

Primeira lei da termodinâmica: volumes de controlo

CAPÍTULO

4

No Capítulo 3 foram discutidas as interações de energia entre um sistema e a sua vizinhança e o princípio de conservação da energia aplicado a sistemas fechados. Neste capítulo, esta análise irá ser estendida a sistemas que envolvem escoamento de massa através das suas fronteiras, ou seja, *volumes de controlo*. A equação de conservação da energia para um volume de controlo geral pode ser bastante complexa e intimidante. Portanto, a análise da energia de um volume de controlo irá ser efectuada em dois estágios. Serão considerados, em primeiro lugar, *processos de escoamento em regime permanente*, que é o modelo de diversos dispositivos de engenharia, tais como turbinas, compressores e permutadores de calor. Em segundo lugar, discutem-se os processos gerais de escoamento em regime não permanente, dando ênfase a *processos de escoamento uniforme*, que é o modelo para processos de carga e descarga vulgarmente encontrados.

CAPÍTULO 4

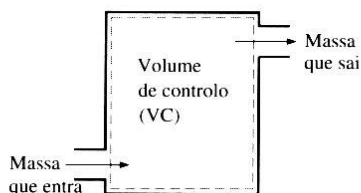
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-1

A massa pode entrar ou sair de um volume de controlo.

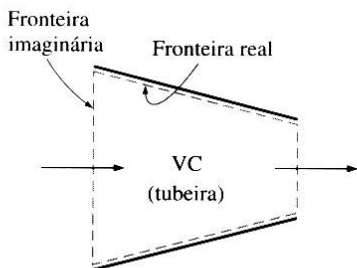


FIGURA 4-2

Fronteiras real e imaginária de um volume de controlo.

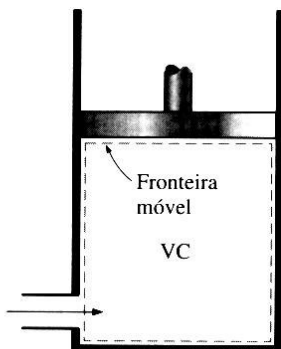


FIGURA 4-3

Alguns volumes de controlo envolvem fronteiras móveis.

4-1 ■ ANÁLISE TERMODINÂMICA DE VOLUMES DE CONTROLO

Um grande número de problemas de engenharia envolve o escoamento de massa de e para um sistema, sendo modelados como *volumes de controlo* (Figura 4-1). Um esquentador, um radiador de automóvel, uma turbina ou um compressor envolvem todos um escoamento de massa devendo ser analisados como volumes de controlo (sistemas abertos) em vez de massas de controlo (sistemas fechados). Em geral, *qualquer região arbitrária do espaço* pode ser seleccionada como um volume de controlo. Não existem regras concretas para esta selecção, mas, no entanto, uma escolha apropriada torna a sua análise mais fácil. Por exemplo, a escolha adequada de um volume de controlo para a análise do escoamento de ar através de difusor seria feita através de uma região incluída neste último.

As fronteiras de um volume de controlo são chamadas *superfície de controlo*, podendo ser reais ou imaginárias. Para o caso do difusor, a superfície interior forma a parte real da fronteira, enquanto as zonas de entrada e de saída formam a imaginária, visto que não existem superfícies físicas (Figura 4-2).

Um volume de controlo pode ser fixado em tamanho e forma, como acontece difusor, ou pode envolver uma fronteira móvel, como ilustra a Figura 4-3. Contudo, a maior parte dos volumes de controlo tem fronteiras fixas, não envolvendo qualquer trabalho de fronteira móvel. Um volume de controlo pode também envolver interacções de trabalho e de calor, tal como um sistema fechado, em adição à interacção de massa.

Os termos *permanente* e *uniforme* serão empregues ao longo deste capítulo, sendo importante o entendimento dos seus significados. O termo permanente implica a *invariabilidade com o tempo*, sendo o oposto inconstante ou transiente. Contudo, o termo uniforme implica a invariabilidade com a localização, numa região especificada. Estes significados são consistentes com a sua utilização corrente.

Em seguida, será apresentada uma breve exposição dos princípios de conservação da massa e da energia.

Princípio de conservação da massa

A conservação da massa é um dos princípios fundamentais na natureza. Não é necessário ser-se engenheiro para se determinar a quantidade de molho que se faz com 100 g de azeite e 25 g de vinagre.

Por exemplo, as equações químicas são equilibradas com base no princípio de conservação da massa. Quando 16 kg de oxigénio reagem com 2 kg de hidrogénio, formam-se 18 kg de água (Figura 4-4). Num processo de electrólise, a água separa-se em 2 kg de hidrogénio e 16 kg de oxigénio.

A massa, tal como a energia, é uma propriedade de conservação, não podendo ser criada ou destruída. Contudo, a massa m e a energia E podem ser convertidas uma na outra, de acordo com a conhecida fórmula proposta por Einstein:

$$E = mc^2$$

Em que c é a velocidade da luz. Esta equação sugere que a massa de um sistema irá variar com a alteração da energia. Contudo, para todas as interacções

de energia encontradas na prática, com a excepção de reacções nucleares, a variação da massa é extremamente reduzida, não podendo ser detectada mesmo com instrumentos muito sensíveis. Por exemplo, quando se forma 1 kg de água a partir de oxigénio e de hidrogénio, a quantidade de energia libertada é de 15 879 kJ que correspondem a uma massa de $1,76 \times 10^{-10}$ kg. Um valor deste tipo está fora da precisão requerida por praticamente todos os cálculos de engenharia, podendo ser desprezado.

