.

Pode ser mostrado matematicamente (Capítulo 11) que os calores específicos a volume constante e a pressão constante são idênticos para substâncias incompressíveis (Figura 3-87). Portanto, para sólidos e líquidos, não é necessário assinalar os índices de c_p e c_v , sendo ambos os calores específicos representados por um único símbolo c .

Ou seja,

$$c_p = c_v = c \quad (3-57)$$

Este resultado pode também ser deduzido da partir das definições físicas de calores específicos a volume constante e a pressão constante. Estes valores para diversos líquidos e sólidos mais comuns são apresentados na Tabela A-3.

Variações de energia interna

Tal como para os gases perfeitos, os calores específicos de substâncias incompressíveis dependem somente da temperatura. Assim, as derivadas parciais da equação que a define c_v (Equação 3-44) podem ser substituídas por derivadas ordinárias, sendo

$$du = c_v dT = c(T) dt \quad (3-58)$$

A variação de energia interna entre os estados 1 e 2 pode ser obtida por integração:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT \quad (\text{kJ/kg}) \quad (3-59)$$

A variação do calor específico c com a temperatura deve ser conhecida antes de se realizar a integração. Para pequenos intervalos de temperatura, o valor de c para uma temperatura média pode ser usado e tratado como constante, sendo

$$\Delta u \cong c_{\text{med}}(T_2 - T_1) \quad (3-60)$$

Energia interna, entalpia e calores específicos de sólidos e de líquidos

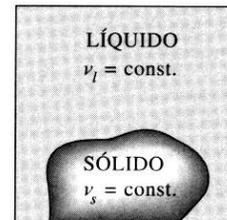


FIGURA 3-86

Durante um processo, os volumes específicos de substâncias incompressíveis permanecem constantes.

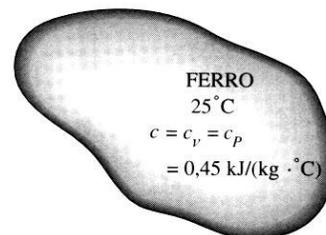


FIGURA 3-87

Os valores de c_v e c_p de substâncias incompressíveis são idênticos, sendo denotados por c .

Variações de entalpia

Usando a definição de entalpia, $h = u + Pv$, e notando que $v = \text{constante}$, a forma diferencial de variação da entalpia de uma substância incompressível pode ser determinada, por diferenciação, como

$$dh = du + v dP + P dv = du + v dP \quad (3-61)$$

Integrando:

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P \cong c_{\text{med}}\Delta T + v\Delta P \quad (\text{kJ}) \quad (3-62)$$

Para sólidos, o termo $v\Delta P$ é insignificante e, portanto, $\Delta h = \Delta u \cong c_{\text{med}}\Delta T$. Para líquidos, existem geralmente dois casos especiais:

1. *Processos a pressão constante*, tal como em aquecedores ($\Delta P = 0$):
 $\Delta h = \Delta u \cong c_{\text{med}} \Delta T$
2. *Processos a temperatura constante*, tal como em bombas ($\Delta T = 0$):
 $\Delta h = v\Delta P$

Para um processo entre os estados 1 e 2, a última equação pode ser expressa como $h_2 - h_1 = v(P_2 - P_1)$. Tomando o estado 2 como sendo de líquido comprimido, a dada T e P , e o estado 1 como sendo líquido saturado à mesma temperatura, a entalpia do líquido comprimido é dada por

$$h_{@P,T} \cong h_{f@T} + v_{f@T}(P - P_{\text{sat}}) \quad (3-63)$$

em que P_{sat} representa a pressão de saturação a uma dada temperatura. Isto é, supondo-se nomeadamente que a entalpia de líquido comprimido deve ser tomada como h_f à temperatura dada (ou seja, $h_{@P,T} = h_{f@T}$). Contudo, a contribuição do último termo é em geral muito pequena, sendo geralmente desprezada.

Exemplo 3-21 Arrefecimento de um bloco de ferro por água

Um bloco de ferro de 50 kg a 80° C é mergulhado num reservatório isolado contendo 0,5 m³ de água líquida a 25° C. Determine a temperatura quando se atinge o equilíbrio térmico.

Solução Toma-se o conteúdo do reservatório, água + bloco de ferro, como sistema (Figura 3-88). É um sistema fechado, visto que não existe troca de massa na fronteira durante o processo. Observa-se que o volume de um reservatório rígido é constante, não existindo portanto trabalho de fronteira.

Pressupostos 1 Tanto a água como o bloco de ferro são substâncias incompressíveis. 2 Os calores específicos constantes a temperatura ambiente podem ser usados para a água e o ferro. 3 O sistema é estacionário e, portanto, as variações da energia cinética e da energia potencial são nulas, $\Delta E_c = \Delta E_p = 0$ e $\Delta E = \Delta U$. 4 Não existe trabalho eléctrico, de veio ou de qualquer outra forma. 5 O sistema é bem isolado, não existindo, portanto, trocas de calor.

Análise O balanço de energia do sistema pode ser expresso como

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$0 = \Delta U$$

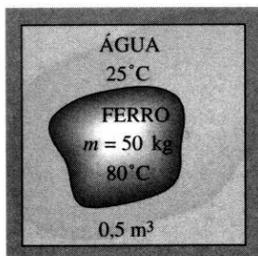


FIGURA 3-88
Esquema para o Exemplo 3-21.

A energia interna total, U , é uma propriedade extensiva e portanto pode ser expressa como a soma das energias internas parciais do sistema. Então, a variação de energia interna do sistema é

$$\Delta U_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{ferro}} + \Delta U_{\text{água}} = 0$$

$$[mc(T_2 - T_1)]_{\text{ferro}} + [mc(T_2 - T_1)]_{\text{água}} = 0$$

O volume específico de água líquida à temperatura ambiente pode ser considerado $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$. Então, a massa da água é dada por

$$m_{\text{água}} = \frac{V}{v} = \frac{0,5 \text{ m}^3}{0,001 \text{ m}^3/\text{kg}} = 500 \text{ kg}$$

Os calores específicos do ferro e da água líquida são determinados através da Tabela A-3 sendo $c_{\text{ferro}} = 0,45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ e $c_{\text{água}} = 4,184 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$. Substituindo estes valores na equação da energia, obtém-se

$$(50 \text{ kg})[0,45 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](T_2 - 80^\circ \text{C}) + (500 \text{ kg})[4,184 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](T_2 - 25^\circ \text{C}) = 0$$

$$T_2 = 25,6^\circ \text{C}$$

Quando se atingir o equilíbrio térmico, a temperatura da água e do ferro será de $25,6^\circ \text{C}$. O pequeno aumento da temperatura da água é devido ao elevado calor específico e à sua considerável massa.

Exemplo 3-22 Entalpia de líquido comprimido

Determine a entalpia da água líquida a 100°C e 15 MPa (a) usando as tabelas de líquido comprimido, (b) tratando-a como líquido saturado e (c) usando a correcção dada pela Equação 3-63.

Solução A 100°C , a pressão de saturação da água é de $101,35 \text{ kPa}$ e como, $P > P_{\text{sat}}$, a água existe como líquido comprimido no estado especificado.

Análise (a) Das tabelas de líquido comprimido, retira-se

$$\left. \begin{array}{l} P = 15 \text{ MPa} \\ T = 100^\circ \text{C} \end{array} \right\} h = 430,28 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-7})$$

Sendo este o valor exacto.

(b) Tratando o líquido comprimido como líquido saturado a 100°C , obtém-se

$$h \cong h_{f@100^\circ \text{C}} = 419,04 \text{ kJ/kg}$$

Este valor apresenta um erro de cerca de $2,6\%$.

(c) Da Equação 3-63,

$$h_{@P,T} = h_{f@T} + v_f(P - P_{\text{sat}})$$

$$= (419,04 \text{ kJ/kg}) + (0,001 \text{ m}^3/\text{kg})[(15000 - 101,35)\text{kPa}] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right)$$

$$= 434,60 \text{ kJ/kg}$$

O termo de correcção reduziu o erro de $2,6$ para cerca de 1% . Mas este melhoramento da precisão por vezes não compensa o esforço envolvido.

Exemplo 3-23 Aumento da temperatura devido a um estalo

Se alguma vez deu ou recebeu um estalo, provavelmente lembra-se de uma sensação de queimadura na sua mão ou face. Imagine que teve o infortúnio de apanhar um estalo de uma pessoa zangada causando um aumento da temperatura na zona afectada de $1,8^\circ\text{C}$. Admitindo que a mão causadora do estalo tinha uma massa de $1,2\text{ kg}$ e que cerca de $0,150\text{ kg}$ de tecido da face e da mão foram afectados pelo incidente, estime a velocidade da mão antes do impacte. Considere o calor específico da pele como $3,8\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$.

Solução Este problema será analisado de uma forma profissional sem qualquer tipo de emoções. Em primeiro lugar identifica-se o sistema, desenhando um esboço deste, estabelecendo as observações do problema e efectuando os pressupostos apropriados.

Toma-se a mão e a região afectada da face como o *sistema* (Figura 3-89). Este é um *sistema fechado*, visto que envolve uma quantidade fixa de massa (não existe transferência de massa). Observa-se que a energia cinética da mão decresce durante o processo, o que é evidenciado pelo decréscimo da velocidade até parar na cara. A energia interna da zona afectada aumenta, o que é evidenciado pelo aumento de temperatura. Não aparenta existir transferência significativa de energia entre o sistema e a vizinhança durante este processo.

Pressupostos 1 A mão pára no fim do impacte. 2 A face recebe o impacte sem movimento significativo. 3 Não existe transferência de calor da zona afectada da face para a vizinhança, sendo portanto um processo adiabático. 4 Não é realizado qualquer trabalho de/ou para o sistema. 5 A variação de energia potencial é nula, $\Delta E_p = 0$ e $\Delta E = \Delta U + \Delta E_c$.

Análise Com base nos pressupostos e observações efectuadas, o balanço de energia do sistema pode ser expresso por

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$0 = \Delta U_{\text{zona afectada}} + \Delta E_{c\text{ mão}}$$

$$0 = (mc\Delta T)_{\text{zona afectada}} + [m(0 - V^2) / 2]_{\text{mão}}$$

Ou seja, o decréscimo da energia cinética da mão tem de ser igual ao aumento da energia interna da zona afectada. Resolvendo para a velocidade e substituindo os valores dados, a velocidade de impacte é de

$$V_{\text{mão}} = \sqrt{\frac{2(mc\Delta T)_{\text{zona afectada}}}{m_{\text{mão}}}} = \sqrt{\frac{2(0,15\text{ kg})[3,8\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})(1,8^\circ\text{C})]}{1,2\text{ kg}}} \frac{1000\text{ m}^2/\text{s}^2}{1\text{ kJ/kg}}$$

$$= 41,3\text{ m/s (ou 149 km/h)}$$

**FIGURA 3-89**

Esquema para o Exemplo 3-23.

3-10 ■ REFRIGERAÇÃO E CONGELAMENTO DE ALIMENTOS

Refrigeração e congelamento de alimentos

A refrigeração e o congelamento de produtos alimentares perecíveis é uma aplicação importante da termodinâmica. Existem muitas considerações acerca deste processo. Por exemplo, frutos e legumes continuam a *respirar* e a *gerar calor* durante o armazenamento; a maioria dos alimentos congela numa *variada gama de temperaturas* em vez de numa única; a qualidade dos alimentos congelados é muito afectada pela *taxa de congelamento*; a *velocidade* do ar de arrefecimento afecta a taxa de perda de humidade dos produtos e a taxa de transferência de calor; etc.

Organismos como as *bactérias*, as *leveduras*, os *bolores* e os *vírus* são vulgarmente encontrados no ar, na água, na terra, nos organismos vivos e em alimentos não processados, causando *maus sabores e odores*, *produção de lamas*, *variações na textura e aparência* e eventual *apodrecimento*. A manutenção de alimentos perecíveis a temperaturas amenas é a causa primária do apodrecimento e a prevenção deste facto e a degradação prematura da qualidade devido aos microrganismos é a maior aplicação na área da refrigeração.

Os microrganismos propagam-se a temperaturas amenas geralmente entre 20 e 60° C. A taxa de crescimento *diminui* com a subida da temperatura, podendo ocorrer a morte da maior parte destes microrganismos a partir de um certo valor, geralmente acima de 70° C. O *arrefecimento* é uma forma prática efectiva de reduzir a taxa de crescimento de microrganismos estendendo o *tempo de armazenamento* de alimentos perecíveis. Temperaturas inferiores a 4° C são consideradas temperaturas correctas de refrigeração. Por vezes, um pequeno aumento desta pode causar um acréscimo da taxa de crescimento, diminuindo consideravelmente o tempo de armazenamento (Figura 3-90).

O *tempo de armazenamento* de alimentos frescos tais como carnes, peixe, vegetais e fruta pode ser estendido por diversos dias através do armazenamento a temperaturas ligeiramente acima do congelamento, geralmente entre 1 e 4° C. O tempo de armazenamento pode ser estendido para diversos meses pelo congelamento e armazenamento temperaturas geralmente entre -18 e -35° C, dependendo do tipo de alimento.

A refrigeração *atrasa* os processos químicos e biológicos dos alimentos reduzindo a deterioração e a diminuição da qualidade dos nutrientes. O milho, por exemplo, pode perder metade do seu conteúdo inicial de açúcar num dia a 21° C mas apenas 5% se estiver a 0° C. Espargos frescos podem perder 50% do seu conteúdo de vitamina C num dia a 20° C ou em 12 dias a 0° C. Através de refrigeração, o surgimento de manchas amarelas nos bróculos, por exemplo, pode ser atrasada por três ou mais dias.

As primeiras tentativas de congelar alimentos resultaram em produtos de baixa qualidade devido à formação de cristais de gelo. Até que se descobriu que a *taxa de congelamento* tinha um efeito primordial no tamanho dos cristais de gelo e na qualidade, textura em propriedades nutricionais de diversos alimentos. Durante o *congelamento lento*, os cristais de gelo podem crescer, enquanto durante o *congelamento rápido* um grande número de cristais começa a formar-se

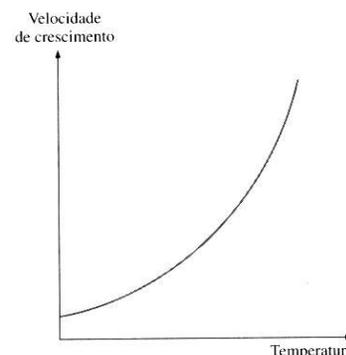


FIGURA 3-90

O crescimento de microrganismos num alimento aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura ambiente.

CAPÍTULO 3

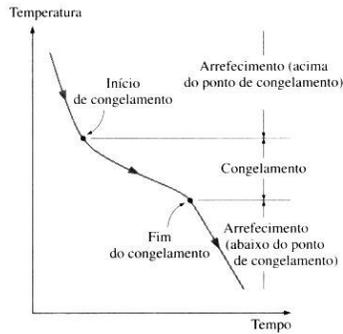
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-91

Curva típica de congelamento de um alimento.

TABELA 3-3

Alguns vegetais susceptíveis de sofrerem danos por arrefecimento e a temperatura aconselhável de armazenamento

(ASHRAE Handbook of Refrigeration, Ref. 2, Cap. 17, Tabela 3)

Vegetal	Temperatura aconselhável de armazenamento °C
Abóbora branca	10
Abóbora	10
Batata doce	13
Batata	3-4
Beringela	7
Melancia	4
Melão	7-10
Pepino	10
Pimento	7
Quiabo	7
Tomate maduro	7-10
Tomate verde	13

de uma só vez originando cristais muito mais pequenos. Cristais grandes não são desejáveis, visto poderem romper as paredes das células, causando a degradação da textura e a perda dos sucos naturais durante a dilatação. Durante o congelamento rápido, forma-se uma *crosta* na camada exterior do produto que minimiza a *desidratação* retendo os sucos, aromas e agentes de sabor. A qualidade do produto é também adversamente afectada por variações de temperatura no recinto de armazenamento.

A refrigeração vulgar de alimentos envolve o *arrefecimento* sem variação de fase. O *congelamento* de alimentos, por sua vez, envolve três estágios: *arrefecimento* até ao ponto de congelamento (retirando o calor sensível), *congelamento* (retirando o calor latente) e o *posterior arrefecimento* até à temperatura desejada (retirando o calor sensível do alimento congelado) (Figura 3-91).

Os frutos e os legumes frescos são como *produtos «vivos»*, continuando progressivamente a libertar calor, aumentando a carga térmica do recinto de armazenagem. O tempo de armazenamento de frutos e de legumes pode ser estendido através do seu arrefecimento, logo após colheita. A temperatura mais indicada para o armazenamento destes produtos é de 0,5 a 1° C acima do ponto de congelamento, com excepção de certos frutos e legumes tais como bananas ou pepinos, que sofrem *alterações fisiológicas* indesejáveis quando expostos a temperaturas baixas. Os danos resultantes chamam-se **danos por arrefecimento**, sendo caracterizados pela descoloração interna, marcas na casca, perda de textura e o não amadurecimento. A severidade destes danos depende tanto da temperatura como do tempo de armazenagem. Quanto mais baixa for a temperatura, maior serão os danos. Portanto, produtos susceptíveis devem ser armazenados a temperaturas superiores. Uma lista de vegetais susceptível de sofrer este tipo de danos e a temperatura indicada são apresentados na Tabela 3-3.

Os danos por arrefecimento diferem dos **danos por congelamento** causados pela exposição prolongada de frutos e legumes a temperaturas abaixo do congelamento, provocando danos. Os pontos de congelamento dos vários frutos e legumes são bastante próximos, mas a susceptibilidade de danos por frio difere grandemente. Alguns vegetais são congelados e descongelados diversas vezes sem danos significativos, enquanto que outros, tais como tomates, sofrem danos severos, sendo arruinados após um processo de congelamento. Produtos colocados próximo das serpentinas ou nas zonas inferiores de um frigorífico são mais susceptíveis de sofrer estes danos. De forma evitar isto, os vagões ou caixas de carga de camiões devem ser *aquecidos* durante o transporte em tempo gelado e deve-se providenciar a circulação de ar adequada nos recintos de armazenagem. Ocorrem danos se o *descongelamento* for muito rápido, recomendando-se um descongelamento a 4° C.

A **desidratação** ou *perda de humidade* provoca um encolhimento do produto e perda de qualidade. Portanto, devem-se tomar medidas apropriadas durante o armazenamento de alimentos, de modo a minimizar a perda de humidade que também representa uma perda directa de peso. Um fruto ou vegetal que perca 5% de humidade, por exemplo, irá pesar menos 5%, sendo vendido a um preço inferior, também devido à perda de qualidade. A perda de humidade pode

ser minimizada: (1) mantendo a menor possível *temperatura de armazenamento* do alimento, (2) mantendo a *humidade relativa* do recinto a mais alta possível e (3) evitando *correntes de ar* no recinto de armazenamento.

Propriedades térmicas de alimentos

A refrigeração de alimentos oferece um desafio para os engenheiros, visto que estrutura, composição e propriedades térmicas e físicas variam consideravelmente. Além disso, as propriedades também variam com o *tempo* e a *temperatura*. Os frutos e os vegetais são um problema adicional, visto que *geram calor* durante o armazenamento, à medida que consomem oxigénio e libertam dióxido de carbono e vapor de água.

As propriedades térmicas dos alimentos são baseadas no seu *conteúdo de água*. De facto, os calores específico e latente dos alimentos são calculados com uma precisão razoável baseando-se apenas no seu conteúdo de água. Estes são expressos através da **fórmula de Siebel**:

$$c_{P,\text{fresco}} = 3,35a + 0,84 \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})] \quad (3-64)$$

$$c_{P,\text{cong}} = 1,26a + 0,84 \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})] \quad (3-65)$$

em que $c_{P,\text{fresco}}$ e $c_{P,\text{cong}}$ representam os calores específicos dos alimentos antes e depois do congelamento, respectivamente; a é a fracção de água que alimento contém ($a = 0,65$ se o conteúdo de água é de 65%); e a constante $0,84 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ representa o calor específico da porção sólida (excluindo a água) do alimento. Por exemplo, os calores específicos de *frango fresco* e congelado, cujo conteúdo de água é de 74%, são

$$c_{P,\text{fresco}} = 3,35a + 0,84 = 3,35 \times 0,74 + 0,84 = 3,32 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{P,\text{cong}} = 1,26a + 0,84 = 1,26 \times 0,74 + 0,84 = 1,77 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

A fórmula de Siebel é baseada nos calores específicos da *água* e do *gelo* a 0°C de 4,19 e 2,10 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ respectivamente. Portanto, as fórmulas de Siebel originam valores para 0°C . Porém, podem ser usadas para uma gama maior de temperaturas com precisão razoável.

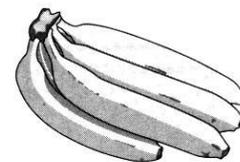
O *calor latente* de um produto alimentar durante o congelamento ou descongelamento (calor de fusão) também depende do conteúdo da água sendo determinado por

$$h_{\text{latente}} = 334a \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (3-66)$$

em que a representa novamente a fracção do conteúdo de água, e $334 \text{ kJ}/\text{kg}$ equivale ao *calor latente da água* durante o congelamento a 0°C à pressão atmosférica (Figura 3-92). Por exemplo, o calor latente do frango, cujo conteúdo de água é de 74%, é de

$$h_{\text{latente,frango}} = 334a = 334 \times 0,74 = 247 \text{ kJ}/\text{kg}$$

Alimentos perecíveis têm um elevado conteúdo de água que se transforma em gelo durante o congelamento. Portanto espera-se que estes alimentos congelem a 0°C , que representa o ponto de congelamento da água pura à pressão



Bananas
Conteúdo de água = 75%
Ponto de congelamento = $-0,8^\circ\text{C}$

$$c_{P,\text{fresco}} = 3,35 \times 0,75 + 0,84 = 3,35 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{P,\text{cong}} = 1,26 \times 0,75 + 0,84 = 1,79 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$h_{\text{latente}} = 334 \times 0,75 = 251 \text{ kJ}/\text{kg}$$

FIGURA 3-92

Os calores específico e latente de alimentos dependem somente do conteúdo de água.

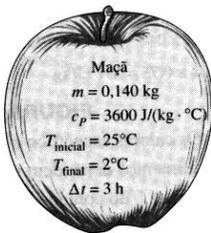
CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

TABELA 3-4

Descida do valor do ponto de congelamento de gelado vulgar cuja composição é de 12,5% de gordura de leite, 10,5% de soro sólido, 15% de açúcar, 0,3% de estabilizante e 61,7% de água. (ASHRAE Handbook of Refrigeration, Ref. 2, Cap. 14, Tabela 9)

Percentagem de água (antes de congelar)	Ponto de congelamento da fracção líquida
0	-2,47° C
10	-2,75° C
20	-3,11° C
30	-3,50° C
40	-4,22° C
50	-5,21° C
60	-6,78° C
70	-9,45° C
80	-14,92° C
90	-30,36° C
100	-55,0° C



$$\begin{aligned} \dot{Q} &= mc_p(T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}) / \Delta t \\ &= (0,14 \text{ kg})(3600 \text{ J/(kg} \cdot \text{°C)})(23\text{°C}) / (3 \times 3600 \text{ s}) \\ &= 1,07 \text{ W (por maçã)} \end{aligned}$$

FIGURA 3-93

Carga de refrigeração de uma unidade de processamento de maçãs, que as arrefece de 25° C até 2° C em 3 h.

atmosférica. Mas a água nos alimentos está longe de ser pura e, portanto, a temperatura irá ser algo inferior a 0° C, dependendo da composição particular do alimento. Em geral, os produtos alimentares congelam numa *gama de temperaturas* e não numa só, visto que a composição da porção líquida varia (tornando-se mais concentrada no açúcar), e o seu ponto de congelamento desce à medida que alguma água congela (Tabela 3-4). Portanto, fala-se vulgarmente de *temperatura de congelamento média*, ou, para alimentos como a alface que são deteriorados pelo frio, de *temperatura a que se inicia o congelamento*. A temperatura de congelamento para a maior parte dos alimentos encontra-se entre -0,3 a -2,8° C. Na ausência de valores exactos, este valor pode ser assumido como -2,0° C para alimentos e -1° C para vegetais e frutos. A temperatura de congelamento e os calores específicos e latentes de alimentos comuns são fornecidos na Tabela A-3. A *temperatura de congelamento* na tabela representa a temperatura a que se inicia o congelamento de frutos e vegetais e a temperatura média de outros alimentos. O *teor de água* apresentado refere-se a alimentos maduros, podendo apresentar algumas variações. Os valores de calor específico e latente dados são válidos apenas para o *teor de água listado*, podendo ser reavaliados facilmente através das fórmulas apresentadas acima, dependendo do conteúdo de água.

Refrigeração de frutos e vegetais

Os frutos e os vegetais são frequentemente *arrefecidos* para a conservação da sua frescura e sabor, estendendo o tempo de armazenamento. O arrefecimento em campo, antes de o produto ser transportado para o mercado denomina-se **pré-arrefecimento**. Os requisitos para este processo variam grandemente, tal como os seus métodos. Produtos altamente perecíveis, tais como os brócolos, tomates maduros, cenouras, alperces, morangos, pêras e ameixas deverão ser arrefecidos o mais rapidamente possível após a colheita. Este processo não é necessário ou tão importante para o caso de batatas, abóboras, tomates verdes e maçãs.

Os frutos e os vegetais são compostos essencialmente por água, sendo as propriedades semelhantes às da água. Inicialmente, todo o calor removido do produto provém do seu exterior, causando um gradiente de temperatura no seu seio durante o arrefecimento rápido. Mas a *temperatura média mássica*, para efeitos de simplificação de cálculos, é equivalente à temperatura média do produto num dado instante.

O calor removido dos produtos representa a quase totalidade da carga térmica imposta no sistema de refrigeração, sendo determinada por

$$\dot{Q}_{\text{prod}} = mc_p(T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}}) / \Delta t \quad (\text{W}) \quad (3-67)$$

em que \dot{Q}_{prod} representa a *taxa média de remoção de calor*; m a massa total; c_p o calor específico médio; T_{inicial} e T_{final} as temperaturas médias mássicas dos produtos antes e depois de serem arrefecidos; Δt representa o tempo decorrido no arrefecimento (Figura 3-93). O calor da respiração é desprezado quando o tempo de arrefecimento é inferior a algumas horas.

Frutos e legumes frescos são *produtos vivos*, continuando a *respirar* durante dias e até semanas após a colheita. Durante a respiração, o açúcar, tal como a

glicose combina-se com o O_2 produzindo CO_2 e H_2O . O **calor da respiração** é libertado durante a reacção exotérmica, que se adiciona à carga térmica durante o seu arrefecimento. A taxa de respiração varia consideravelmente com a temperatura. Por exemplo, o calor médio de respiração do morango a 0, 10 e 20° C é de 44, 213 e 442 mW/kg, respectivamente. O calor da respiração varia de produto para produto. Por exemplo, a 20° C é de 34 mW/kg para batatas, 77 mW/kg para maçãs, 167 mW/kg para repolho e 913 mW/kg para brócolos. O calor de respiração da maior parte dos vegetais diminui com o tempo. O oposto verifica-se para o caso de frutos que amadurecem durante o armazenamento, tais como maçãs e pêssegos. Para as ameixas, o calor de respiração aumenta de 12 mW/kg até 21 mW/kg após 6 dias e 27 mW/kg após 18 dias quando armazenados a 5° C. Se o produto estiver infectado com fungos e bolores, a taxa de respiração também aumenta.

O valor do calor de respiração de alguns frutos e vegetais é fornecido na Tabela 3-5. Deve-se utilizar a *taxa inicial* de respiração quando se efectuam os cálculos de carga térmica de arrefecimento para os primeiros dias, e os *valores de equilíbrio a longo prazo* quando os cálculos se efectuam para longos tempos de armazenamento. A *carga térmica* devida à *respiração* é determinada por

$$\dot{Q}_{\text{respiração}} = \sum m_i \dot{q}_{\text{respiração}, i} \quad (\text{W}) \quad (3-68)$$

que representa o produto das massas pelos calores de respiração para todos os produtos alimentares armazenados em recinto refrigerado. Os frutos e legumes frescos com taxas de respiração elevadas são os mais perecíveis, sendo o arrefecimento o processo mais eficaz para evitar as elevadas taxas de respiração e o consequente apodrecimento.

Exemplo 3-24 Arrefecimento de bananas num recinto refrigerado

Um recinto contém 18 *paletes* de bananas, contendo cada uma 24 caixas, num total armazenado de 432 caixas. Cada caixa contém cerca de 19 kg de bananas e é constituída por 2,3 kg de cartão prensado. O calor específico da banana e o do cartão prensado são de 3,55 e 1,7 kJ/(kg · °C), respectivamente. O valor máximo do calor de respiração da banana é de 0,3 W/kg. As bananas são arrefecidas à taxa de 0,2° C/h. Desprezando qualquer ganho de calor através das paredes, determine a taxa de calor removido do recinto.

Solução Toma-se o interior do recinto de armazenamento como *sistema* (Figura 3-94). Este é um *sistema fechado*, visto que não existe troca de massa na fronteira. Observa-se que o calor de respiração pode ser tratado como uma introdução de energia para o sistema.

Pressupostos **1** Não existem ganhos de calor através das paredes ou outras superfícies. **2** A variação da energia do ar contido é desprezável. **3** As propriedades térmicas do ar, das bananas e das caixas são consideradas constantes. **4** O sistema é estacionário e envolve apenas variações de energia interna (devido à variação de temperatura) e, portanto, $\Delta E = \Delta U$. **5** Não existe qualquer tipo de trabalho envolvido.

TABELA 3-5
Calores de respiração de alguns
frutos e legumes frescos
a diferentes temperaturas
(ASHRAE *Handbook of Refrigeration*,
Ref. 1, Cap. 30, Tabela 2)*

Produto	Calor de respiração, mW/kg	
	5° C	20° C
Alface	39-87	169-298
Ameixa	12-27	53-77
Batata	11-35	13-92
Bróculo	102-475	825-1011
Cebola	10-20	50
Cenoura	20-58	64-117
Cereja	28-42	83-95
Cogumelo	211	782-939
Couve	22-87	121-437
Maçã	13-36	44-167
Melancia	*	51-74
Morango	48-98	303-581
Pêssego	19-27	176-304
Tomate	*	71-120

* Um asterisco representa danos por congelamento.

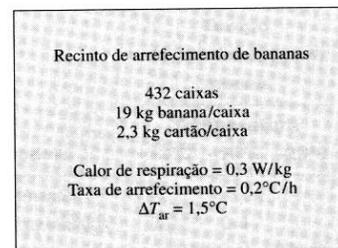


FIGURA 3-94

Esquema para o Exemplo 3-24.

Análise Com base nas suposições e observações, o balanço de energia sob a forma de taxa é dado por

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$\dot{E}_{\text{respiração}} - \dot{Q}_{\text{sai}} = \Delta \dot{U}_{\text{banana}} + \Delta \dot{U}_{\text{caixa}}$$

Note-se que o recinto contém 432 caixas, sendo a massa total de bananas e das caixas determinada:

$$m_{\text{banana}} = (\text{massa por caixa})(\text{número de caixas}) = (19 \text{ kg/caixa})(432 \text{ caixas}) = 8208 \text{ kg}$$

$$m_{\text{caixa}} = (\text{massa por caixa})(\text{número de caixas}) = (2,3 \text{ kg/caixa})(432 \text{ caixas}) = 993,6 \text{ kg}$$

Então:

$$\dot{Q}_{\text{respiração}} = m_{\text{banana}} \dot{q}_{\text{respiração}} = (8208 \text{ kg})(0,3 \text{ W/kg}) = 2462 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{banana}} &= (mc\Delta T/\Delta t)_{\text{banana}} = (8208 \text{ kg})[3,55 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](-0,2^\circ \text{ C/h}) \\ &= -5828 \text{ kJ/h} = -1619 \text{ W} \quad (1 \text{ W} = 3,6 \text{ kJ/h}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_{\text{caixa}} &= (mc\Delta T/\Delta t)_{\text{caixa}} = (993,6 \text{ kg})[1,7 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](-0,2^\circ \text{ C/h}) = -338 \text{ kJ/h} \\ &= -94 \text{ W} \quad (1 \text{ W} = 3,6 \text{ kJ/h}) \end{aligned}$$

dado que o valor $\Delta T/\Delta t$ é a taxa de variação da temperatura dos produtos sendo $-0,2^\circ \text{ C/h}$ (queda de temperatura). Substituindo:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{E}_{\text{respiração}} - \Delta \dot{E}_{\text{banana}} - \Delta \dot{E}_{\text{caixa}} = 2462 + 1619 + 94 = 4175 \text{ W}$$

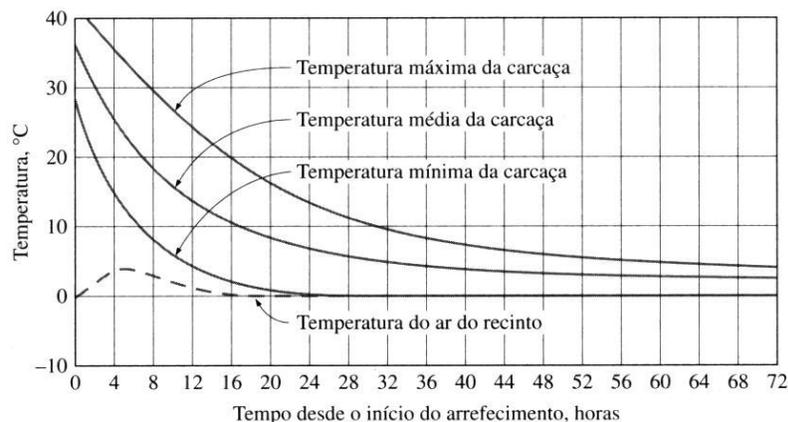
Portanto, o sistema de refrigeração tem de remover calor a uma taxa de 4175 W do recinto para alcançar a taxa de arrefecimento desejada.

Refrigeração de carnes

As carcaças de carne devem ser arrefecidas *o mais rapidamente possível* nos matadouros, a uma temperatura uniforme de cerca de $1,7^\circ \text{ C}$, de forma a reduzir a taxa de crescimento de microrganismos que possam estar presentes na superfície, reduzindo assim o apodrecimento. Os níveis correctos de *temperatura, humidade e circulação de ar* devem ser seleccionados para evitar o excessivo encolhimento, endurecimento e descoloração.

A temperatura interior do animal é de cerca 39° C , tendendo a aumentar em 2° C após a morte como resultado do *calor gerado* durante a reacções biológicas que ocorrem nas células. A temperatura das superfícies expostas tende a diminuir devido a perdas de calor. As zonas mais espessas da carcaça são as últimas a arrefecer, devendo, portanto, o controlo ser efectuado nestas através da inserção de um termómetro.

Cerca de 70% de uma carcaça de bovino é composta por água, e o *arrefecimento* é principalmente *evaporativo* devido à migração da água em direcção à superfície, traduzindo-se numa perda de massa de cerca de 2%, de um dia para outro. Para evitar esta perda, as carcaças são geralmente lavadas ou borrifadas

**FIGURA 3-95**

Curva de arrefecimento típica para carcaças de bovinos no recinto de arrefecimento ou armazenamento à temperatura média de 0° C (ASHRAE *Handbook of Refrigeration*, ref. 2, Cap. 11, Fig. 2).

com água antes do seu arrefecimento. Com os cuidados adequados, este processo pode eliminar o encolhimento quase totalmente devido ao arrefecimento.

A massa média total de um bovino é de cerca de 300 kg, sendo o calor específico da carcaça de cerca de 3,14 kJ/(kg · °C) (Tabela 3-6). O *recinto de arrefecimento* deve ter uma capacidade idêntica à capacidade diária de processamento do matadouro. Uma carcaça é lavada antes de entrar no recinto de arrefecimento, absorvendo através da superfície uma grande quantidade de água (3,6 kg), não representando um ganho de massa, visto que existem perdas pelo escorrimento ou evaporação durante o arrefecimento. Idealmente, as carcaças não ganham nem perdem qualquer peso quando são arrefecidas no recinto de refrigeração. Contudo existe uma perda de 0,5% da massa total na câmara de espera, à medida que arrefece. A perda real do produto é determinada através da pesagem da carcaça antes da lavagem e após o arrefecimento.