Para sistemas fechados, o princípio de conservação da massa é usado de forma implícita ao requerer que a massa de um sistema permaneça constante durante o processo. Para volumes de controlo, a massa, pode atravessar fronteiras, sendo necessário conhecer a quantidade que entra e que sai do volume de controlo (Figura 4-5).

O **princípio de conservação da massa** pode ser expresso do seguinte modo: *o balanço de massa transferida de ou para um sistema durante um processo é igual à variação (aumento ou decréscimo) da massa total durante o processo*, ou seja,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Massa total} \\ \text{que entra no sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Massa total} \\ \text{que sai do sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Variação total} \\ \text{da massa do sistema} \end{array} \right)$$

ou

$$m_{\text{adm}} - m_{\text{sai}} = \Delta m_{\text{sistema}} \quad (\text{kg}) \quad (4-1)$$

Podendo ser expresso sob a forma de taxa:

$$\dot{m}_{\text{adm}} - \dot{m}_{\text{sai}} = \Delta \dot{m}_{\text{sistema}} \quad (\text{kg/s}) \quad (4-2)$$

Em que \dot{m}_{adm} e \dot{m}_{sai} são os caudais totais de escoamento da massa para dentro e para fora do sistema e $\Delta \dot{m}_{\text{sistema}}$ (ou dm_{sistema}/dt) é a taxa de variação da massa no interior das fronteiras do sistema. As relações anteriores são vulgarmente referidas como **balanço de massa**, sendo aplicáveis a qualquer tipo de sistema sujeito a qualquer tipo de processo.

O princípio de conservação da massa é baseado em observações experimentais, sendo necessário contabilizar toda e qualquer fracção de massa interveniente num processo.

A equação de conservação da massa é referida como a *equação da continuidade*, na mecânica dos fluidos.

Caudais mássicos e volúmicos

A quantidade de massa que escoa através, uma secção por unidade de tempo denomina-se **caudal mássico** sendo denotado por \dot{m} . Como atás o ponto sobre o símbolo é usado para indicar a quantidade por unidade de tempo.

Considere um líquido ou um gás que se escoa através de um volume de controlo. O caudal mássico do fluido é proporcional à área A da secção

Análise termodinâmica de volumes de controlo

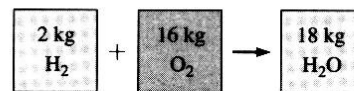


FIGURA 4-4

A massa mantém-se constante, mesmo durante as reacções químicas.

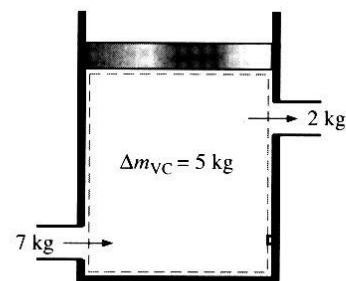


FIGURA 4-5

Princípio de conservação da massa para um volume de controlo.

CAPÍTULO 4

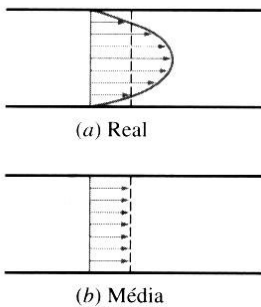
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-6

Perfis de velocidade real e média para um escoamento num tubo (o caudal mássico é igual para ambos).

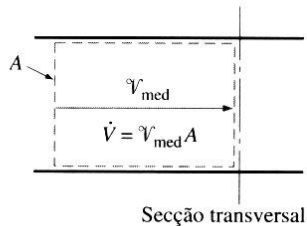


FIGURA 4-7

O caudal volúmico representa o volume de fluido que se escoou através de uma secção transversal por unidade de tempo.

da conduta, à massa volúmica ρ e à velocidade \mathcal{V} do fluido. A taxa de escoamento da massa através de uma área diferencial dA pode ser expressa por

$$d\dot{m} = \rho \mathcal{V}_n dA \quad (4-3)$$

Em que \mathcal{V}_n é a componente da velocidade normal a dA . O caudal de massa através da área da secção da conduta é obtido pela integração:

$$\dot{m} = \int_A \rho \mathcal{V}_n dA \quad (\text{kg/s}) \quad (4-3)$$

Na maioria das aplicações, o escoamento de um fluido através de uma conduta pode ser tido como um **escoamento unidimensional**. Ou seja, as propriedades variam somente numa direcção (a do escoamento). Como resultado, as propriedades são uniformes na direcção normal à do escoamento, considerando-se ter *valores médios na secção*. No entanto, os valores destas propriedades podem variar com o tempo.

A aproximação de escoamento unidimensional tem pouca importância na maioria das propriedades de um fluido, tais como temperatura, pressão e massa volúmica, visto que estas permanecem constantes ao longo da secção. Contudo, isto não se verifica para a *velocidade* cujo valor varia desde zero, junto à parede, até um, o máximo, no centro, devido aos efeitos da viscosidade (atrito entre as camadas de fluido). No pressuposto de um escoamento unidimensional, a velocidade é tida como constante ao longo de toda a secção, tendo um valor médio equivalente (Figura 4-6). Então, a integração na Equação 4-4 pode ser realizada obtendo-se

$$\dot{m} = \rho \mathcal{V}_{\text{med}} A \quad (\text{kg/s}) \quad (4-5)$$

em que

$$\begin{aligned} \rho &= \text{massa volúmica, kg/m}^3 (= 1/v) \\ \mathcal{V}_{\text{med}} &= \text{velocidade média do fluido normal a } A, \text{ m/s} \\ A &= \text{área da secção normal à direcção do escoamento, m}^2 \end{aligned}$$

O volume de fluido por unidade de tempo denomina-se **caudal volúmico** \dot{V} (Figura 4-7), sendo dado por

$$\dot{V} = \int_A \mathcal{V}_n dA = \mathcal{V}_{\text{med}} A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4-6)$$

Os caudais mássicos e volúnicos estão relacionados por

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v} \quad (4-7)$$

Esta relação é análoga à de $m = V/v$ que representa a relação entre a massa e o volume de um fluido num reservatório.