A variação de temperatura de uma carcaça de bovino durante o arrefecimento é dada na Figura 3-95. Note que a temperatura média é reduzida em cerca de 28° C (de 36 para 8° C) em 20 h. A taxa de arrefecimento pode ser aumentada pela *diminuição* da temperatura do ar e pelo aumento da sua velocidade, mas ambas as medidas acarretam também o risco de *congelamento superficial*.

Embora o ponto de congelamento médio de carne magra possa ser tomado como -2° C com um calor latente de 249 kJ/kg deve-se notar que o congelamento ocorre num *gama de temperatura* efectuando-se principalmente entre -1 e -4° C. Portanto, o arrefecimento da carne ao longo desta gama de temperaturas e a remoção de calor latente é o que consome mais tempo durante o congelamento.

A carne deve ser mantida a uma temperatura interna de -2 a -1° C para consumo local e armazenamento *durante uma semana*, devendo ser congelada e mantida a uma temperatura muito inferior para *armazenamento de longo prazo*. Quanto menor for esta temperatura, maior será o tempo de armazenamento, como ilustra a Tabela 3-7.

A *temperatura interna* das carcaças que entram nas secções de arrefecimento varia de 38 a 41° C, para suínos, e de 37 a 39° C, para borregos e vitelos. São necessárias cerca de 15 h para arrefecer estas carcaças até ao valor recomendado de 3 a 4° C. O recinto de arrefecimento é mantido entre -1 e 0° C,

TABELA 3-6
Propriedades térmicas
da carne de bovino

Propriedade	Valor típico
Massa volúmica média	1070 kg/m ³
Calor específico	
acima do ponto	
de congelamento	3,14 kJ/(kg·°C)
abaixo do ponto	
de congelamento	1,70 kJ/(kg·°C)
Ponto de congelamento	-2,7° C
Calor latente de fusão	3,14 kJ/kg
Conductividade térmica	0,41 W/(m·°C) (a 6° C)

TABELA 3-7
Tempo de armazenamento
de produtos de carne
a diversas temperaturas
(ASHRAE *Handbook of Refrigeration*,
Ref. 2, Cap. 10, Tabela 7)

Produto	Tempo de armazenagem, meses		
	Temperatura		
	-12°C	-18°C	-23°C
Alimentos			
cozinhados	2-3	2-4	
Borrego	3-8	6-16	12-18
Bovino	4-12	6-18	12-24
Carne picada			
de bovino	3-4	4-6	8
Novilho	3-4	4-14	8
Porco	2-6	4-12	8-15

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

e a diferença de temperatura entre o fluido refrigerante e o ar é mantida a cerca de 6° C. As *carcaças de borrego* são arrefecidas a uma temperatura interna de 1 a 2° C durante 12 a 14 h e mantidas a 85 a 90% de humidade relativa até serem embarcadas ou processadas.

Aparentemente, o *congelamento* não afecta muito o *sabor* da carne, mas faz variar a sua qualidade de diversas formas. A *taxa* e a *temperatura* de congelamento podem influenciar a cor e a maciez e causar perda de sucos. O congelamento rápido aumenta a maciez e reduz os danos nos tecidos e a perda de sucos durante o descongelamento. O armazenamento a temperaturas muito baixas provoca variações significativas na *gordura animal*. A carne de porco congelada evidencia variações indesejáveis devido ao seu tipo de gordura, sendo o período de armazenamento inferior ao do bovino ou do borrego.

Produtos de aviário

Os produtos de aviário podem ser preservados por *arrefecimento gelado* a 1 a 2° C, por *arrefecimento profundo* a cerca de -2° C, para armazenamento a curto prazo, ou por *congelamento* até -18° C ou temperatura inferior, para armazenamento a longo prazo. As linhas de processamento de aviários são completamente *automatizadas*.

As aves são inicialmente electrocutadas antes de serem trinchadas de forma a que o processo seja mais humano (!). A seguir a um período de sangramento de 90 a 120 s, as aves são *escaldadas* através da imersão num tanque de água quente, geralmente entre 51 a 55° C, durante 120 s, de modo a amolecer as penas. Estas são retiradas com máquinas e as carcaças evisceradas são lavadas cuidadosamente antes do arrefecimento. A temperatura interna varia entre 24 e 35° C após a lavagem, dependendo da temperatura ambiente e da água.

De forma a controlar o crescimento de micróbios, os regulamentos USDA² requerem um arrefecimento a 4° C ou menos, num período inferior a 4 h para carcaças com menos de 1,8 kg, menos de 6 h para carcaças de 1,8 a 3,6 kg e menos de 8 h para superiores a 3,6 kg. Hoje em dia, o preenchimento destes requisitos não é difícil, visto que o *arrefecimento por ar frio* foi substituído pela *imersão rápida em tanques de gelo*. Este último processo *apresenta* o benefício adicional de não só evitar a desidratação mas provocar uma *absorção de água* que aumenta a massa vendável do produto. O arrefecimento por ar frio de carcaças sem embalagem pode causar uma perda de humidade de 1 a 2%, enquanto o processo de imersão permite uma absorção de 4 a 15% (Figura 3-96). O borrifio com água gelada permite a absorção de humidade até 4%, sendo a água retida entre a carne e a pele. No processo de imersão, alguns sólidos solúveis são perdidos para a água sem prejuízo do paladar.

Muitos tanques de arrefecimento são hoje em dia substituídos por tanques de imersão *contínua*. Estes reduzem a temperatura interna da carcaça de 32 para 4° C em cerca de 30 min à taxa de 10 000 aves por hora. As necessidades de gelo dependem das temperaturas da entrada e da saída das carcaças e da água, sendo o valor aceitável de 0,25 kg por quilograma de carcaça. Contudo, a *contaminação por bactérias*, tal como a salmonela, é um problema deste método, sendo necessária a adição de cloro à água para controlar a contaminação.

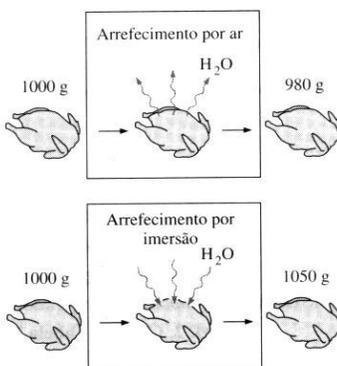


FIGURA 3-96

O arrefecimento de aves por ar causa desidratação e, portanto, perda de peso, enquanto que o arrefecimento por imersão provoca ganho de peso devido à absorção de água.

² Organismo federal americano «United States Department of Agriculture».

A *maciez* é uma característica importante tanto para as carnes de aves como para as carnes vermelhas, e a conservação desta é um factor importante a ter em conta no arrefecimento e congelação destes produtos. Aves cozinhadas ou congeladas antes de passar pela fase de *rigor mortis* permanecem muito rígidas. O amaciamento natural inicia-se logo após a morte e é completado no espaço de 24 h quando as carcaças são mantidas a 4° C. O amaciamento é muito rápido durante as 3 primeiras horas diminuindo após este tempo. A imersão em água quente e o corte através de músculos afectam adversamente este processo. O aumento da temperatura ou tempo de *escaldamento* implica uma menor maciez, tal como a acção das máquinas depenadoras. O trincar da carcaça antes do fim do amaciamento diminui consideravelmente a textura. Portanto, recomenda-se que qualquer corte seja efectuado após o amaciamento. O processo de *arrefecimento rápido* de aves pode também ter um efeito adverso. Descobriu-se que o amaciamento pode ser acelerado consideravelmente através de um processo de *electrocução* patenteado.

Os produtos de aviário são *altamente perecíveis*, devendo ser mantidos à menor temperatura possível para maximizar o tempo de armazenamento. Estudos efectuados mostram que as populações de certas bactérias duplicam em cada 36 h a -2° C, em cada 14 h a 0° C, em cada 7 h a 5° C e em menos de 1 h a 25° C (Figura 3-97). A contagem total de bactérias em aves mantidas a 2° C durante 14 dias é equivalente às mantidas a 10° C durante cinco dias ou 24° C durante 1 dia. Também foi descoberto que manter as aves a -1° C aumenta a duração de armazenamento em 8 dias, comparativamente às mantidas a 4° C.

O crescimento de microrganismos nas *superfícies* das aves causam o desenvolvimento de *odores* e de *substâncias viscosas*. Portanto, a observação de procedimentos de higiene com a lavagem de instrumentos e das carcaças é tão importante como a selecção da temperatura de armazenamento.

As aves devem ser congeladas rapidamente, de forma a apresentarem uma aparência leve e agradável. O congelamento lento origina um aspecto escuro e a formação de cristais de gelo de grandes dimensões que provocam a dani-ficação de tecidos. O rápido congelamento pode ser realizado por ar forçado a temperaturas entre -23 e -40° C e velocidades de 1,5 a 5 m/s.

Se as aves têm de ser congeladas na embalagem, é aconselhável que esta fique aberta ou se abram furos na direcção do fluxo de ar durante o congelamento.

O tempo de congelamento de aves como função da temperatura do ar de refrigeração é dado na Figura 3-98, e as propriedades térmicas das aves são apresentadas na Tabela 3-8.

Outros processos de congelamento incluem a colocação das carcaças entre duas placas frias, imersão em fluidos refrigerantes, tais como glicol ou cloreto

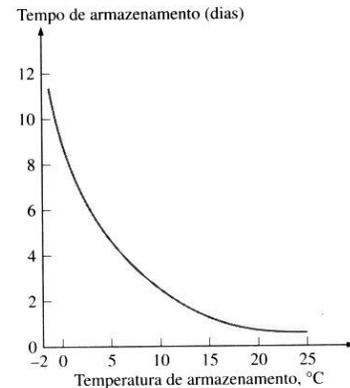
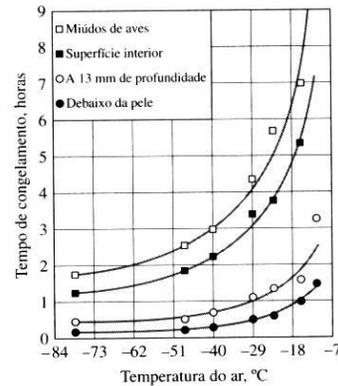


FIGURA 3-97

O tempo de armazenamento de aves frescas decresce exponencialmente com o aumento da temperatura.



Nota: O tempo de congelamento representa o tempo necessário para que a temperatura desça de 0 para -4° C. Os valores são para frangos de 2,3 a 3,6 kg e para uma velocidade do ar de 2,3 a 2,8 m/s.

FIGURA 3-98

Variação do tempo de congelamento de aves com a temperatura do ar (van der Berg e Lentz).

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA 3-99

Variação da temperatura de 6,8 kg de peitos de peru com 6,8 kg com a profundidade, durante o arrefecimento por imersão a -29°C (van der Berg e Lentz).

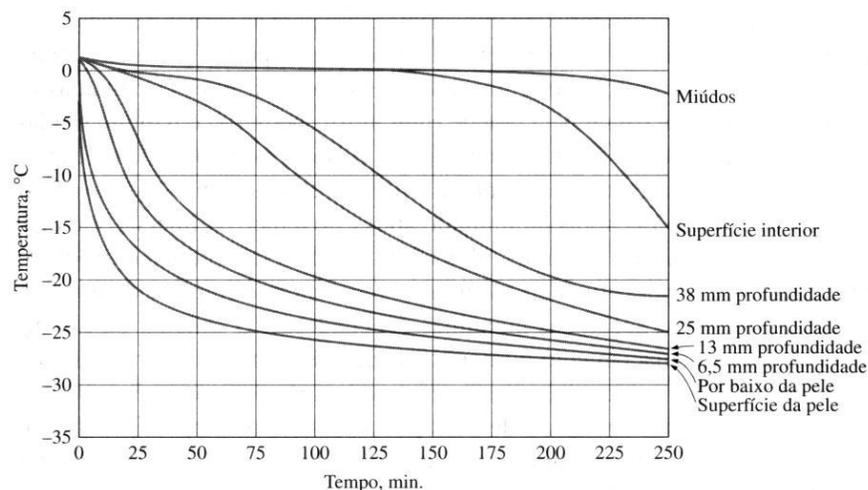


TABELA 3-8

Propriedades térmicas de aves

Propriedade	Valor típico
Massa volúmica média	
músculo	1070 kg/m^3
pele	1030 kg/m^3
Calor específico	
acima do ponto	
de congelamento	2,94 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
abaixo do ponto	
de congelamento	1,55 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$
Ponto de congelamento	$-2,8^{\circ}\text{C}$
Calor latente de fusão	247 kJ/kg
Conductividade térmica [em $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$]	
músculo do peito	0,502 a 20°C 1,384 a -20°C 1,506 a -40°C
músculo escuro	1,557 a -40°C

de cálcio, salmoura ou *arrefecimento criogénico* com azoto líquido. As aves podem ser congeladas durante várias horas em placas. Podem obter-se taxas de congelamento muito elevadas através da *imersão* de carcaças embaladas em salmoura a baixa temperatura. O tempo de congelamento numa salmoura a -29°C pode ser inferior a 20 minutos, dependendo do tamanho do animal (Figura 3-99). O congelamento por imersão produz uma aparência fresca e agradável, e a elevada taxa de transferência de calor torna o processo viável, apresentando custos iniciais e de manutenção inferiores aos de ar forçado. Por vezes, utiliza-se azoto líquido para o congelamento superficial até à temperatura de -73°C , sendo o processo completado ao ar num recinto a -23°C .

Os produtos adequadamente embalados podem ser mantidos congelados até cerca de um ano a uma temperatura de -18°C ou inferior. Este tempo decresce consideravelmente a temperaturas superiores. Verificam-se alterações significativas no sabor e suculência quando as aves são armazenadas durante períodos muito longos, desenvolvendo um odor a ranço. As aves congeladas podem desidratar-se e sofrer **queimaduras de frio**, prejudicando o aspecto visual do produto e provocar o endurecimento da zona afectada. Estes factores podem ser controlados através da *humidificação*, *redução* da temperatura de armazenamento, envolvimento com uma embalagem impermeável ou reduzindo o teor de oxigénio livre.

As aves congeladas podem ser *descongeladas* ao ar, água, dentro do frigorífico ou do forno, sem qualquer diferença significativa de sabor. Aves grandes, tais como perus, devem ser descongeladas mantendo-as num frigorífico entre 2 e 4°C durante 2 a 4 dias, dependendo do tamanho. Podem também ser descongelados por imersão em água fria durante 4 a 6 h.

Deve-se ter cuidado para manter a superfície fria, para minimizar o *desenvolvimento bacteriológico*.

Exemplo 3-25 Congelamento de um frango numa caixa

Um fornecimento de 50 kg de frango a 6° C contidos numa caixa deve ser congelado a -18° C. Determine a quantidade de calor que é necessário remover. O calor latente do frango é de 247 kJ/kg e o calor específico é de 3,32 kJ/(kg · °C) acima do ponto de congelamento e de 1,77 kJ/(kg · °C) abaixo deste. A caixa pesa 1,5 kg e o calor específico desta é de 1,4 kJ/(kg · °C). A temperatura de congelamento do frango é de -2,8° C.

Solução Considerando o frango e a caixa como *sistema* (Figura 3-100). Este é um *sistema fechado*, visto não existir troca de massa na fronteira. Observa-se que o calor total a ser removido (carga térmica) é a soma do calor latente e do calor sensível do frango antes e depois de congelado, e do calor sensível da caixa.

Pressupostos 1 A troca de energia entre o ar e a caixa é desprezada. 2 As propriedades térmicas de frango fresco e congelado são constantes. 3 O conteúdo total de água do frango mantém-se constante. 4 O sistema é estacionário, sendo portanto a energia cinética e potencial igual a zero $\Delta Ec = \Delta Ep = 0$, $\Delta E = \Delta U$. 5 Não existe realização de qualquer forma de trabalho.

Análise Com base nos pressupostos e observações, o balanço de energia do sistema é dado por

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}}$$

$$-Q_{\text{sai}} = \Delta U_{\text{frango}} + \Delta U_{\text{caixa}}$$

A quantidade total de calor que deve ser removida é igual à soma dos calores latente e sensível do frango antes e depois do congelamento e do calor sensível da caixa:

Arrefecimento de frango fresco de 6 para -2,8° C:

$$\Delta U_{\text{frango fresco}} = mc\Delta T = (50 \text{ kg})[3,32 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](-2,8 - 6)^\circ\text{C} = -1461 \text{ kJ}$$

Congelamento do frango a -2,8° C:

$$\Delta U_{\text{frango em congelamento}} = mu_{\text{latente}} = (50 \text{ kg})(-247 \text{ kJ}/\text{kg}) = -12\,350 \text{ kJ}$$

Arrefecimento do frango de -2,8 para -18° C

$$\Delta U_{\text{frango congelado}} = mc\Delta T = (50 \text{ kg})[1,77 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})][(-18 - (-2,8))^\circ\text{C}] = -1345 \text{ kJ}$$

Arrefecimento da caixa de 6 para -18° C:

$$\Delta U_{\text{caixa}} = (mc\Delta T)_{\text{caixa}} = (1,5 \text{ kg})[1,4 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](-18 - 6)^\circ\text{C} = -50 \text{ kJ}$$

Portanto a quantidade total de calor que é necessário remover é dada por

$$\begin{aligned} Q_{\text{sai}} &= -\Delta U_{\text{frango}} - \Delta U_{\text{caixa}} \\ &= -(\Delta U_{\text{frango fresco}} + \Delta U_{\text{frango em congelamento}} + \Delta U_{\text{frango congelado}}) - \Delta U_{\text{caixa}} \\ &= 1461 + 12\,350 + 1345 + 50 = \mathbf{15\,206 \text{ kJ}} \end{aligned}$$

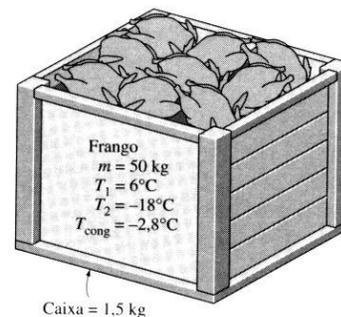


FIGURA 3-100
Esquema para o Exemplo 3-25.

Discussão Note que a maior parte da carga térmica do sistema de refrigeração (81%) é devida à remoção de calor latente durante o processo de mudança de fase. Note também que a carga térmica devida à caixa é desprezável (menor que 1%) podendo ser ignorada.

3-11 ■ SUMÁRIO

A primeira lei da termodinâmica é essencialmente uma expressão do princípio de conservação da energia. Energia pode atravessar as fronteiras de um sistema fechado sob a forma de calor ou trabalho. Se a transferência de energia é devida à diferença de temperatura entre o sistema e a sua vizinhança, denomina-se *calor*; de outra forma denomina-se *trabalho*.

O calor pode ser transferido por três formas distintas: condução, convecção e radiação. A *condução* é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as menos energéticas adjacentes, como resultado da interação entre as partículas. A *convecção* é uma forma de transferência de energia entre a superfície de um sólido e um líquido ou gás adjacente em movimento, envolvendo os efeitos combinados de condução e movimento do fluido. A *radiação* é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas electromagnéticas (ou fótons) como resultado de variações das configurações electrónicas dos átomos ou moléculas. As três formas de transferência de calor podem ser expressas por

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k_t A \frac{dT}{dx} \quad (\text{W})$$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA(T_s - T_f) \quad (\text{W})$$

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (\text{W})$$

As diversas forma de trabalho podem ser expressas por

$$\text{Trabalho eléctrico:} \quad W_e = VI \Delta t \quad (\text{kJ})$$

$$\text{Trabalho de fronteira:} \quad W_f = \int_1^2 P dV \quad (\text{kJ})$$

$$\text{Trabalho gravítico (= } \Delta E_p): \quad W_g = mg(z_2 - z_1) \quad (\text{kJ})$$

$$\text{Trabalho de aceleração (} \Delta E_c): \quad W_a = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) \quad (\text{kJ})$$

$$\text{Trabalho de veio:} \quad W_v = 2\pi nB \quad (\text{kJ})$$

$$\text{Trabalho elástico (de mola):} \quad W_m = \frac{1}{2} k(x_2^2 - x_1^2) \quad (\text{kJ})$$

Para um *processo politrópico* ($Pv^n = \text{constante}$) de gases reais, o trabalho de fronteira pode ser expresso por

$$W_f = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} \quad (n \neq 1) \quad (\text{kJ})$$

O balanço de energia de *qualquer sistema* sujeito a *qualquer processo* pode ser expresso por

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \quad (\text{kJ})$$

Podendo também ser expresso sob a forma de taxa:

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\dot{\Delta E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação de energia} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \quad (\text{kW})$$

Tomando a transferência de calor para o sistema e o trabalho realizado pelo sistema como quantidades positivas, o balanço de energia para um sistema fechado pode também ser expresso por

$$Q - W = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep \quad (\text{kJ})$$

em que

$$\begin{aligned} W &= W_{\text{outros}} + W_f \\ \Delta U &= m(u_2 - u_1) \\ \Delta Ec &= \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \\ \Delta Ep &= mg(z_2 - z_1) \end{aligned}$$

Para um *processo a pressão constante*, $W_f + \Delta U = \Delta H$. Então:

$$Q - W_{\text{outros}} = \Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep \quad (\text{kJ})$$

A quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau denomina-se *calor específico a volume constante* c_v , para um processo a volume constante, e *calor específico a pressão constante* c_p , para um processo a pressão constante, sendo definidos por

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad \text{e} \quad c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

Para gases perfeitos, u , h , c_v e c_p são apenas funções da temperatura. Δu e Δh para gases perfeitos podem ser expressos por

$$\begin{aligned} \Delta u &= u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT \cong c_{v,\text{med}}(T_2 - T_1) \\ \Delta h &= h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) dT \cong c_{p,\text{med}}(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

Para gases perfeitos, c_v e c_p são relacionados por

$$c_p = c_v + R \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

em que R é a constante de gás. A relação de *calores específicos* k é definida por

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Para *substâncias incompressíveis* (líquidos e sólidos), ambos os calores específicos a pressão e o volume constantes são idênticos e denotados por c :

$$c_p = c_v = c \quad [\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$$

Para substâncias incompressíveis, Δu e Δh são dados por

$$\Delta u = \int_1^2 c(T) dT \cong c_{\text{med}}(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta P \quad (\text{kJ/kg})$$

O arrefecimento e o congelamento de alimentos é uma importante área de aplicação da termodinâmica.

REFERÊNCIAS E SUGESTÕES DE LEITURA

1. ASHRAE *Handbook of Fundamentals*. SI version. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993.
2. ASHRAE *Handbook of Refrigeration*. SI version. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1994.
3. R. Balmer. *Thermodynamics*. St. Paul, MN: West Publishing, 1990
4. A. Bejan. *Advanced Engineering Thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
5. W. Z. Black and J. G. Hartley. *Thermodynamics*. New York: Harper and Row, 1985.
6. Y. A. Cengel. *Heat Transfer: A Practical Approach*. New York: McGraw-Hill, 1998.
7. H. Hillman. *Kitchen Science*. Mount Vernon, NY: Consumers Union, 1981
8. J.B. Jones and G. A. Hawkins. *Engineering Thermodynamics*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.
9. G. J. Van Wylen and R. E. Sonntag. *Fundamentals of Classic Thermodynamics*. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, 1985.
10. K. Wark. *Thermodynamics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

EXERCÍCIOS

Transferência de calor e trabalho

- 3-1C*** Em que formas a energia pode atravessar uma fronteira de um sistema?
- 3-2C** Quando é que a energia que atravessa um sistema é calor e quando é trabalho?

* Os estudantes devem responder a todas as perguntas conceituais marcadas por «C».

- 3-3C** O que entende por um processo adiabático? O que é um sistema adiabático?
- 3-4C** O gás num dispositivo cilindro-êmbolo é comprimido e, como consequência, a sua temperatura eleva-se. Para o gás, isto é uma interação de calor ou de trabalho?
- 3-5C** Um recinto é aquecido por um ferro de engomar que foi deixado ligado. Isto é uma interação de calor ou de trabalho? Considere o recinto completo, incluindo o ferro, como sistema.
- 3-6C** Um recinto é aquecido pela radiação solar que penetra pelas janelas. Para o recinto, isto é uma interação de calor ou trabalho?
- 3-7C** Um recinto isolado é aquecido pela queima de velas de cera. Isto é uma interação de calor ou trabalho? Considere o recinto completo, incluindo as velas como sistema.
- 3-8C** O que entende por funções de caminho e de ponto? Dê exemplos.
- 3-9C** Quais são os mecanismos de transferência de calor?
- 3-10C** O que entende por teoria calórica? Quando e porque é que foi abandonada?
- 3-11C** Existe alguma energia do Sol que chega à Terra por condução ou convecção?
- 3-12C** Qual é o melhor condutor de calor: diamante ou prata?
- 3-13C** Qual a diferença entre a convecção forçada e a natural?
- 3-14C** Defina emissividade e absorcividade. O que entende por lei de Kirchhoff de radiação?
- 3-15C** O que entende por corpo negro? Qual a diferença entre os corpos reais e o corpo negro?
- 3-16** As superfícies interior e exterior de uma parede de tijolo de $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$, 30 cm de espessura e condutibilidade térmica de $0,69 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, são mantidas à temperatura de 20 e 5°C , respectivamente. Determine a taxa de transferência de calor através da parede em W .
- 3-17** As superfícies interior e exterior de uma janela de vidro com $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ e $0,5 \text{ cm}$ de espessura são, no Inverno, de 10 e 3°C , respectivamente. Sabendo que a condutibilidade térmica do vidro é de $0,78 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, determine a perda de calor em kJ durante um período de 5 h . Qual seria a sua resposta se o vidro tivesse uma espessura de 1 cm ?
- 3-18** Uma panela de alumínio, com condutibilidade térmica de $237 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ apresenta um fundo plano com 30 cm de diâmetro e $0,4 \text{ cm}$ de espessura. Transfere-se 500 W de calor de forma contínua para ferver água no interior. Sabendo que a superfície interior do fundo se encontra a 105°C , determine a temperatura da superfície exterior.
- 3-19** Para efeitos de transferência de calor, um homem de pé pode ser modelado através de um cilindro de 30 cm de diâmetro e 170 cm de altura, com os topos isolados e com a superfície exterior a uma temperatura média de 34°C . Para um

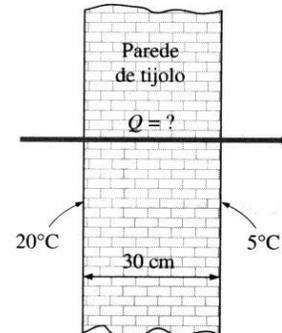


FIGURA P3-16

CAPÍTULO 3

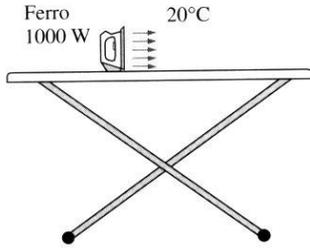
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-22

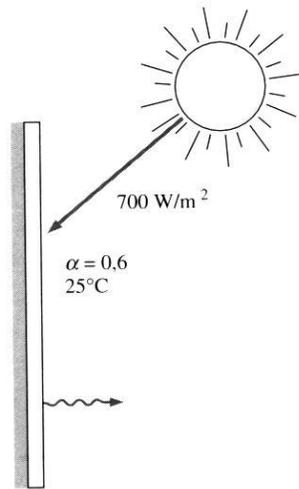


FIGURA P3-23

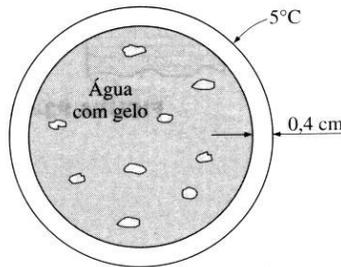


FIGURA P3-26

coeficiente de transferência de calor por convecção de $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, determine a taxa de perda de calor por convecção deste modelo, num ambiente a 20°C .

Solução: 336 W.

3-20 Uma bola esférica com 5 cm de diâmetro cuja superfície é mantida a uma temperatura de 70°C é suspensa no centro de um recinto a 20°C . Sabendo que o coeficiente de transferência de calor por convecção é de $15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ e a emissividade da superfície de 0,8, determine a taxa total de transferência de calor da bola.

3-21 Ar quente a 80°C é soprado sobre uma superfície plana com $2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, a 30°C . Sabendo que o coeficiente de transferência de calor por convecção é de $55 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, determine a taxa de transferência de calor do ar para a superfície em kW.

3-22 Um ferro de engomar de 100 W é deixado com a sua base exposta ao ar que está a 20°C . O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a base do ferro e o ar é de $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. Sabendo que a base tem um emissividade de 0,6 e uma superfície de $0,02 \text{ m}^2$, determine a sua temperatura.

3-23 Uma placa fina de metal tem uma das superfícies isolada e a outra, com absorvidade de 0,6, exposta a uma radiação solar. Sabendo que a radiação incide com uma taxa de $700 \text{ W}/\text{m}^2$ e o ar ambiente está a 25°C , determine a temperatura da superfície quando o calor cedido por convecção iguala o absorvido por radiação. Considere o coeficiente de transferência de calor por convecção de $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ e despreze o calor cedido por radiação.

3-24 Um tubo exterior de água quente com 10 m de comprimento e 5 cm de diâmetro cede calor, para o ambiente que se encontra a 5°C , por convecção natural com um coeficiente de $25 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$. Determine a taxa de transferência de calor em kW.

3-25 A superfície exterior de uma nave espacial tem uma emissividade de 0,8 e absorvidade de 0,3 para a radiação solar. Se esta incidir com uma taxa de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, determine a temperatura da superfície da nave quando a radiação emitida iguala a energia solar absorvida.

3-26 Um recipiente esférico oco de ferro, com diâmetro exterior de 20 cm e 0,4 cm de espessura é cheio de água com gelo a 0°C . Sabendo que a superfície exterior se encontra a 5°C , determine aproximadamente a taxa de transferência de calor da esfera e a taxa de fusão do gelo.

3-27 As superfícies interior e exterior de uma janela de vidro duplo com $2 \times 2 \text{ m}$ encontram-se a 18 e 6°C , respectivamente. Sabendo que o espaço intermédio é de 1 cm e está cheio de ar parado, determine a taxa de transferência de calor em kW através da janela.

3-28 As duas superfícies de uma placa com 2 cm de espessura são mantidas a 0 e 100°C . Sabendo que é transferido calor através da placa a uma taxa de $500 \text{ W}/\text{m}^2$, determine a condutibilidade térmica.

Trabalho de fronteira

3-29C O que representa a área abaixo da curva de processo num diagrama P - v ?

3-30C Em sistemas de volume constante, o trabalho de fronteira é sempre nulo?

3-31C Um gás perfeito num dado estado expande-se até um volume final, primeiro a pressão constante e depois a temperatura constante. Qual o caso em que o trabalho realizado é maior?

3-32C Mostre que $1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 = 1 \text{ kJ}$.

3-33 Uma massa de 5 kg de vapor de água saturado a 200 kPa é aquecida a pressão constante até à temperatura de 300°C. Calcule o trabalho realizado pelo vapor durante este processo. *Solução:* 430,5 kJ.

3-34 Um dispositivo cilindro-êmbolo sem atrito contém inicialmente 200 l de líquido saturado de fluido frigorígeno 134a. A massa do êmbolo é tal que mantém a pressão de 800 kPa no interior. Aquece-se o fluido, até que a sua temperatura aumente para 50°C. Determine o trabalho realizado durante este processo. *Solução:* 5227 kJ.

3-35E* Um dispositivo cilindro-êmbolo sem atrito contém 12 lbm de vapor de água sobreaquecido a 60 psia e 500°F. Deixa-se arrefecer o vapor a pressão constante, até que 70% da massa deste condensa. Determine o trabalho realizado durante o processo.

3-36 Um massa de 1,2 kg de ar a 150 kPa e 12°C está retida num dispositivo cilindro-êmbolo sem atrito. Comprime-se o ar até a uma pressão final de 600 kPa. Durante o processo, transfere-se calor de forma a manter a temperatura interior constante. Calcule o trabalho efectuado durante este processo.

Solução: -136,1 kJ.

3-37 Azoto, inicialmente num estado a 300 K, 150 kPa e 0,2 m³ é comprimido lentamente através de um processo isotérmico até a uma pressão final de 800 kPa. Determine o trabalho realizado durante este processo.

3-38 Um gás é comprimido desde um volume inicial de 0,2 m³ até um final de 0,12 m³. Durante este processo de quase-equilíbrio, a pressão varia com o volume, de acordo com a equação $P = aV + b$, em que $a = -1200 \text{ kPa/m}^3$ e $b = 600 \text{ kPa}$. Calcule o trabalho realizado durante este processo (a) através do traçado do diagrama P - v e do cálculo da área abaixo da curva e (b) pelo cálculo de integrais.

3-39E Durante um processo de expansão, a pressão de um gás varia desde 15 até 100 psia de acordo com a equação $P = aV + b$, em que $a = 5 \text{ psia/ft}^3$ e b é uma constante. Sabendo que o volume inicial do gás é de 7 ft³, determine o trabalho realizado durante o processo. *Solução:* 180,9 Btu.

* A notação «E» designa unidades inglesas (English).

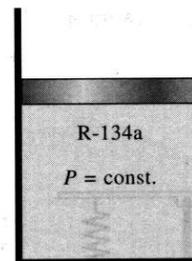


FIGURA P3-34

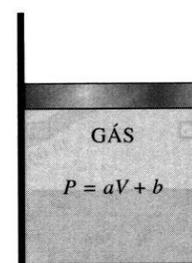


FIGURA P3-38

CAPÍTULO 3

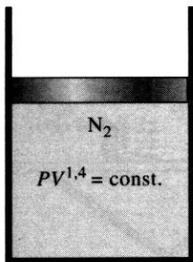
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-41

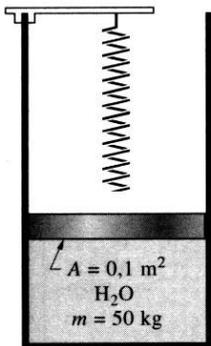


FIGURA P3-45

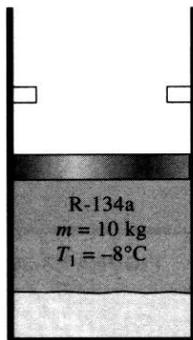


FIGURA P3-46

3-40 Durante processos reais de compressão e de expansão em dispositivos de cilindro-êmbolo, os gases satisfazem a equação $PV^n = C$, em que n e C são constantes. Calcule o trabalho realizado quando um gás se expande desde o estado de 150 kPa e $0,03 \text{ m}^3$ até ao volume final de $0,2 \text{ m}^3$ para o caso de $n = 1,3$.

3-41 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 2 kg de azoto a 100 kPa e 300 K. O gás é comprimido lentamente, de acordo com a equação $PV^{1,4} = \text{constante}$ até que atinja a temperatura final de 360 K. Calcule o trabalho realizado durante o processo. *Solução:* $-89,0 \text{ kJ}$.

3-42 A equação de estado de um dado gás é dada por $\bar{v}(P + 10/\bar{v}^2) = R_u T$, em que as unidades de \bar{v} e P são em m^3/kmol e kPa, respectivamente. Expandem-se $0,5 \text{ kmol}$ deste gás num processo de quase-equilíbrio de 2 até 4 m^3 à temperatura constante de 300 K. Determine (a) a unidade da quantidade 10 da equação e (b) o trabalho realizado durante este processo isotérmico.

3-43 Dióxido de carbono contido num dispositivo cilindro-êmbolo é comprimido desde $0,3$ para $0,1 \text{ m}^3$. Durante este processo, a pressão e o volume são relacionados por $P = aV^{-2}$, em que $a = 8 \text{ kPa} \cdot \text{m}^6$. Calcule o trabalho realizado no dióxido de carbono durante este processo. *Solução:* $-53,3 \text{ kJ}$.

3-44E Hidrogénio é contido num dispositivo cilindro-êmbolo a 14,7 psia e 15 ft^3 . Neste estado, uma mola linear ($F \propto x$) com constante de $15\,000 \text{ lbf/ft}$ toca no êmbolo sem exercer força. A área da secção do êmbolo é de 3 ft^2 . Transfere-se calor para o hidrogénio, expandindo-o, até que o seu volume duplique. Determine (a) a pressão final, (b) o trabalho total realizado pelo hidrogénio e (c) a fracção deste trabalho realizado contra a mola. Mostre o processo num diagrama P - V .