De forma a simplificar, elimina-se o índice na velocidade média. Assim, salvo menção, V denota a velocidade média na direcção do escoamento, e A , a área normal à direcção do escoamento.

Balanço de energia para um volume de controlo

Expressou-se no Capítulo 3 o princípio de conservação da energia (ou balanço de energia) para *qualquer sistema* sujeito a *qualquer processo*, como por exemplo a *variação (aumento ou decréscimo) da energia total de um sistema ser igual à diferença entre a energia total que entra e a que sai do sistema*. Foi também sublinhado que a energia pode ser transferida de ou para um sistema, sob três formas — *calor, trabalho e escoamento de massa* —, consistindo a energia total de um sistema simples nas energias cinética e potencial. Assim, o balanço de energia pode ser descrito por

$$\underbrace{E_{\text{adm}} - E_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \quad (\text{kJ}) \quad (4-8)$$

ou, na forma de taxa, por

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \quad (\text{kW}) \quad (4-9)$$

No Capítulo 3 consideraram-se sistemas que envolviam somente transferência de calor e de trabalho como interacção de energia (sistemas fechados). Neste capítulo, a análise será estendida a sistemas que envolvem troca de massa nas fronteiras (volumes de controlo).

O escoamento de massa serve como mecanismo adicional para alterar o conteúdo de energia de um sistema (Figura 4-8). Quando a massa entra num volume de controlo, a energia deste aumenta devido a a massa transportar alguma energia com ela. O contrário verifica-se quando a massa sai do volume de controlo. Por exemplo, quando se retira água quente de uma caldeira sendo restituído o mesmo valor em água fria, o conteúdo de energia do volume de controlo decresce, como resultado da interacção de massa.

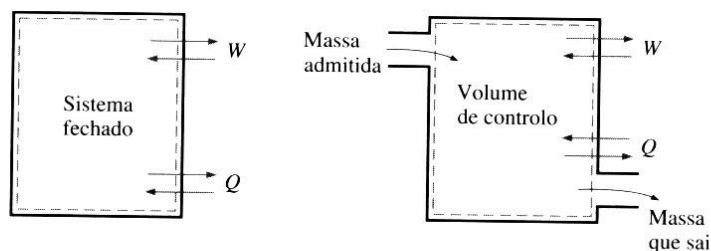


FIGURA 4-8

O conteúdo da energia contida num volume de controlo pode variar devido à troca de massa e a interacções de trabalho e de calor.

CAPÍTULO 4
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

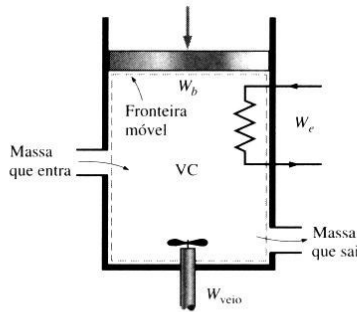


FIGURA 4-9
 Um volume de controlo pode envolver trabalho de fronteira eléctrica e de veio.

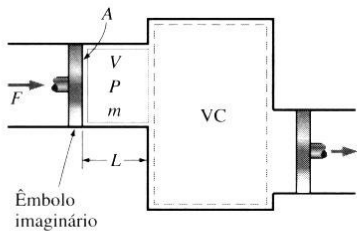


FIGURA 4-10
 Esquema para trabalho de escoamento.

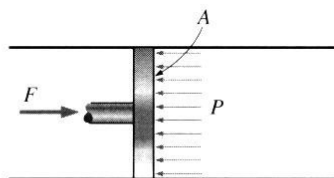


FIGURA 4-11
 Na ausência de aceleração, a força aplicada num fluido por um êmbolo é igual à força aplicada no êmbolo pelo fluido.

O calor transferido de ou para o volume de controlo não deve ser confundido com a energia transportada com a massa. Note-se que o calor resulta da diferença de temperatura entre o volume de controlo e a sua vizinhança.

Como num sistema fechado, um volume de controlo pode envolver uma ou mais formas de trabalho ao mesmo tempo (Figura 4-9). Se a fronteira for estacionária, o trabalho de fronteira é nulo. Então, o termo de trabalho irá envolver, no máximo, trabalho de veio e eléctrico para sistemas compressíveis simples. Como anteriormente, quando um volume de controlo é isolado, o termo de transferência de calor é nulo.

A energia necessária para circular o fluido para dentro e para fora do volume de controlo denomina-se *trabalho de escoamento* ou *energia de escoamento*, sendo considerado parte da energia transportada com o fluido.

Trabalho de escoamento

Ao contrário de sistemas fechados, os volumes de controlo envolvem escoamento de massa através das suas fronteiras, sendo necessário algum trabalho para movimentar a massa. Este trabalho denomina-se **trabalho de escoamento** ou **energia de escoamento**, sendo necessário para manter o escoamento contínuo através do volume de controlo.