3-45 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 50 kg de água a 150 kPa e 25°C . A secção do êmbolo tem uma área de $0,1 \text{ m}^2$. Transfere-se calor para a água, causando a evaporação de parte desta. Quando o volume atinge $0,2 \text{ m}^3$, o êmbolo alcança uma mola linear cuja constante é de 100 kN/m . Transfere-se mais calor, até que o êmbolo se desloque mais 20 cm. Determine (a) a temperatura e pressão final, (b) o trabalho realizado durante este processo. Mostre o processo num diagrama P - V . *Solução:* (a) 350 kPa, $138,8^\circ \text{C}$; (b) $27,5^\circ \text{C}$.

3-46 Um dispositivo cilindro-êmbolo munido de batentes contém 10 kg de fluido frigorígeno 134a. Inicialmente, 8 kg deste fluido encontram-se na forma líquida à temperatura de -8°C . Transfere-se calor lentamente até que o êmbolo se encoste nos batentes, sendo neste instante o volume igual a 400 l. Determine (a) a temperatura no instante em que o êmbolo toca nos batentes e (b) o trabalho realizado durante este processo. Mostre o processo num diagrama P - V .

Solução: -8°C ; (b) $45,6 \text{ kJ}$.

3-47 Um dispositivo cilindro-êmbolo sem atrito contém 10 kg de vapor saturado de fluido frigorígeno 134a a 50°C . Permite-se ao fluido expandir-se isotermicamente, baixando gradualmente a pressão através de um processo de quase-equilíbrio até ao valor final de 500 kPa. Determine o trabalho realizado durante este processo (a) utilizando os dados experimentais de volume específico retirados das tabelas e (b) tratando o vapor do fluido frigorígeno como um gás perfeito. Determine também o erro envolvido em cada caso.

3-48 Determine o trabalho de fronteira realizado por um gás durante um processo de expansão, sabendo que os valores medidos de pressão e volume são de 300 kPa, 1 l; 290 kPa, 1,1 l; 270 kPa, 1,2 l; 250 kPa, 1,4 l; 220 kPa, 1,7 l e 200 kPa, 2 l.

Outras formas de trabalho mecânico

3-49C Um automóvel é acelerado desde o repouso até 85 km/h em 10 s. O trabalho transferido para o automóvel seria diferente se a aceleração se efetuasse até à mesma velocidade mas num intervalo de tempo de 5 s?

3-50C Uma grua iça um peso até uma altura de 20 m em 20 s, enquanto que outra o faz em 10 s. Existe alguma diferença entre o trabalho realizado no peso por cada grua?

3-51 Determine o trabalho necessário para acelerar um automóvel de 800 kg desde o repouso até 100 km/h numa estrada plana. *Solução:* 308,6 kJ.

3-52 Determine o trabalho necessário para acelerar um automóvel de 2000 kg de 20 para 70 km/h numa rampa com um aumento de cota de 40 m.

3-53E Determine o binário aplicado ao veio de transmissão de um automóvel que transmite 450 cv e roda a uma velocidade 3000 rpm.

3-54 Determine o trabalho necessário para flectir uma mola linear com uma constante de 70 kN/m em 30 cm desde a sua posição de repouso.

3-55 Um motor de um automóvel de 1500 kg desenvolve uma potência de 75 kW. Determine o tempo necessário para acelerar desde o repouso até à velocidade de 85 km/h a carga total e numa estrada plana. A sua resposta é realista?

3-56 Um teleférico de esqui tem um comprimento num sentido de 1 km com uma pendente de 200 m. Os bancos têm uma lotação de 3 pessoas e estão espaçados de 20 em 20 m. O teleférico funciona a uma velocidade constante de 10 km/h; desprezando o atrito e a resistência aerodinâmica e assumindo que a massa média de cada banco ocupado é de 250 kg, determine a potência necessária para elevar este teleférico. Estime também a potência necessária para acelerar o teleférico desde o repouso até à velocidade de funcionamento em 5 s.

3-57 Determine a potência necessária para um automóvel de 2000 kg subir uma rampa de 100 m de comprimento e 30° de inclinação (desde a horizontal) em 10 s (a) com velocidade constante, (b) desde o repouso até 30 m/s e (c) desde 35 m/s até uma velocidade final de 5 m/s. Despreze o atrito e a resistência aerodinâmica e de deslocamento.

Solução: (a) 98,07 kW; (b) 188,07 kW; (c) -21,93 kW.

3-58 Um automóvel de 1200 kg é rebocado por um camião. Desprezando a resistência aerodinâmica e de deslocamento, determine a potência adicional necessária (a) para uma velocidade constante numa estrada plana, (b) a uma velocidade constante de 50 km/h numa subida de 30° (com a horizontal) e (c) para acelerar desde o repouso até uma velocidade de 90 km/h numa estrada plana em 12 s. *Solução:* (a) 0; (b) 81,7 kW; (c) 31,25 kW.

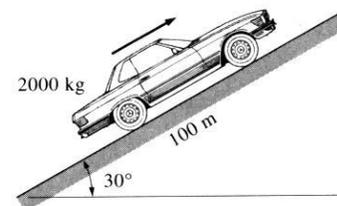


FIGURA P3-57

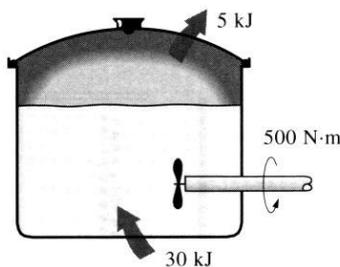


FIGURA P3-64

Análise de energia em sistemas fechados: sistemas comuns

3-59C O balanço de trabalho para um ciclo é necessariamente nulo? Quais os sistemas em que se verifica o anterior?

3-60C Em que condições a equação $Q - W_{\text{outro}} = H_2 - H_1$ é válida para sistemas fechados?

3-61C Num dia quente de Verão, um estudante liga uma ventoinha no seu quarto e sai de manhã. Quando ele volta no fim da tarde, o seu quarto está mais fresco ou mais quente do que o dos vizinhos? Porquê? Considere que todas as portas e janelas foram deixadas fechadas.

3-62C Considere dois recintos idênticos, um deles contendo um frigorífico. Considerando que se mantêm todas as portas e janelas fechadas, o recinto do frigorífico irá estar mais frio ou mais quente que o outro? Justifique.

3-63C Considere uma lata de refrigerante deixada cair do topo de um edifício. A temperatura do refrigerante irá subir devido ao decréscimo de energia potencial?

3-64 Aquece-se água numa panela fechada ao lume contendo um agitador no seu interior. Durante o processo, transferem-se 30 kJ de calor para a água, perdendo-se 5 kJ para o ambiente. O trabalho do agitador é de 500 N·m. Determine a energia final do sistema, sabendo que a inicial era de 10 kJ.

Solução: 35,5 kJ.

3-65E Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical contém água e é aquecido num fogão. Durante o processo, transferem-se 50 Btu para a água e são cedidos para o ambiente 8 Btu. O êmbolo sobe devido à evaporação, efectuando 5 Btu de trabalho de fronteira. Determine a variação de energia da água durante o processo. *Solução:* 37 Btu.

3-66 Preencha os dados em falta para cada um dos processos entre os estados 1 e 2, relativos a sistemas fechados. (Todas as unidades são em kJ.)

	Q_{adm}	W_{sai}	E_1	E_2	ΔE
(a)	18	6		35	
(b)	10			4	-15
(c)		12	3		32
(d)	25		14		10

3-67 Preencha os dados em falta para cada um dos processos entre os estados 1 e 2, relativos a sistemas fechados. (Todas as unidades são em kJ.)

	Q_{adm}	W_{sai}	E_1	E_2	ΔE
(a)		18	6		-20
(b)	5		20		-35
(c)	25	10		40	
(d)	9			12	-15

3-68E Um sistema fechado está sujeito a um ciclo que consiste em dois processos. Durante o primeiro, transferem-se 40 Btu de calor para o sistema, enquanto este realiza 60 Btu de trabalho. Durante o segundo processo, fornece-se sobre o sistema 45 Btu de trabalho ao sistema.

(a) Determine o calor transferido durante o segundo processo.

(b) Calcule o trabalho e o calor total para o ciclo

3-69 Um sistema fechado está sujeito a um ciclo composto por três processos. Durante o primeiro, que é adiabático, realizam-se 50 kJ de trabalho no sistema. Durante o segundo processo, transferem-se 200 kJ de calor para o sistema, enquanto este não realiza qualquer trabalho. No terceiro processo, o sistema realiza 90 kJ de trabalho, à medida que retorna ao estado inicial.

(a) Determine o calor transferido durante o último processo.

(b) Determine o trabalho total realizado durante este ciclo.

3-70 Pretende-se instalar um sistema de ar condicionado num sala de aula que contém geralmente 40 pessoas. Os equipamentos são do tipo de janela, com uma potência de 5 kW. Pode-se considerar que uma pessoa em descanso dissipa cerca de 360 kJ/h. Na sala existem 10 lâmpadas de 100 W cada. Estima-se que a taxa de transferência de calor através das paredes e das janelas é de 15 000 kJ/h. Sabendo que se pretende manter a sala a uma temperatura constante de 21° C, determine o número de equipamentos de ar condicionado a instalar.

3-71 As necessidades de iluminação de uma instalação fabril são obtidas através de 700 lâmpadas fluorescentes de 40 W cada. Estas encontram-se próximas do fim da sua vida útil, sendo prevista a sua substituição por lâmpadas de elevada eficiência que funcionam nos balastros já existentes. O custo unitário das lâmpadas convencionais e de elevada eficiência é de €1,77 e €2,26, respectivamente. A fábrica opera durante 2800 horas por ano, estando as lâmpadas acesas durante esse tempo. Tendo em conta que o custo de electricidade é de €0,08/kWh e que o factor do balastro é de 1,1 (ou seja, consome 10% da potência nominal das lâmpadas), determine qual a poupança em energia e em custos por ano devido à instalação das novas lâmpadas mais eficientes. Estime também o período de amortização.

3-72 As necessidades de iluminação de um armazém são cumpridas por 6 conjuntos de iluminação, contendo cada um 4 lâmpadas fluorescentes de 60 W. Todos os conjuntos são ligados durante o horário de funcionamento da empresa que é das 6 às 18 horas, 365 dias por ano. No entanto, o armazém só é utilizado em média durante 3 horas por dia. Sabendo que o preço da electricidade é de €0,08/kWh, determine a poupança de energia e de custos através da instalação de sensores de movimento. Determine também o período de amortização sabendo que o sensor custa €32,00, tendo um preço de instalação de €40,00.

3-73 Um *campus* universitário tem 200 salas de aula e 400 gabinetes. As salas são equipadas com 12 lâmpadas fluorescentes, consumindo cada uma 110 W, valor este que inclui o consumo do balastro. Os gabinetes têm em média metade do número de lâmpadas. A universidade encontra-se aberta durante 240 dias por ano. As salas e os gabinetes não são ocupados, em média, durante 4 horas

CAPÍTULO 3

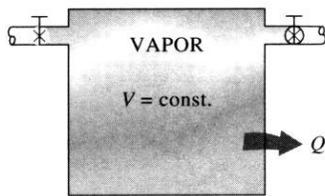
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-74

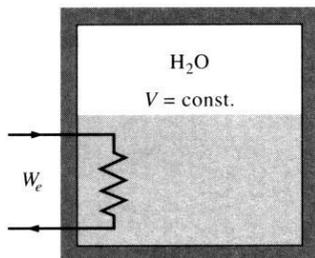


FIGURA P3-77

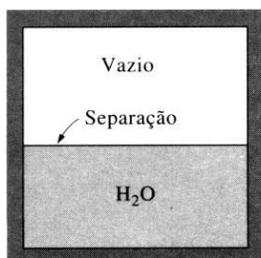


FIGURA P3-78

por dia, mas as lâmpadas estão sempre ligadas. Sabendo que o custo unitário da electricidade é de €0,075/kWh, determine qual a poupança se as lâmpadas forem desligadas fora dos períodos de ocupação.

Análise de energia em sistemas fechados: dados de saturação, líquido comprimido e sobreaquecido

3-74 Um radiador de um sistema de aquecimento a vapor tem um volume de 20 l, estando cheio de vapor sobreaquecido a 300 kPa e 250° C. Neste instante tapam-se a entrada e a saída do dispositivo. Determine a quantidade de calor que irá ser transferida para o recinto quando a pressão descer até 100 kPa. Mostre o processo num diagrama P - v incluindo as linhas de saturação.

Solução: -33,4 kJ.

3-75 Um reservatório rígido contém fluido frigorígeno 134a inicialmente a 200 kPa e com um título de 40%. Transfere-se calor para o fluido, até que a pressão atinja 800 kPa. Determine (a) a massa de fluido no reservatório e (b) a quantidade de calor transferida. Mostre o processo num diagrama P - v incluindo as linhas de saturação.

3-76E Um reservatório rígido contém fluido frigorígeno 134a inicialmente no estado de vapor saturado a 120 psia. Devido à transferência de calor, a pressão desce para 30 psia. Mostre o processo num diagrama P - v incluindo as linhas de saturação e determine (a) a temperatura final, (b) a quantidade de fluido que condensou e (c) a transferência de calor.

3-77 Um reservatório rígido isolado contém 5 kg de mistura de líquido e de vapor saturado de água a 100 kPa. Inicialmente, três quartos da massa encontram-se na fase líquida. Coloca-se no interior uma resistência eléctrica ligada a uma fonte de 110 V, passando uma corrente de 8 A. Determine quanto tempo demora a evaporar todo o líquido contido no reservatório. Mostre também o processo num diagrama T - v incluindo as linhas de saturação.

3-78 Um reservatório isolado está dividido em duas partes através de uma separação. Uma parte contém 2,5 kg de líquido comprimido de água a 60° C e 600 kPa, enquanto a outra se encontra vazia. Remove-se a separação, e a água ocupa o volume total. Determine a temperatura final da água e o volume do reservatório para uma pressão final de 10 kPa.

3-79 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 5 kg de fluido frigorígeno 134a a 800 kPa e 60° C. Arrefece-se o fluido a pressão constante, até que se encontre sob a forma de líquido a 20° C. Determine a perda de calor e mostre o processo num diagrama T - v incluindo as linhas de saturação. *Solução:* 1089 kJ.

3-80E Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 0,5 lbm de água inicialmente a 120 psia e 2 ft³. Transferem-se 200 Btu de calor para a água, mantendo a pressão constante. Determine a temperatura final da água e mostre o processo num diagrama T - v incluindo as linhas de saturação.

3-81 Um dispositivo cilindro-êmbolo isolado contém 5 l de líquido saturado (água) à pressão constante de 150 kPa. A água é agitada através de um veio munido de pás, enquanto uma corrente de 8 A passa por uma resistência durante 45 min. Sabendo que metade do líquido se evapora durante este processo a pressão constante e que o trabalho fornecido pelo agitador é de 300 kJ, determine a tensão da fonte eléctrica. Mostre também o processo num diagrama $P-v$ incluindo as linhas de saturação. *Solução:* 230,9 V.

3-82 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente vapor a 1 MPa, 350° C e 1,5 m³. Deixa-se arrefecer o vapor a pressão constante, até que se inicie a condensação. Mostre o processo num diagrama $T-v$, incluindo as linhas de saturação, e determine (a) a massa do vapor, (b) a temperatura final e (c) o calor transferido.

3-83 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente vapor a 200 kPa, 200° C e 0,5 m³. Neste estado, uma mola linear ($F \propto x$) toca no êmbolo, sem exercer força. Transfere-se calor lentamente, provocando um aumento de pressão e volume de 500 kPa e 0,6 m³, respectivamente. Mostre o processo num diagrama $P-v$, incluindo as linhas de saturação, e determine (a) a temperatura final, (b) o trabalho realizado pelo vapor e (c) o calor total transferido.

Solução: (a) 1131° C; (b) 35 kJ; (c) 772 kJ.

3-84 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente 0,5 m³ de vapor saturado (água) a 200 kPa. Neste estado, o êmbolo encontra-se apoiado sobre uns batentes e a sua massa é tal que é necessário uma pressão de 300 kPa para o mover. Transfere-se calor lentamente, até que o volume duplique. Mostre o processo num diagrama $P-v$, incluindo as linhas de saturação, e determine (a) a temperatura final, (b) o trabalho realizado durante o processo e (c) o calor total transferido. *Solução:* (a) 878,90° C; (b) 150 kJ; (c) 875 kJ

3-85E Um dispositivo cilindro-êmbolo munido de batentes no topo contém 5 lbm de líquido saturado (água) a 20 psia. Transfere-se calor, provocando a evaporação de algum líquido e o movimento ascendente do êmbolo. Quando este alcança o topo, o volume do cilindro é de 1,5 ft³. Transfere-se mais calor, até que a pressão duplique. Mostre o processo num diagrama $P-v$, incluindo as linhas de saturação. Determine (a) a quantidade de líquido no estado final, se existente, (b) a temperatura final e (c) a transferência de calor e o trabalho total.

3-86 Dois reservatórios rígidos encontram-se ligados através de uma válvula. O reservatório A contém 0,2 m³ de água a 400 kPa e com um título de 80%. O B contém 0,5 m³ de água a 200 kPa e 250° C. Abre-se a válvula, deixando os dois reservatórios atingir o mesmo estado. Determine a pressão e o calor transferido quando o sistema atinge o equilíbrio térmico com a vizinhança que se encontra a 25° C. *Solução:* 3,169 kPa, -2170 kJ.

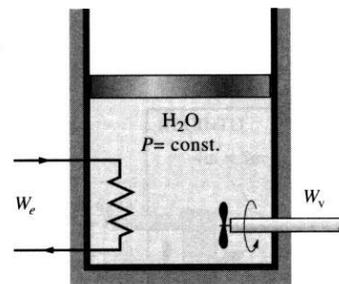


FIGURA P3-81

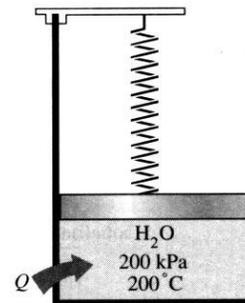


FIGURA P3-83

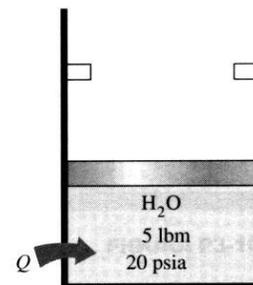


FIGURA P3-85E

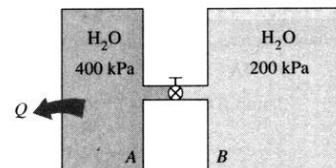


FIGURA P3-86

Calores específicos, Δu e Δh para gases perfeitos

3-87C A equação $\Delta U = mc_{v,\text{med}}\Delta T$ está restrita a processos a volume constante ou pode ser utilizada para qualquer processo de um gás perfeito? Responda à mesma questão para $Q = mc_{v,\text{med}}\Delta T$.

3-88C A equação $\Delta H = mc_{p,\text{med}}\Delta T$ está restrita a processos a um volume constante ou pode ser utilizada para qualquer processo de um gás perfeito?

3-89C Mostre que, para um gás perfeito, $\bar{c}_p = \bar{c}_v + R_u$.

3-90C A energia necessária para aquecer ar desde 295 até 305 K é idêntica à necessária para aquecer desde 345 até 355 K? Considere que a pressão se mantém constante em ambos os casos.

3-91C Na equação $\Delta U = mc_v\Delta T$ qual a unidade correcta de c_v – kJ/(kg · °C) ou kJ/(kg · K).

3-92C Uma massa fixa de um gás perfeito é aquecida de 50 até 80° C com pressão constante de (a) 1 atm e (b) 3 atm. Qual o caso em que a energia necessária é superior? Justifique.

3-93C Uma massa fixa de um gás perfeito é aquecida de 50 até 80° C com um volume constante de (a) 1 m³ e (b) 3 m³. Qual o caso em que a energia necessária é superior? Justifique.

3-94C Uma massa fixa de um gás perfeito é aquecida de 50 até 80° C (a) a volume constante e (b) a pressão constante. Qual o caso em que a energia necessária é superior? Justifique.

3-95 Determine a variação da entalpia do azoto, em kJ/kg, à medida que é aquecido de 600 para 1000 K, utilizando (a) os dados obtidos empiricamente contidos na tabela de azoto (Tabela A-18), (b) a equação de calor específico em função da temperatura (Tabela A-2c), (c) o valor de c_p à temperatura média (Tabela A-2b) e (d) o valor de c_p à temperatura ambiente (Tabela A-2a). Determine também a percentagem de erro envolvido em cada caso.

Solução: (a) 448,6 kJ/kg; (b) 447,8 kJ/kg, 0,2%; (c) 448,4 kJ/kg, 0,04%; (d) 415,6 kJ/kg, 7,4%.

3-96E Determine a variação da entalpia do oxigénio, em Btu/lbm, à medida que é aquecido desde 800 a 1500 R, utilizando (a) os dados obtidos empiricamente contidos na tabela de oxigénio (Tabela A-19E), (b) a equação de calor específico em função da temperatura (Tabela A-2Ec), (c) o valor de c_p à temperatura média (Tabela A-2Eb) e (d) o valor de c_p à temperatura ambiente (Tabela A-2Ea).

Solução: (a) 169,2 Btu/lbm; (b) 170,1 Btu/lbm; (c) 178,5 Btu/lbm; (d) 153,3 Btu/lbm.

3-97 Determine a variação da energia interna Δu do hidrogénio, em kJ/kg, quando aquecido desde 400 a 1000 K, utilizando (a) os dados obtidos empiricamente contidos na tabela de hidrogénio (Tabela A-22), (b) a equação de calor específico em função da temperatura (Tabela A-2c), (c) o valor de c_v à temperatura média (Tabela A-2b) e (d) o valor de c_v à temperatura ambiente (Tabela A-2a). Determine também a percentagem de erro envolvido em cada caso.

Análise da energia em sistemas fechados: gases perfeitos

3-98C É possível comprimir um gás perfeito isotermicamente num dispositivo cilindro-êmbolo adiabático? Justifique.

3-99E Um reservatório rígido contém 20 lbm de ar a 50 psia e 80° F. Aquece-se o ar, até que a sua pressão duplique. Determine (a) o volume do reservatório e (b) a quantidade de calor transferido. *Solução:* (a) 80 ft³, (b) 2035 Btu.

3-100 Um reservatório rígido de 1 m³ contém hidrogénio a 250 kPa e 500 K. O gás é arrefecido até que a sua temperatura desça para 300 K. Determine (a) a pressão final do reservatório e (b) a quantidade de calor transferido.

3-101 Pretende-se aquecer um recinto com 4 × 5 × 6 m através de pavimento radiante eléctrico desde 7 até 23° C em 15 minutos. Assumindo que não existem perdas de calor para o exterior e que a pressão atmosférica é de 100 kPa, determine a potência necessária do aquecedor. Considere os calores específicos constantes à temperatura do recinto. *Solução:* 1,91 kW.

3-102 Pretende-se aquecer um recinto de 4 × 5 × 7 m através de um convector de vapor. Este transfere calor a uma taxa de 10 000 kJ/h e utiliza-se um ventilador de 100 W para circular o ar quente. Estima-se uma perda de calor de 5000 kJ/h. Sabendo que a temperatura inicial do recinto é de 10° C, determine quanto tempo demora a aquecer o recinto até 20° C. Considere os calores específicos constantes à temperatura do recinto.

3-103 Num dia de Verão, uma estudante que habita num quarto de 4 × 6 × 6 m, liga a sua ventoinha antes de sair, esperando que esteja mais fresco ao voltar à noite. Assumindo que todas as portas e janelas estão devidamente fechadas e que não existe transferência de calor através das paredes, determine a temperatura do quarto quando ela regressar 10 h depois. Utilize os valores de calor específico à temperatura do quarto e assuma que o quarto está inicialmente a 100 kPa e 15° C. *Solução:* 58,2° C.

3-104E Um reservatório de 10 ft³ contém oxigénio inicialmente a 14,7 psia e 80° F. Liga-se um agitador no interior, até que a pressão aumente para 20 psia. Durante o processo, houve uma perda de calor de 20 Btu. Determine o trabalho realizado pelo agitador. Despreze a energia armazenada nas pás do agitador.

3-105 Um reservatório rígido isolado é dividido em duas partes iguais através de um separador. Inicialmente uma das partes continha 3 kg de um gás perfeito a 800 kPa e 50° C, enquanto a outra se encontra vazia. Retira-se o separador, e o gás expande-se, ocupando todo o volume. Determine a temperatura e a pressão final do reservatório.

3-106 Um dispositivo cilindro-êmbolo, cujo êmbolo se encontra em repouso num batente, contém inicialmente 0,5 kg de hélio a 100 kPa e 25° C. A massa do êmbolo é tal, que é necessária uma pressão de 500 kPa para o elevar. Quanto calor é necessário transferir, de modo a que o êmbolo se mova?

Solução: 1857 kJ.

3-107 Um dispositivo cilindro-êmbolo isolado contém 100 l de ar a 400 kPa e 25° C. Um veio munido de pás roda no interior, até que se realiza um trabalho de 15 kJ no ar, mantendo-se a pressão constante. Determine a temperatura final do ar. Despreze a energia armazenada no veio e nas pás.

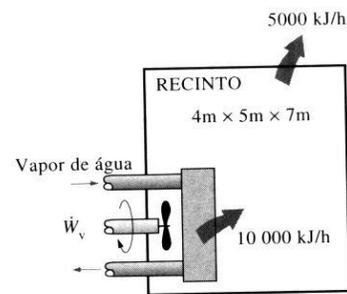


FIGURA P3-102

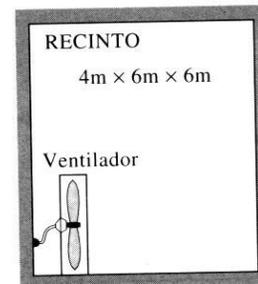


FIGURA P3-103

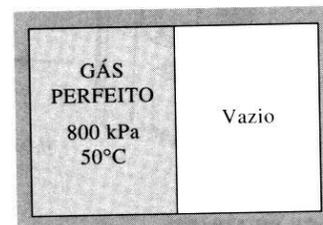


FIGURA P3-105

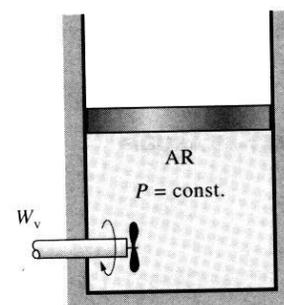


FIGURA P3-107

CAPÍTULO 3

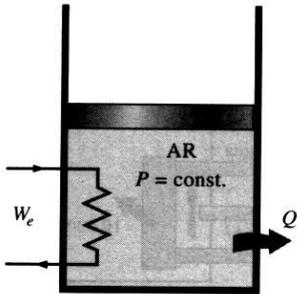
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-109

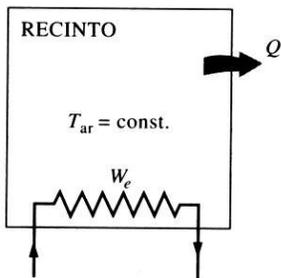


FIGURA P3-112

3-108E Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 25 ft^3 de azoto a 50 psia e 700° F . Este é arrefecido a pressão constante até que a temperatura desça para 140° F . Com base nos dados da tabela de azoto, determine o calor transferido.

3-109 Uma massa de 15 kg de ar contida num dispositivo cilindro-êmbolo é aquecida de 25 a 77° C através da passagem de corrente eléctrica por uma resistência colocada no interior. Durante o processo, a pressão é mantida constante a 300 kPa e ocorre uma perda de calor de 60 kJ . Determine a energia eléctrica necessária, em kWh . *Solução:* $0,235 \text{ kWh}$.

3-110 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente $0,3 \text{ m}^3$ de dióxido de carbono a 200 kPa e 27° C . Liga-se uma resistência eléctrica de 110 V , fazendo passar uma corrente durante 10 min . A pressão é mantida constante durante o processo, enquanto o volume é duplicado. Determine a corrente que passa através da resistência.

3-111 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém $0,8 \text{ kg}$ de azoto inicialmente a 100 kPa e 27° C . Este é comprimido lentamente num processo politrópico durante o qual $PV^{1,3} = \text{constante}$, enquanto o volume é reduzido para metade. Determine o trabalho realizado e o calor transferido para este processo.

3-112 Um recinto é aquecido através de pavimento radiante eléctrico. Durante um dia de Inverno, a perda de calor é de 8000 kJ/h , a temperatura do ar interior mantém-se constante, embora o aquecedor funcione em contínuo. Determine a potência do aquecedor, em kW .

3-113E Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 3 ft^3 de ar a 60 psia e 150° F . Fornecem-se 40 Btu de calor, enquanto o ar se expande isotermicamente. Determine o trabalho de fronteira realizado.

3-114 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 5 kg de argon a 400 kPa e 30° C . Durante um processo de expansão isotérmico de quase-equilíbrio, realiza-se sobre o sistema, 15 kJ de trabalho de fronteira e 3 kJ de trabalho de veio. Determine o calor transferido neste processo. *Solução:* 12 kJ .

3-115 Um dispositivo cilindro-êmbolo, cujo êmbolo se encontra assente sobre um batente, contém inicialmente 3 kg de ar a 200 kPa e 27° C . A massa do êmbolo é tal que é necessário uma pressão de 400 kPa para o mover. Transfere-se calor para o ar, até que o seu volume duplique. Determine o trabalho realizado pelo ar e o calor total transferido para o ar durante o processo. Represente este processo num diagrama P - v . *Solução:* 516 kJ , 2674 kJ .

3-116 Um dispositivo cilindro-êmbolo munido de um batente contém inicialmente 3 kg de ar a 200 kPa e 27° C . Fornece-se calor ao ar, e o êmbolo sobe até encostar no batente, sendo neste instante o volume o dobro do inicial. Transfere-se mais calor, até que a pressão duplique. Determine o trabalho realizado e a quantidade de calor transferida durante este processo. Represente este processo num diagrama P - v .



3-117 Um reservatório rígido contém $0,4 \text{ m}^3$ de ar a 400 kPa e 30°C , estando ligado através de uma válvula a um dispositivo cilindro-êmbolo que se encontra vazio. A massa do êmbolo é tal que é necessária uma pressão de 200 kPa para o mover. Abre-se a válvula, e o ar escoá-se para o cilindro, até que a pressão no interior do reservatório desça para 200 kPa . Durante este processo, existe uma transferência de calor para a vizinhança, de modo a que a temperatura se mantém constante a 30°C . Determine a transferência de calor para este processo.

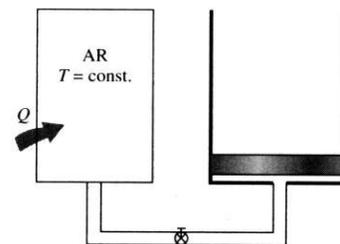


FIGURA P3-117

Análise da energia em sistemas fechados: sólidos e líquidos

3-118 Numa fábrica, esferas de latão [$\rho = 8522 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,385 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], inicialmente a 150°C , são mergulhadas em água a 50°C por um período de 2 minutos a uma cadência de 100 esferas por minuto. Sabendo que a temperatura final das esferas é de 74°C , determine a taxa de calor que é necessário retirar da água, de modo a manter a sua temperatura constante.

3-119 Repita o exercício anterior para esferas de alumínio.

3-120E Durante um piquenique num dia quente de Verão, todas as bebidas frescas foram consumidas, restando apenas as que se encontravam à temperatura ambiente de 75°F . Numa tentativa de arrefecer estas, contidas em latas de 12 oz (1 lbm = 16 oz), um indivíduo agita-as no interior de uma mala térmica cheia de água com gelo a 32°F . Utilizando as propriedades da água para o refrigerante, determine a massa de gelo que derreteu, de modo a baixar a temperatura da bebida até 45°F .

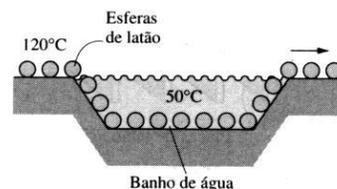


FIGURA P3-118

3-121 Considere um ferro de engomar de 1000 W cuja base, de $0,5 \text{ cm}$ de espessura e $0,03 \text{ m}^2$ de área, é feita de uma liga de alumínio 2024-T6 [$\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 875 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]. Inicialmente, o ferro encontra-se em equilíbrio térmico com o ar ambiente a 22°C . Assumindo que 85% do calor gerado pelas resistências é transferido para a base, determine o tempo mínimo para a base atingir a temperatura de 140°C .

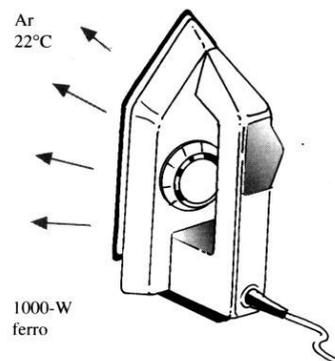


FIGURA P3-121

3-122 Mergulham-se esferas de aço inoxidável [$\rho = 8085 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,480 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] com um diâmetro de $1,2 \text{ cm}$ em água a uma cadência de 1400 por minuto. As esferas saem do forno a uma temperatura uniforme de 900°C e são expostas ao ar a 30°C durante um tempo antes de serem mergulhadas na água. Sabendo que a queda de temperatura antes de serem mergulhadas é de 850°C , determine a taxa de transferência de calor para o ar.

3-123 Esferas de aço ao carbono [$\rho = 7833 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,465 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], com um diâmetro de 8 mm , são primeiramente revenidas pelo aquecimento até 900°C e depois pelo arrefecimento lento até 100°C , num local em que o ar ambiente se encontra a 35°C . Sabendo que é necessário revenir 2500 esferas por hora, determine a taxa total de transferência de calor das esferas para o ar.

Solução: 542W.

3-124 Um dispositivo electrónico dissipando 30 W tem uma massa de 20 g , calor específico de $850 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ e uma superfície de 5 cm^2 . Este dispositivo tem um funcionamento intermitente leve, estando ligado durante 5 minutos e em repouso durante várias horas, durante o qual arrefece até à temperatura

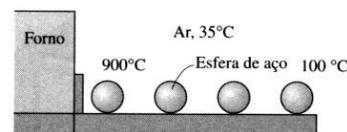


FIGURA P3-123

CAPÍTULO 3

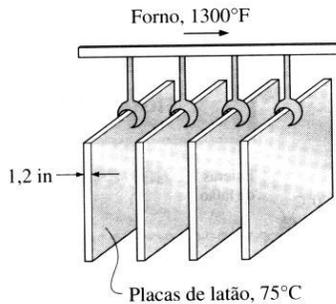
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-126E

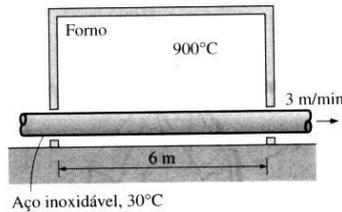


FIGURA P3-127

ambiente de 25° C. Determine a temperatura máxima possível no fim do período de funcionamento de 5 min. Qual seria a sua resposta se ao dispositivo de calor estivesse acoplada uma placa dissipadora de calor de alumínio de 0,2 kg? Considere o dispositivo e a placa dissipadora como sendo quase isotérmicos.

3-125 Um ovo vulgar pode ser comparado a uma esfera de 5,5 cm de diâmetro. Este encontra-se inicialmente a uma temperatura uniforme de 8° C, sendo mergulhado em água a ferver a 97° C. Tomando as propriedades do ovo como $\rho = 1020 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 3,32 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°C)}$, determine o calor transferido para o ovo, quando a sua temperatura atinge os 70° C.

3-126E Numa fábrica, placas quadradas de latão [$\rho = 532,5 \text{ lbf/ft}^3$ e $c_p = 0,091 \text{ Btu/(lbf} \cdot \text{°F)}$] com espessura de 1,2 in e medidas de $2 \times 2 \text{ ft}$, inicialmente a uma temperatura uniforme de 75° F, são aquecidas pela passagem através de um forno, a uma temperatura de 1300° F, com uma cadência de 300 por minuto. Sabendo que as placas permanecem no forno, até que a sua temperatura média aumente para 1000° F, determine a taxa de transferência de calor do forno para estas.