De forma a obter uma relação para o trabalho de escoamento, considere um elemento de fluido de volume V , como ilustra a Figura 4-10. O fluido imediatamente a montante irá forçar este elemento do fluido para entrar no volume de controlo; então, pode tomar-se este como um êmbolo imaginário. Os elementos do fluido podem ser escolhidos, de modo a serem suficientemente pequenos, apresentando propriedades uniformes.

Se a pressão for P , e a área da secção do elemento, A (Figura 4-11), a força aplicada no elemento através de um êmbolo imaginário é

$$F = PA$$

Para movimentar todo o elemento de fluido para o interior do volume de controlo, a força deve actuar ao longo da distância L ; assim, o trabalho realizado pelo elemento do fluido através da fronteira (trabalho de escoamento) é

$$W_{esc} = FL = PAL = PV \quad (\text{kJ}) \quad (4-10)$$

O trabalho de escoamento por unidade de massa é obtido pela divisão de ambos os termos da equação pela massa do elemento do fluido:

$$w_{esc} = Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-11)$$

A relação de trabalho de escoamento é independente do sentido deste (Figura 4-12).

Este é um facto interessante, visto que o trabalho de escoamento é expresso em termos de propriedades. De facto, este é um produto de duas propriedades de um fluido. Por esta razão é visto como uma *propriedade combinada* (como a entalpia), sendo referido como a *energia de escoamento*, ou *energia transportada* em vez de trabalho de escoamento. Porém, existe um argumento válido de que o produto Pv representa unicamente a energia de fluidos em escoamento,

não representando qualquer forma de energia em sistemas fechados. Portanto, deve ser tratado como trabalho. Não se entrevê o fim desta controvérsia mas, no entanto, ambos os argumentos originam resultados idênticos para a equação de energia. Nas discussões seguintes, considera-se o escoamento de energia como sendo parte da energia de um fluido em escoamento, visto que simplifica a derivação da equação da energia para volumes de controle.

Energia total de um fluido em escoamento

Como foi discutido no Capítulo 1, a energia total de um sistema compressível simples é constituída por três componentes: energias interna, cinética e potencial (Figura 4-13), podendo ser expressa por unidade de massa como:

$$e = u + ec + ep = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-12)$$

em que V representa a velocidade e z a cota do sistema em relação a um referencial.

O fluido que entra ou sai de um volume de controle possui uma forma adicional de energia — a de *escoamento* Pv , como foi exposto acima. Então, a energia total por unidade de massa (denotado por θ) de um **fluido em escoamento** é

$$\theta = h + ec + ep = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-13)$$

Em 1966, o prof. J. Kestin propôs a denominação do termo θ como **entalpia** (de *metaentalpia*, que quer dizer *para além da entalpia*).

Ao usar-se a entalpia em substituição da energia interna na caracterização da energia de um fluido em escoamento, não é necessário ter em conta o trabalho de escoamento. A energia associada ao transporte do fluido de ou para um volume de controle é contabilizada no valor da entalpia, sendo esta a principal razão para definir esta propriedade. A partir deste ponto, a energia de um escoamento de ou para um volume de controle é representada pela Equação 4-13, deixando de se fazer referência ao trabalho ou energia de escoamento. Então, o termo de trabalho W nas equações de energia representa todas as formas de trabalho (fronteira, veio, eléctrico, etc.), excepto o trabalho de escoamento.

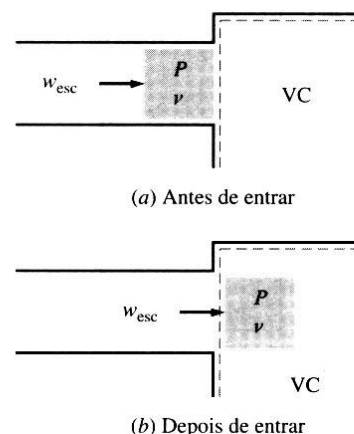


FIGURA 4-12

O trabalho de escoamento representa a energia necessária para deslocar um fluido de ou para um volume de controle, sendo igual a Pv .

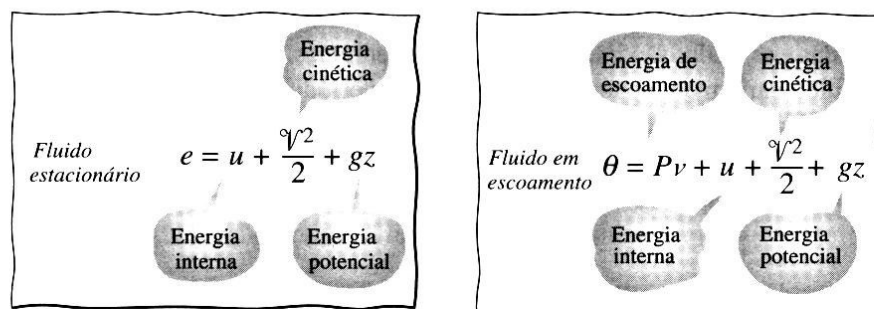


FIGURA 4-13

A energia total consiste em três partes para um fluido estacionário e quatro para um fluido em escoamento.

CAPÍTULO 4

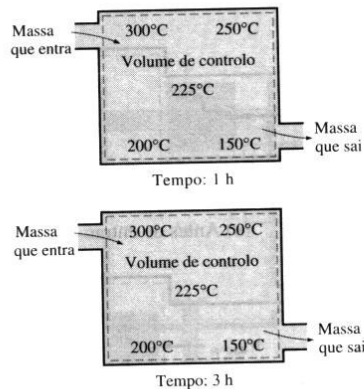
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-14

Durante um processo de escoamento em regime permanente, as propriedades de um fluido podem variar com a posição mas não com o tempo.

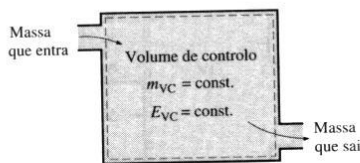


FIGURA 4-15

Sob condições de escoamento em regime permanente, os conteúdos de massa e de energia permanecem constantes.

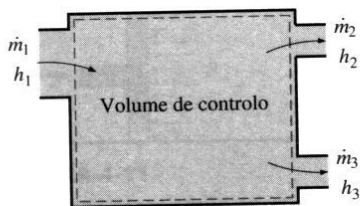


FIGURA 4-16

Sob condições de escoamento em regime permanente, as propriedades do fluido na entrada e na saída permanecem constantes (mas variam com o tempo).

4-2 ■ ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE

Um grande número de dispositivos de engenharia, como turbinas, compressores e difusores, funciona durante longos períodos de tempo nas mesmas condições, sendo classificados como dispositivos de escoamento em regime permanente.

Processos que envolvem este tipo de dispositivos podem ser razoavelmente bem representados através de um processo idealizado denominado **processo de escoamento em regime permanente**, podendo ser definido como um *processo durante o qual um fluido esco continuamente através de um volume de controlo* (Figura 4-14). Ou seja, as propriedades do fluido podem variar de ponto para ponto no interior do volume de controlo, mas num dado ponto fixo, permanecem as mesmas durante todo o processo (note que *permanente* implica *invariabilidade com o tempo*). Este tipo de processos é caracterizado por:

1. Nenhuma propriedade (intensiva ou extensiva) *varia no interior do volume de controlo*. Então, o volume V , a massa m e a energia E permanecem constantes (Figura 4-15). Como resultado, o trabalho de fronteira é nulo (visto que $V_{VC} = \text{constante}$) e a massa total ou energia que entra no volume de controlo deve ser igual à massa ou energia que o deixa (como $m_{VC} = \text{constante}$ e $E_{VC} = \text{constante}$). Estas observações simplificam a análise.
2. As propriedades alteram-se na *fronteira* de volume de controlo com o tempo. Assim, as propriedades de um fluido numa entrada ou saída irão permanecer as mesmas durante todo o processo. No entanto, as propriedades podem ser diferentes em diferentes entradas e saídas. Podem até variar ao longo da secção de uma entrada ou saída. Mas todas as propriedades, incluindo a velocidade e a cota, devem permanecer constantes ao longo do tempo numa dada posição. Assim a taxa de escoamento de massa deve permanecer constante durante um processo em regime permanente (Figura 4-16). Como simplificação adicional, as propriedades de um fluido numa entrada são geralmente consideradas uniformes (a um valor médio) ao longo da secção. Então, as propriedades de um fluido na entrada ou na saída podem ser especificadas através de valores médios únicos.
3. As interações de *calor* e de *trabalho* entre um sistema de escoamento em regime permanente e a sua vizinhança não variam com o tempo. Então, a potência fornecida pelo sistema e a taxa de transferência de calor de ou para o sistema permanecem constantes durante este tipo de processo.

Alguns dispositivos cíclicos, tais como motores alternativos ou compressores, não satisfazem qualquer das condições estabelecidas acima, visto que as entradas e as saídas são intermitentes e não contínuas. Contudo, as propriedades do fluido variam com o tempo de uma forma periódica, e o escoamento através destes dispositivos pode ser analisado como um processo de escoamento em regime permanente, utilizando os valores médios ao longo do tempo, para as propriedades e para as taxas de escoamento de calor através da fronteira.

As condições de escoamento em regime permanente podem ser aproximadas por dispositivos que realmente funcionam continuamente como turbinas, bombas, caldeiras, condensadores e permutadores de calor. As equações desenvolvidas posteriormente nesta secção podem ser usadas para estes dispositivos após superado o período transiente de arranque, mantendo uma operação contínua.

Conservação da massa

Durante um processo de escoamento em regime permanente, a massa contida no volume de controlo não varia com o tempo ($m_{VC} = \text{constante}$); então o princípio de conservação da massa requer que a quantidade de massa total que entra num volume de controlo seja igual à que sai (Figura 4-17).

Neste tipo de processos, não é importante a quantidade de massa que escoar ao longo do tempo, mas sim a quantidade por unidade, ou seja, o *caudal mássico*. O **princípio de conservação da massa** para um sistema generalizado de escoamento em regime permanente com diversas entradas e saídas (Figura 4-18) pode ser expresso, na forma de taxa, como

$$\left(\begin{array}{c} \text{Massa total que entra num} \\ \text{VC por unidade de tempo} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Massa total que sai de um} \\ \text{VC por unidade de tempo} \end{array} \right)$$

ou

$$\sum \dot{m}_a = \sum \dot{m}_s \quad (\text{kg/s}) \quad (4-14)$$

Onde o índice a representa a *entrada* (admissão), e o índice s , a *saída*. A maior parte dos dispositivos, tais como tubeiras, difusores, turbinas, compressores e bombas, envolve um único escoamento (uma entrada e uma saída). Neste caso, denota-se o estado de entrada pelo índice 1, e o de saída, pelo índice 2. Então a Equação 4-14 reduz-se, para um sistema de conduta única:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{kg/s}) \quad (4-15)$$

ou

$$\rho_1 \mathcal{V}_1 A_1 = \rho_2 \mathcal{V}_2 A_2 \quad (4-16)$$

ou

$$\frac{1}{v_1} \mathcal{V}_1 A_1 = \frac{1}{v_2} \mathcal{V}_2 A_2 \quad (4-17)$$

em que

ρ = massa volúmica, kg/m^3

v = volume específico, m^3/kg ($= 1/\rho$)