3-127 Varões cilíndricos de aço [$\rho = 7833 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,465 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{°C)}$], de 10 cm de diâmetro, são tratados termicamente pela passagem à velocidade de 3 m/min por um forno de 6 m de comprimento, mantido a 900° C. Sabendo que os varões entram no forno a 30° C e saem a 700° C, determine a taxa de transferência de calor para o forno.

Refrigeração e congelamento de alimentos

3-128C Quais os tipos mais comuns de microrganismos? Que efeitos indesejáveis podem causar nos alimentos?

3-129C De que forma a refrigeração previne ou atrasa a degradação de alimentos? Porque é que o congelamento estende o período de armazenamento durante meses?

3-130C Qual o efeito de cozinhar os alimentos nos microrganismos?

3-131C Qual a diferença entre danos por frio e danos por congelamento em frutos e vegetais?

3-132C Como é que a taxa de congelamento afecta as dimensões dos cristais de gelo que se formam durante o congelamento e a qualidade dos produtos?

3-133C Que tipo de congelamento é mais propenso a causar desidratação: congelamento por sopro de ar ou criogénico?

3-134 Explique como é determinado o calor latente de fusão de alimentos cujo teor de água é conhecido.

3-135C Qual dos feitos apresenta um calor específico superior: alperces cujo teor de água é de 70% ou maçãs cujo teor é de 82%?

3-136C As cenouras congelam a uma temperatura fixa ou numa gama de temperaturas? Justifique.

3-137C Considere 1 kg de cerejas com 75% de água e 1 kg de carne de vaca com 75% de água, ambos à temperatura de 5° C. Congelam-se ambos até -40° C. O calor removido das cerejas será (a) menor que, (b) igual ou (c) maior que o calor removido da carne.

3-138C Porque é que as carcaças perdem até 2% do seu peso quando arrefecidas num recinto de arrefecimento? Como pode esta perda ser minimizada?

3-139C Compare os processos de arrefecimento por imersão e sopro de ar em produtos de aviário, tendo em conta (a) tempo de arrefecimento, (b) perda de água e (c) crescimento de micróbios.

3-140C O que entende por calor de respiração de frutos e legumes?

3-141C Qual o princípio de funcionamento do arrefecimento por vácuo de frutos e legumes? Como pode a perda de humidade ser minimizada neste processo?

3-142C Porque é que não é recomendado o armazenamento de bananas abaixo de 13° C, enquanto se recomenda que as maçãs sejam armazenadas a -1° C?

3-143 Uma caixa de carne de bovino com 35 kg a 6° C, apresentando um conteúdo de água de 60%, é congelada até -20° C em 3 h. Determine (a) a quantidade de calor a remover e (b) a sua taxa de remoção média.

3-144 Uma caixa de 50 kg de cerejas a 8° C e um conteúdo de água de 77% é congelada até -20° C. Determine o calor removido.

3-145 Morangos frescos, com um conteúdo de água de 88% (em massa) e a 30° C, encontram-se colocados em caixas de nylon de 0,8 kg [$c_p = 1,7 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]. Cada caixa contém 23 kg de morangos, sendo estes destinados a ser arrefecidos até uma temperatura média de 4° C, a uma taxa de 60 caixas por hora. Tomando o calor específico médio dos morangos como $c_p = 3,89 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ e sendo a taxa média de calor de respiração de 210 mW/kg, determine a taxa de transferência de calor dos morangos e das caixas, em kJ/h. Qual seria o erro percentual se as caixas fossem ignoradas?

3-146 Pretende-se arrefecer por vácuo alface desde uma temperatura ambiente de 24° C até 2° C, em 45 min, numa câmara esférica com 4 m de diâmetro exterior, e paredes de 3 cm isoladas com camadas de uretano [$k = 0,020 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]. A câmara é carregada com 5000 kg de alface. Desprezando qualquer troca de calor através das paredes, determine (a) a pressão final e (b) a quantidade de água retirada da alface, em kg. Afirmar-se que o erro envolvido em (b), devido a desprezar-se a troca de calor nas paredes, é menor que 2%. Esta afirmação é razoável?

Solução: (a) 0,714 kPa, (b) 0,179 kg.

3-147 Uma caixa de 40 kg de camarão a 8° C é congelada até -18° C. Determine a quantidade de calor que deve ser removida. O calor latente do camarão é de 277 kJ/kg, o calor específico é de 3,62 kJ/(kg · °C) acima do ponto de congelamento e 1,89 kJ/(kg · °C) abaixo deste e a temperatura de congelamento é de -2,2° C. A caixa é de 1,2 kg e é fabricada em polietileno cujo calor específico é de 2,3 kJ/(kg · °C).

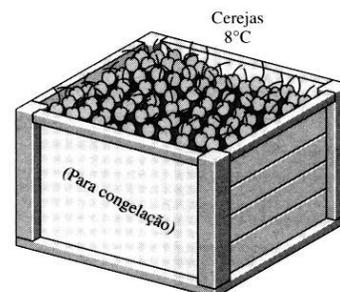


FIGURA P3-144



FIGURA P3-146

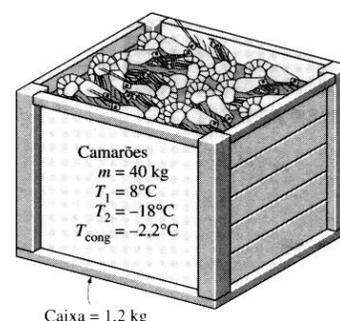


FIGURA P3-147

CAPÍTULO 3

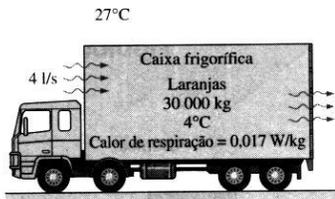
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-150

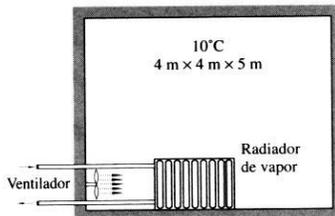


FIGURA P3-151

3-148E Um recinto de armazenamento cujas dimensões internas são de $12 \times 15 \times 30$ ft é mantido a 35°F . Nas piores condições, estima-se uma renovação de ar por infiltração de 0,4 renovações por hora à temperatura ambiente de 90°F . Determine a carga total sensível devida à infiltração.

3-149E Sumo de laranja [$\rho = 62,4 \text{ lbf/ft}^3$, $c_p = 0,900 \text{ Btu}/(\text{lbf} \cdot ^\circ\text{F})$] tem de ser transportado a uma distância de 1250 milhas num contentor cilíndrico de 27 ft de comprimento e 6,3 ft de diâmetro, cujas paredes são isoladas com 0,15 ft de uretano [$k = 0,011 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft} \cdot ^\circ\text{F})$]. O sumo é pré-arrefecido a uma temperatura de 35°F antes do carregamento, não devendo exceder 46°F no destino. A temperatura ambiente média é de 92°F e os efeitos da radiação solar e do pavimento quente equivalem a um acréscimo de 12°F ao valor anterior. Sabendo que a velocidade média durante o transporte é de 35 milhas por hora, determine se o sumo de laranja pode ser transportado sem refrigeração.

3-150 Um camião longo transporta 30 000 kg de laranjas previamente arrefecidas a 4°C à temperatura média ambiente de 27°C . A estrutura das paredes da caixa de carga é tal que a taxa de transferência de calor é de $UA = 80 \text{ W}$ por $^\circ\text{C}$ de diferença de temperatura entre o ar ambiente e as laranjas. Por experiência, o ar infiltra-se na caixa de carga a uma taxa de 0,4 l/s. A taxa média de respiração das laranjas a 4°C é de 0,017 W/kg. Desprezando qualquer condensação e sabendo que a massa volúmica é de $1,15 \text{ kg/m}^3$, determine a carga de refrigeração da caixa de carga e a quantidade de gelo necessária para satisfazer as necessidades de refrigeração para uma viagem de 15 h.

Exercícios de revisão

3-151 Um recinto isolado de $4 \times 4 \times 5 \text{ m}$ inicialmente a 2°C é aquecido por um radiador de um sistema de aquecimento a vapor. O radiador tem um volume de 15 l e é atestado com vapor sobreaquecido a 200 kPa e 200°C . Neste instante fecham-se as válvulas de entrada e saída. Um ventilador de 120 W é utilizado para circular o ar pelo recinto. A pressão do vapor baixa 100 kPa em 30 minutos como resultado da transferência de calor para o recinto. Assumindo o calor específico constante para o ar à temperatura ambiente, determine a sua temperatura média após 30 min. Assuma que a pressão do ar do recinto se mantém constante a 100 kPa.

3-152 Considere um elevador vertical cuja cabina tem uma massa total de 800 kg quando carregada e 150 kg quando vazia. O peso da cabina do elevador é parcialmente equilibrado através de um contrapeso de 400 kg ligado ao topo da cabina através de cabos que passam por uma polia. Desprezando o peso dos cabos e assumindo que as guias e polias não têm atrito, determine (a) a potência requerida para elevar a cabina carregada, a uma velocidade constante de 2 m/s, e (b) a potência requerida para descer a cabina vazia a uma velocidade constante de 2 m/s.

Qual seria a sua resposta para (a), se não fosse utilizado um contrapeso, e para (b), se uma força de atrito de 1200 N actuasse entre a cabina e as guias?

3-153 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém inicialmente ar a 200 kPa e $0,2 \text{ m}^3$. Neste estado, uma mola linear ($F \propto x$) toca no êmbolo sem exercer força. O ar é aquecido até um estado final de $0,5 \text{ m}^3$ e 800 kPa. Determine (a) o trabalho total realizado pelo ar e (b) o trabalho realizado contra a mola. Mostre também o processo num diagrama P - v .

Solução: (a) 150 kJ; (b) 90 kJ.

3-154 Um massa de 5 kg de mistura de líquido e vapor saturado de água está contida num dispositivo cilindro-êmbolo a 100 kPa. Inicialmente, 2 kg da água encontram-se na fase líquida. Transfere-se calor para a água, e o êmbolo, que se encontra em repouso sobre um batente, inicia o seu movimento quando a pressão no interior atinge 200 kPa. A transferência de calor continua, até que o volume total aumenta em 20%. Determine (a) a temperatura inicial e final, (b) a massa da água líquida quando o êmbolo inicia o movimento e (c) o trabalho efectuado durante este processo. Mostre também o processo num diagrama P - v .

3-155E Um balão esférico contém 10 lbm de ar a 30 psia e 800 R. O material do balão é tal que a pressão interior é sempre proporcional ao quadrado do seu diâmetro. Determine o trabalho realizado quando o volume do balão duplica devido à transferência de calor. *Solução:* 715,3 Btu.

3-156 Uma massa de 12 kg de vapor de fluido frigorígeno 134a está contida num dispositivo cilindro-êmbolo a 200 kPa. Transferem-se 250 kJ de calor a pressão constante, enquanto uma fonte de 100 V fornece corrente a uma resistência no interior durante 6 min. Determine a corrente fornecida, se a temperatura final for de 70°C . Mostre também o processo num diagrama T - v com as respectivas linhas de saturação. *Solução:* 15,7 A.

3-157 Uma massa de 0,2 kg de fluido frigorígeno-134a saturado está contida num dispositivo cilindro-êmbolo a 200 kPa. Inicialmente, 75% da massa encontra-se na fase líquida. Transfere-se calor para o fluido a pressão constante até que o cilindro contenha apenas vapor. Mostre o processo num diagrama P - v com as respectivas linhas de saturação. Determine o volume ocupado inicialmente pelo fluido, (b) o trabalho efectuado e (c) a transferência total de calor.

3-158 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém hélio gasoso inicialmente a 150 kPa, 20°C e $0,5 \text{ m}^3$. O gás é comprimido por um processo politrópico ($PV^n = \text{constante}$) até 400 kPa e 140°C . Determine a perda ou ganho de calor durante este processo. *Solução:* 11,2 kJ de perda.

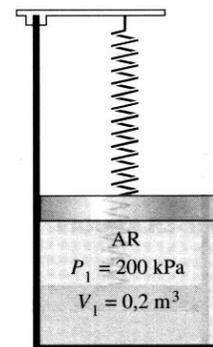


FIGURA P3-153

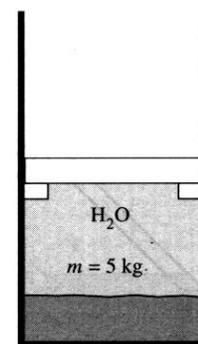


FIGURA P3-154

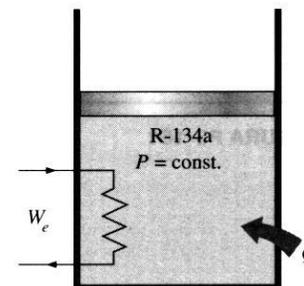


FIGURA P3-156

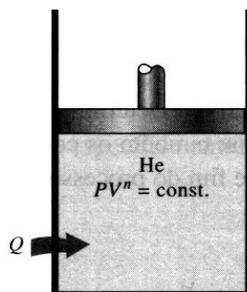


FIGURA P3-158

CAPÍTULO 3

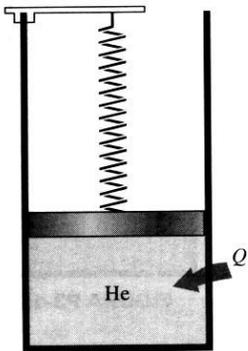
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-160

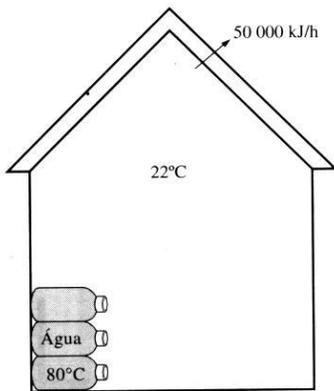


FIGURA P3-161

3-159 Um dispositivo cilindro-êmbolo sem atrito e um reservatório rígido contêm inicialmente 12 kg de um gás perfeito, ambos à mesma temperatura, pressão e volume. Pretende-se elevar a temperatura de ambos os sistemas em 15° C. Determine o montante de calor adicional que deve ser fornecido ao gás contido no cilindro que é mantido a pressão constante durante o processo. Assuma que a massa molar do gás é de 25.

3-160 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém 0,5 m³ de hélio gasoso a 100 kPa e 25° C. Neste estado, uma mola linear toca no êmbolo sem exercer força. Transfere-se calor para o gás, até que ambos, a pressão e o volume, triplicuem. Determine (a) o trabalho realizado e (b) o calor transferido durante o processo. Mostre também o processo num diagrama *P-v*.

Solução: (a) $W_{\text{sai}} = 200 \text{ kJ}$, $Q_{\text{adm}} = 801,4 \text{ kJ}$.

3-161 Uma casa solar passiva, que perde calor para o exterior a uma taxa média de 50 000 kJ/h, é mantida a 22° C constantemente durante 10 h de uma noite de Inverno. A casa é aquecida através de 50 recipientes de vidro contendo cada 20 l de água aquecida a 80° C durante o dia pela absorção de energia solar. Um aquecedor eléctrico suplementar de 15 kW é controlado por um termóstato, ficando ligado sempre que necessário, de forma a manter a temperatura de 22° C. (a) Durante quanto tempo esteve o aquecedor eléctrico ligado naquela noite? (b) Quanto tempo estaria o aquecedor ligado naquela noite se não existisse o sistema de aquecimento solar? *Solução:* (a) 4,77 h; (b) 9,26 h.

3-162 É do conhecimento geral que o vento faz com que se sinta mais a temperatura do ar frio, devido ao efeito de arrefecimento por vento, derivado do acréscimo do coeficiente de transferência de calor por convecção, resultante do aumento da velocidade de circulação. Este efeito é expresso em termos do factor de arrefecimento por vento que representa a diferença entre a temperatura real do ar e a do ar calmo. Por exemplo, um factor de arrefecimento por vento de 20° C para ar a uma temperatura real de 5° C aparenta tanto frio como ar calmo a -15° C. Por outras palavras, uma pessoa irá perder o mesmo calor para o ar a 5° C com um factor de arrefecimento por vento de 20° C do que perderia em ar calmo a -15° C.

Para efeitos de transferência de calor, uma pessoa de pé pode ser modelada através de um cilindro vertical de 30 cm de diâmetro e 170 cm de comprimento, com os topos isolados, em que a temperatura média da superfície lateral é de 34° C. Para um coeficiente de transferência de calor de 15 W/(m² · °C), determine a taxa de perda de calor por convecção deste modelo em ar calmo a 20° C. Qual seria a sua resposta se o coeficiente de transferência de calor por convecção fosse aumentado para 50 W/(m² · °C) devido à presença de vento? Qual o factor de arrefecimento por vento neste caso?

3-163 Um elemento de um aquecedor de resistência eléctrica de 800 W, 50 cm de comprimento, 0,5 cm de diâmetro e 120° C de temperatura é mergulhado em 40 kg de água inicialmente a 20° C. Determine quanto tempo demora para a água chegar a 80° C. Determine também os coeficientes de transferência de calor por convecção no início e fim do processo.

3-164 Uma tonelada (1000 kg) de água líquida a 80°C é trazida para um recinto isolado de $4 \times 5 \times 6\text{ m}$, inicialmente a 22°C e 100 kPa. Considerando os calores específicos do ar e da água à temperatura do recinto, determine a temperatura final de equilíbrio do recinto. *Solução:* $78,6^\circ\text{C}$.

3-165 Um recinto de $4 \times 5 \times 6\text{ m}$ é aquecido por uma tonelada (1000 kg) de água líquida contida num reservatório. O recinto perde calor para o exterior a uma taxa média de 10 000 kJ/h, encontrando-se inicialmente a 20°C e 100 kPa, devendo manter-se sempre esta temperatura. De forma a manter este valor durante um período de 24 h, determine a temperatura inicial da água. Considere os calores específicos do ar e da água à temperatura do recinto.