\mathcal{V} = velocidade média do escoamento na direcção deste, m/s

A = área da secção normal à direcção do escoamento, m^2

O leitor deve recordar-se que não existe nenhum princípio de «conservação do volume». Portanto, os caudais volúnicos ($\dot{V} = \mathcal{V}A$, m^3/s) de entrada e de

Escoamento em regime permanente

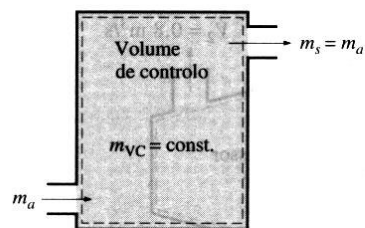


FIGURA 4-17

Durante um processo de escoamento em regime permanente, a quantidade de massa que entra num volume de controlo é igual à que sai.

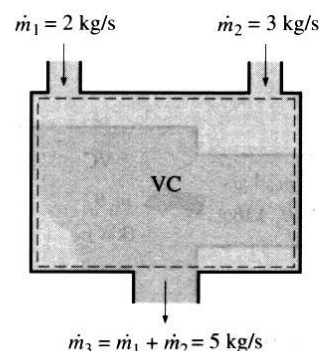


FIGURA 4-18

Princípio de conservação de massa para um sistema com escoamento em regime permanente com duas entradas e uma saída.

CAPÍTULO 4

**Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo**

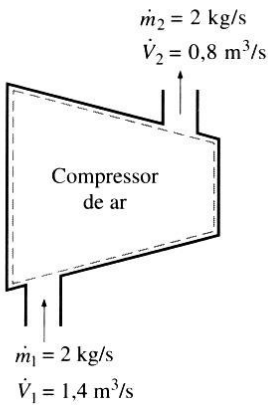


FIGURA 4-19

Durante um processo de escoamento em regime permanente, os caudais volúmicos podem variar.

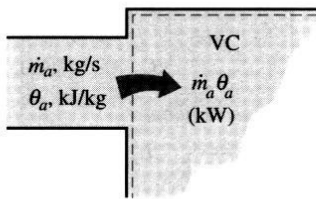


FIGURA 4-20

O produto $\dot{m}_i \theta_i$ representa a energia transportada pela massa para o volume de controlo.

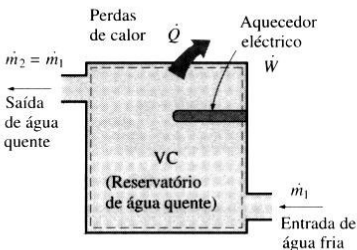


FIGURA 4-21

Um aquecedor de água em funcionamento em regime permanente.

saída num dispositivo de escoamento em regime permanente podem ser diferentes. O caudal volúmico à saída de um compressor de ar irá ser muito menor do que o de entrada, mesmo que o caudal mássico seja constante (Figura 4-19). Isto é devido à maior massa volúmica à saída. No entanto, para escoamento de líquidos os caudais volúmicos e mássicos permanecem constantes, visto que os líquidos são essencialmente incompressíveis. O escoamento de água através de uma tubeira de uma mangueira de jardim é um bom exemplo.

Balanco de energia para sistemas de escoamento em regime permanente

Foi mencionado anteriormente que durante um processo de escoamento em regime permanente o conteúdo de energia total de um volume de controlo permanece constante. Isto é, a variação da energia total durante este tipo de processo é igual a zero. Então, a quantidade de energia que entra sob qualquer forma (calor, trabalho, transferência de massa) deve ser igual à quantidade de energia que sai. Então, a expressão geral do balanço de energia na forma de taxa reduz-se para um processo de escoamento em regime permanente:

$$\underbrace{\dot{E}_{adm} - \dot{E}_{sai}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\overset{0}{\Delta \dot{E}}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} = 0 \quad (4-18)$$

ou

$$\underbrace{\dot{E}_{adm}}_{\substack{\text{Taxa de transferência de energia que entra} \\ \text{sob a forma de calor, de trabalho e de massa}}} = \underbrace{\dot{E}_{sai}}_{\substack{\text{Taxa de transferência de energia que sai} \\ \text{sob a forma de calor, de trabalho e de massa}}} \quad (4-19)$$

Sabendo que a energia pode ser transferida somente por calor, trabalho e massa, a equação acima pode ser escrita como

$$\dot{Q}_{adm} + \dot{W}_{adm} + \sum \dot{m}_a \theta_a = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \sum \dot{m}_s \theta_s \quad (4-20)$$

ou

$$\dot{Q}_{adm} + \dot{W}_{adm} + \underbrace{\sum \dot{m}_a \left(h_a + \frac{V_a^2}{2} + gz_a \right)}_{\text{para cada admissão}} = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \underbrace{\sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)}_{\text{para cada saída}} \quad (4-21)$$

visto que a energia de um fluido em escoamento por unidade de massa é $\theta = h + ec + ep = h + V^2/2 + gz$ (Figura 4-20). A equação da primeira lei para sistemas de escoamento em regime permanente surgiu pela primeira vez em 1859 num livro alemão de termodinâmica escrito por Gustav Zeuner.

Considere por exemplo um aquecedor de água eléctrico vulgar a funcionar de uma forma contínua, como mostra a Figura 4-21. O caudal de água fria, com caudal mássico \dot{m} , esco-a-se continuamente para dentro do dispositivo, enquanto que a água quente sai continuamente deste. O aquecedor de água (volume de

controle) perde calor para a vizinhança com uma taxa de $\dot{Q}_{\text{saí}}$ e o elemento eléctrico fornece trabalho eléctrico para a água a uma taxa de \dot{W}_{adm} . Com base no princípio de conservação da energia pode-se estabelecer que a água irá aumentar a sua energia total à medida que atravessa o aquecedor, sendo igual à energia eléctrica fornecida, menos as perdas de calor.

A expressão de balanço de energia (ou a primeira lei) dada acima é intuitiva na sua forma e de fácil utilização quando se conhecem as magnitudes e direcções das transferências de calor e de trabalho. Quando se executa um estudo analítico geral ou se resolve um problema que envolve uma interacção desconhecida de calor ou de trabalho, é necessário assumir uma direcção para estas interacções. Nestes casos é prática comum assumir o calor a ser transferido *para o sistema* (entrada) com uma taxa de \dot{Q} e a potência produzida *pelo sistema* (saída) com uma taxa de \dot{W} , de modo a resolver o problema. A relação de balanço de energia ou primeira lei para o caso de sistemas de escoamento em regime permanente é

$$\dot{Q} - \dot{W} = \underbrace{\sum \dot{m}_s \left(h_s \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right)}_{\text{para cada saída}} - \underbrace{\sum \dot{m}_a \left(h_a \frac{v_a^2}{2} + gz_a \right)}_{\text{para cada admissão}} \quad (\text{kW}) \quad (4-22)$$

Ou seja, a taxa de transferência de calor, para o sistema, menos a potência produzida por este é igual à variação da energia entre os dois escoamentos. Obtendo um valor negativo para \dot{Q} ou \dot{W} significando que a direcção assumida é errada, devendo ser invertida.

Para sistemas de conduta única (uma entrada/uma saída), os estados de entrada e de saída são denotados pelos índices 1 e 2. A taxa de escoamento de massa ao longo do volume de controlo permanece constante ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$), sendo denotado por \dot{m} . Para este caso, a *equação de balanço de energia* fica

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (\text{kW}) \quad (4-23)$$

Dividindo a equação acima por \dot{m} , tem-se a equação numa base de unidade de massa:

$$q - w = \Delta h + \Delta ec + \Delta ep = h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-24)$$

Em que $q = \dot{Q}/\dot{m}$ e $w = \dot{W}/\dot{m}$ representam o calor transferido e o trabalho realizado por unidade de massa de fluido operante.

Se este fluido apresentar uma variação desprezável das energias potencial e cinética, então a equação da energia é reduzida para

$$q - w = \Delta h \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-25)$$

CAPÍTULO 4

**Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo**

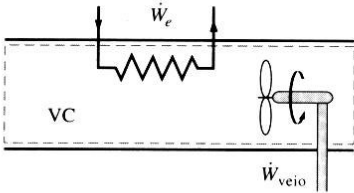


FIGURA 4-22

No funcionamento em regime permanente, trabalhos de veio e eléctrico são as únicas fontes de energia possíveis num sistema compressível simples.

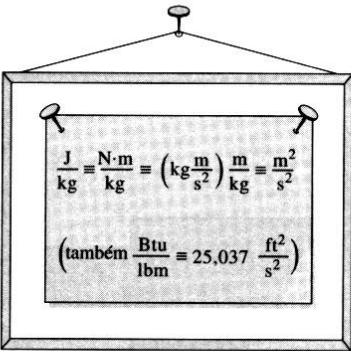


FIGURA 4-23

As unidades m^2/s^2 e J/kg são equivalentes.

V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	Δec (kJ/kg)
0	40	1
50	67	1
100	110	1
200	205	1
500	502	1

FIGURA 4-24

A velocidades muito elevadas, pequenas variações de velocidade podem causar mudanças significativas na energia cinética do fluido.

Os vários termos que surgem nas equações anteriores são:

\dot{Q} = taxa de transferência de calor entre o volume de controlo e a sua vizinhança. Quando o volume de controlo perde calor (como no caso do aquecedor de água), \dot{Q} é negativo. Se o volume de controlo for bem isolado (adiabático), então $\dot{Q} = 0$.