3-166 Considere um reservatório cilíndrico rígido, isolado que está dividido em dois compartimentos por um êmbolo livre que não permite a passagem de gases. Inicialmente, um dos lados do êmbolo contém 1 m^3 de N_2 gasoso a 500 kPa e 80°C , enquanto o outro contém 1 m^3 de He gasoso a 500 kPa e 25°C . Estabelece-se o equilíbrio térmico devido à transferência de calor através do êmbolo. Utilizando os valores de calor específico à temperatura ambiente, determine a temperatura final de equilíbrio. Qual seria a sua resposta se o êmbolo fosse preso?

3-167 Repita o exercício anterior assumindo que o êmbolo é feito de 5 kg de cobre inicialmente à temperatura média de ambos os gases.

Solução: 56°C .

3-168 No século XIX e inícios do XX, as explosões catastróficas de caldeiras de vapor resultaram em várias mortes que originaram a criação do Código ASME de caldeiras e reservatórios sob pressão em 1915. Considerando que um fluido pressurizado num reservatório atinge o equilíbrio com a vizinhança pouco depois de uma explosão, o trabalho que o fluido iria realizar, se se expandisse adiabaticamente até ao estado da vizinhança, pode ser visto como a *energia explosiva*. Devido ao curto período de tempo de uma explosão e a estabilidade posterior aparente, estes processos podem ser considerados adiabáticos, sem variações de energias cinética e potencial. A expressão de conservação da energia de sistemas fechados neste caso reduz-se a $W_{\text{adm}} = m(u_2 - u_1)$. Então, a energia de explosão E_{exp} é dada por

$$E_{\text{exp}} = m(u_1 - u_2)$$

em que os índices 1 e 2 se referem aos estados inicial e final. A energia específica de explosão e_{exp} é geralmente expressa por *unidade de volume*, obtida pela divisão da expressão anterior pelo volume total do reservatório:

$$e_{\text{exp}} = \frac{u_1 - u_2}{v_1}$$

em que v_1 representa o volume específico antes da explosão.

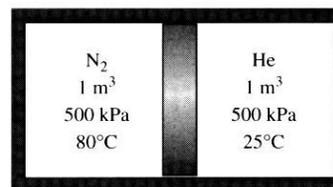


FIGURA P3-166

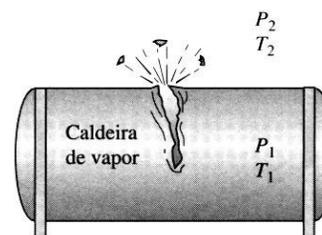


FIGURA P3-168

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

Mostre que a energia específica de explosão de um gás perfeito com calores específicos constantes é

$$e_{\text{exp}} = \frac{P_1}{k-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

Determine também a energia total da explosão de 20 m³ a 5 MPa e 100° C quando a vizinhança se encontra a 20° C.

3-169 Utilizando as expressões do exercício anterior, determine a energia de explosão de 20 m³ de vapor a 10 MPa e 500° C, assumindo que o vapor se condensa a 25° C após a explosão. Esta energia equivale a quanto de TNT? A energia explosiva de TNT é cerca de 3250 kJ/kg.

3-170 O conteúdo energético de certos alimentos é determinado através de um calorímetro de bomba que contém 3 kg de água, e que queima uma amostra de 2 g na presença de 100 g de ar na câmara de reacção. Se a temperatura da água aumentar em 3,2° C quando se atingir o equilíbrio, determine o conteúdo energético em kJ/kg, desprezando a energia armazenada na câmara e a fornecida pelo agitador. Qual a estimativa de erro envolvido por não incluir a energia armazenada na câmara? *Solução:* 20 083 kJ/kg.

3-171 Um homem de 68 kg, cuja temperatura média é de 38° C, bebe 1 l de água fria a 3° C numa tentativa de arrefecer. Tomando o calor específico médio do corpo de 3,6 kJ/(kg · °C), determine a queda da temperatura média devido à água fria.

3-172 Um copo com 0,2 l de água a 20° C é arrefecido com gelo até 5° C. Determine quanto gelo é necessário, em gramas, se ele se encontrar a (a) 0° C e (b) a -8° C. Determine também a quantidade de água necessária se o arrefecimento for realizado com água fria a 0° C. A temperatura e o calor de fusão da água à pressão atmosférica é de 0° C e 333,7 kJ/kg e a massa volúmica de 1 kg/l.

3-173 De forma a arrefecer 1 t (1000 kg) de água a 20° C contida num reservatório isolado, adicionam-se 80 kg de gelo a -5° C. Determine a temperatura final de equilíbrio. A temperatura e o calor de fusão da água à pressão atmosférica são de 0° C e 333,7 kJ/kg. *Solução:* 12,4° C.

3-174 Um dispositivo cilindro-êmbolo isolado contém inicialmente 0,1 m³ de uma mistura de líquido e vapor saturado com um título de 0,2 a 100° C. Adiciona-se algum gelo a 0° C. Sabendo que o cilindro contém líquido saturado a 100° C quando se alcança o equilíbrio térmico, determine a quantidade de gelo adicionada. A temperatura e o calor de fusão do gelo à pressão atmosférica são de 0° C e 333,7 kJ/kg.

3-175 Os primeiros motores a vapor eram movidos pela pressão atmosférica que actuava num êmbolo situado num cilindro cheio com vapor saturado. Criava-se uma depressão no interior do cilindro através do arrefecimento externo deste com água fria que provocava a condensação do vapor.

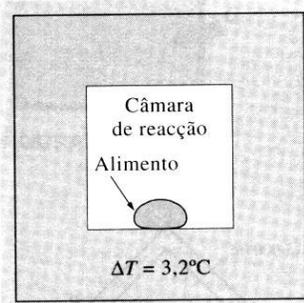


FIGURA P3-170

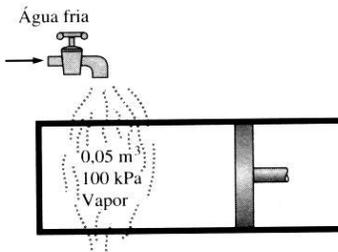


FIGURA P3-175

Considere um dispositivo cilindro-êmbolo em que a área do êmbolo é de $0,1 \text{ m}^2$, inicialmente cheio com $0,05 \text{ m}^3$ de vapor saturado à pressão atmosférica de 100 kPa . Arrefece-se o exterior do cilindro com água fria, iniciando a condensação do vapor, devido à transferência de calor. Se o êmbolo se encontra preso na posição inicial, determine a força de atrito actuando neste e o valor da transferência de calor quando a temperatura no interior baixar para 30° C .

3-176 A taxa de perda de calor através de uma superfície unitária de uma janela por unidade de diferença de temperatura entre o interior e o exterior é chamada factor U . O valor deste factor encontra-se compreendido entre $1,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [ou $0,22 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$], para janelas com tratamento superficial de baixo valor de emissividade com 4 painéis preenchidos com argon, até $6,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [ou $1,1 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$], para janelas de painel simples com caixilho de alumínio. Determine a gama da taxa de perda de calor através de uma janela de $1,2 \times 1,8 \text{ m}$ de uma residência mantida a 20° C quando a temperatura exterior é de -8° C .

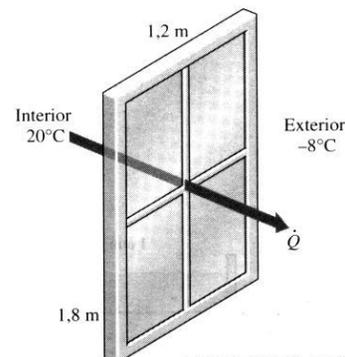


FIGURA P3-176

3-177 Considere uma casa em Atlanta, Jórgia, mantida a 22° C e apresenta uma área envidraçada total de 20 m^2 . As janelas são de duplo painel com caixilhos de madeira e espaçadores metálicos apresentando um factor U de $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (ver o exercício anterior para a definição do factor U). A temperatura média no Inverno neste local é de $11,3^\circ \text{ C}$. Determine a taxa média de perda de calor através das janelas no Inverno.

3-178E Brócolos molhados são arrefecidos por vácuo desde a temperatura ambiente de 75° F até 40° F numa hora numa câmara de vácuo esférica isolada de 15 ft de diâmetro exterior. Esta contém $15\,000 \text{ lbm}$ de brócolos quando carregada, sendo 2% desta massa devida à água que se mantém à superfície dos vegetais durante a lavagem. Desprezando qualquer transferência de calor através das paredes da câmara, determine a massa final dos brócolos depois de arrefecidos.

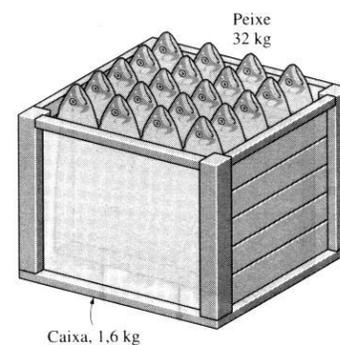


FIGURA P3-179

3-179 Uma caixa de $1,6 \text{ kg}$ feita de polipropileno [$c_p = 1,9 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] contém 32 kg de bacalhau com um conteúdo de água de 83% (de massa) a 16° C . O peixe destina-se a ser congelado a uma temperatura média de -20° C em 4 horas dentro da caixa. O calor específico do peixe é de $3,62 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ acima da temperatura de congelamento de $-2,2^\circ \text{ C}$ e de $1,89 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ abaixo desta. Determine (a) a quantidade de calor que deve ser removido do peixe e (b) a taxa média de calor retirado do peixe.

3-180 Água é aquecida ao nível do mar numa máquina de café equipada com uma resistência eléctrica de aquecimento emersa. A capacidade da máquina é de 1 l de água. Quando se inicia a ebulição, nota-se que metade da água se evapora em 25 min . Determine a potência da resistência eléctrica. Determine também quanto tempo demorará para que esta resistência eleve a temperatura de um litro de água desde 18° C até à ebulição.

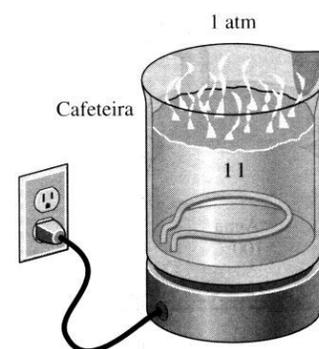


FIGURA P3-180

CAPÍTULO 3

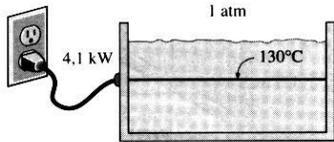
Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

FIGURA P3-184

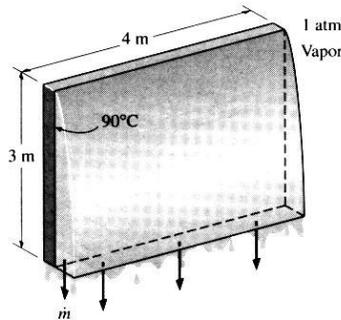


FIGURA P3-185

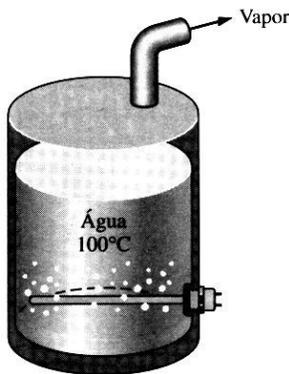


FIGURA P3-186

3-181 Numa caldeira a gás é fervida água a 150°C pelo escoamento de gases quentes através de condutas submersas de aço inoxidável, com 50 m de comprimento e 5 cm de diâmetro exterior. Sabendo que a temperatura exterior é de 165°C e o coeficiente médio de transferência de calor é de $6200\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, determine (a) a taxa de transferência de calor dos gases quentes para a água, e (b) a taxa de evaporação de água.

3-182 Num gerador de vapor entra água fria entra a 20°C e sai como vapor saturado a 100°C . Determine a fracção de calor usado no gerador de vapor para aquecer a água líquida de 20°C até à temperatura de saturação de 100°C .

3-183 Água fria entra num gerador de vapor a 20°C e sai como vapor saturado à pressão da caldeira. A que pressão será o calor necessário para pré-aquecer a água até à temperatura de saturação igual ao calor necessário para vaporizar o líquido na caldeira.

3-184 Uma resistência eléctrica de 2 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento submersa em água é usada para determinar experimentalmente o coeficiente de transferência de calor de ebulição à pressão atmosférica. Quando um medidor de potência indica um consumo de 4,1 kW, a temperatura do elemento é de 130°C . Com base na lei de arrefecimento de Newton, calcule o coeficiente de transferência de calor por ebulição.

3-185 Vapor saturado a 1 atm condensa-se na superfície de uma placa vertical com 3 m de altura e 4 m de largura, mantida a 90°C pela circulação de água fria na superfície oposta. Sabendo que o coeficiente médio de transferência de calor é de $5800\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, determine (a) a taxa de transferência de calor para a placa devido à condensação e (b) a taxa a que o líquido condensado goteja no fundo da placa.

3-186 É fervida água a 100°C através de uma resistência eléctrica de 5 kW, com 50 cm de comprimento e 2 mm de diâmetro. Determine (a) a taxa de evaporação da água e (b) o fluxo de calor na superfície da resistência.

3-187 Em edifícios com aquecimento por painéis solares, a energia é vulgarmente armazenada sob a forma de calor sensível em rochas, betão ou água durante o dia para ser utilizada durante a noite. De forma a minimizar o espaço de armazenamento recomenda-se o emprego de um material que retenha uma grande quantidade de calor com pequena variação de temperatura. É possível armazenar uma grande quantidade de calor durante um processo de mudança de fase a temperatura constante, sendo os materiais que mudam de fase a temperaturas próximas da ambiente, tal como decaidrato de sulfato de sódio que apresenta um ponto de fusão de 32°C e calor de fusão de $329\text{ kJ}/\text{l}$, os apropriados para este objectivo. Determine quanto calor é possível armazenar num espaço de 5 m^3 utilizando (a) decaidrato de sulfato de sódio num processo de mudança de fase, (b) rochas graníticas com capacidade calorífica de $2,32\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ e uma variação de 20°C e (c) água com capacidade calorífica de $4,00\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ e uma variação de temperatura de 20°C .

3-188 Considere um dispositivo cilindro-êmbolo isolado contendo 4 kg de água líquida e 1 kg de vapor de água a 120°C , sendo mantido a pressão constante. Deixa-se cair um bloco de 5 kg de cobre a 30°C no interior do cilindro. Determine a temperatura no interior após se atingir o equilíbrio térmico e a massa de vapor neste estado final.

3-189 A pressão manométrica de um pneu de um automóvel é de 200 kPa antes de uma viagem e 220 após esta, num local em que a pressão atmosférica é de 90 kPa. Admitindo que o volume do pneu se mantém constante em $0,022 \text{ m}^3$, determine o aumento de temperatura do ar no interior do pneu durante a viagem. Considere os calores específicos constantes à temperatura ambiente.

Exercícios de computação, projecto e trabalhos

3-190 Escreva um programa de computador para expressar a variação do calor específico \bar{c}_p do ar com a temperatura através de um polinómio de terceiro grau, utilizando os dados da Tabela A-2b. Compare os resultados com os dados da Tabela A-2c.

3-191 Descubra como os calores específicos de gases, líquidos e sólidos são determinados nos laboratórios de investigação. Descreva o equipamento e o procedimento experimental usado.

3-192 Utilizando a informação das facturas de energia do mês mais frio do ano anterior, estime a taxa média de perda de calor da sua residência nesse mês. Na sua análise considere a contribuição das fontes de calor internas, tais como pessoas, lâmpadas e electrodomésticos. Identifique as principais fontes de perda de calor da sua residência, e proponha formas de melhorar a eficiência energética.

3-193 Projecte uma experiência completa com instrumentação, para determinar o calor específico de um gás, utilizando um aquecedor de resistência. Exponha como conduzirá a experiência, quais as medidas que necessitará de tomar e como determinará o calor específico. Quais são as fontes de erro no seu sistema? Como pode minimizar o erro experimental?

3-194 Projecte uma experiência completa com instrumentação, para determinar o calor específico de um líquido, utilizando um aquecedor de resistência. Exponha como conduzirá a experiência, quais as medidas necessitará de tomar e como determinará o calor específico. Quais são as fontes de erro no seu sistema? Como pode minimizar o erro experimental? Como poderia modificar o sistema para determinar o calor específico de um sólido?

3-195 Projecte um compressor alternativo capaz de fornecer ar a 800 kPa com um caudal de 15 kg/min. Especifique também a capacidade do motor eléctrico para accionar o compressor. A velocidade de funcionamento deste último não deve exceder 2000 rpm (rotações por minuto).

3-196 Realize a seguinte experiência para determinar o coeficiente de transferência de calor entre o bolbo de uma lâmpada incandescente e o ar circundante, utilizando uma lâmpada de 60 W. Necessitará de um termómetro interior — exterior e cola para metais. Necessitará também de um cordel e uma régua para calcular a área da superfície da lâmpada. Meça primeiro a temperatura do ar na sala e depois cole a ponta do termopar do termómetro ao vidro da lâmpada. Ligue a lâmpada e aguarde até que a leitura da temperatura estabilize. Assumindo que 10% da potência nominal da lâmpada é convertida em luz, calcule o coeficiente de transferência de calor através da lei de Newton do arrefecimento.

CAPÍTULO 3

Primeira lei da termodinâmica:
sistemas fechados

3-197 Foi-lhe pedido para projectar um sistema de aquecimento para uma piscina com 2 m de profundidade, 25 m de comprimento e 25 m de largura. O seu cliente deseja que o sistema seja suficientemente potente, de modo a poder elevar a temperatura da água de 20 para 30° C em 3 h. A taxa de perda de calor da água para o ar nas condições exteriores de projecto é de 960 W/m², e a caldeira deverá também ser capaz de manter a piscina a 30° C nessas condições. As perdas de calor para o solo poderão ser desprezadas. A caldeira é a gás natural cujo rendimento é de 80%. Qual a capacidade (em Btu/h de entrada) da caldeira que recomendaria ao seu cliente?

3-198 Um artigo do departamento de estado de energia (FS #204) de 1982 informa que uma fuga de uma gota de água quente por segundo pode custar €1,00 por mês. Fazendo estimativas razoáveis sobre a dimensão da gota e o custo unitário de energia, determine se esta afirmação é credível.