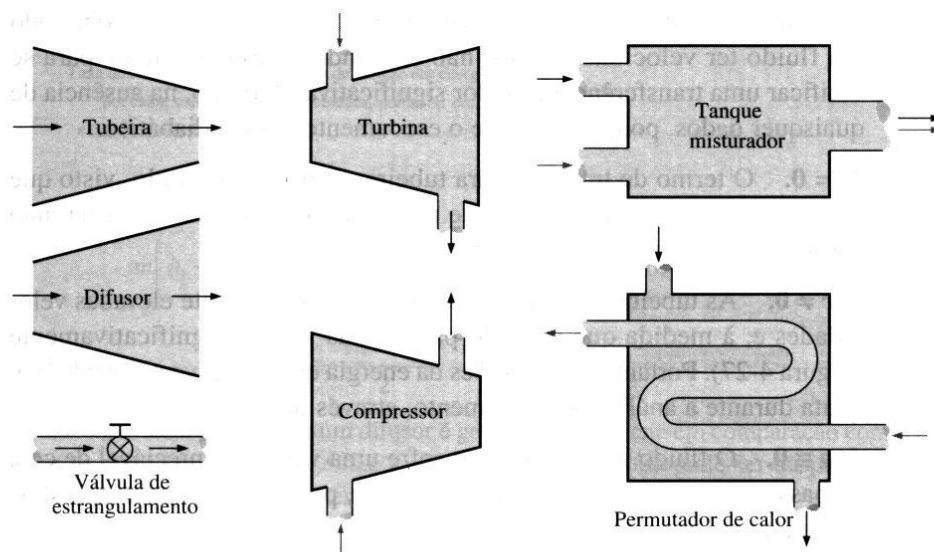
\dot{W} = potência. Para dispositivos de escoamento em regime permanente, o volume de controlo é constante; então não existe trabalho de fronteira. O trabalho necessário para escoar a massa de ou para o dispositivo advém das entalpias em vez das energias internas. Então, \dot{W} representa as restantes formas de trabalho realizadas por unidade de tempo (Figura 4-22). Muitos dispositivos, como turbinas, compressores e bombas transmitem potência através de um veio, sendo \dot{W} o trabalho do veio. Se a superfície de controlo for atravessada por um condutor eléctrico (como no caso do aquecedor eléctrico), \dot{W} representa o trabalho eléctrico por unidade de tempo. Se nenhum está presente, então $\dot{W} = 0$.

$\Delta h = h_{sai} - h_{adm}$. A variação da entalpia pode ser facilmente determinada pela consulta de tabelas. Para os casos de gases perfeitos, pode comparar-se com $\Delta h = c_{p,med}(T_2 - T_1)$. Note-se que $(kg/s)(kJ/kg) \equiv kW$.

$\Delta ec = (V_2^2 - V_1^2)/2$. A unidade de energia cinética é m^2/s^2 que é equivalente a J/kg (Figura 4-23). A entalpia é geralmente dada em kJ/kg . Para adicionar estas duas quantidades, a energia cinética deve ser expressa em kJ/kg . Isto é obtido dividindo o valor por 1000.

A velocidade de 45 m/s corresponde a uma energia cinética a 1 kJ/kg , sendo um valor muito pequeno em comparação com os de entalpia. Assim, para baixas velocidades, o termo de energia cinética pode ser desprezado. Quando um fluido entra ou sai de um dispositivo com velocidades idênticas ($V_1 \equiv V_2$), a variação da energia cinética é próxima de zero, independentemente da velocidade. Contudo, devem tomar-se em conta os valores muito elevados, pois pequenas variações podem causar alterações significativas na energia cinética (Figura 4-24).

$\Delta ep = g(z_2 - z_1)$. Um argumento semelhante pode ser dado para o termo da energia potencial. Uma variação de 1 kJ/kg corresponde a uma diferença de cota de 102 m. Na maior parte dos dispositivos industriais, tais como turbinas e compressores, a diferença de cota entre a entrada e a saída é muito inferior, sendo o termo energia potencial desprezado. No entanto, este deve ser tido em conta em processos que envolvem a bombagem de fluidos a grandes alturas. Isto verifica-se para sistemas que envolvem transferência de calor desprezáveis.



Alguns dispositivos de escoamento em regime permanente

FIGURA 4-25

Os dispositivos com escoamento em regime permanente operam durante longos períodos de tempo.

4-3 ■ ALGUNS DISPOSITIVOS DE ESCOAMENTO EM REGIME PERMANENTE

Muitos dispositivos de engenharia operam sob as mesmas condições durante longos períodos de tempo. Os componentes de uma central a vapor (turbinas, compressores, permutadores de calor e bombas) operam continuamente durante meses, só parando para manutenção (Figura 4-25). Portanto, estes dispositivos podem ser convenientemente analisados como sendo de escoamento em regime permanente.

Nesta secção, alguns dispositivos comuns são descritos, sendo analisados os aspectos termodinâmicos. Os princípios de conservação da massa e da energia são ilustrados através de exemplos.

Tubeiras e difusores

As tubeiras e os difusores são vulgarmente utilizados em motores a jacto, foguetes, naves espaciais ou até em mangueiras de jardim. Uma **tubeira** é um dispositivo que *aumenta a velocidade do fluido* através da pressão. Um **difusor** *aumenta a pressão do fluido*, à medida que reduz a sua velocidade. Ou seja, estes dispositivos desempenham tarefas opostas. A área de secção de uma tubeira decresce na direcção do escoamento, para escoamentos subsónicos, e aumenta para supersónicos. O contrário verifica-se para os difusores. Um comportamento diferente para um fluido em escoamento supersónico é explicado no Capítulo 16. A Figura 4-26 mostra de forma esquemática uma tubeira e um difusor. A importância relativa dos termos que surgem na equação da energia para estes dispositivos é a seguinte:

$\dot{Q} \cong 0$. A taxa de transferência de calor entre o fluido que se escoia através de uma tubeira ou difusor e a sua vizinhança é geralmente muito pequena,

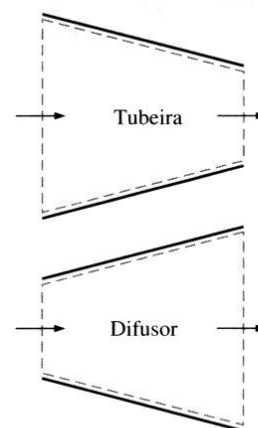


FIGURA 4-26

Esquema de uma tubeira e de um difusor para velocidades subsónicas (inferiores à velocidade do som).

CAPÍTULO 4

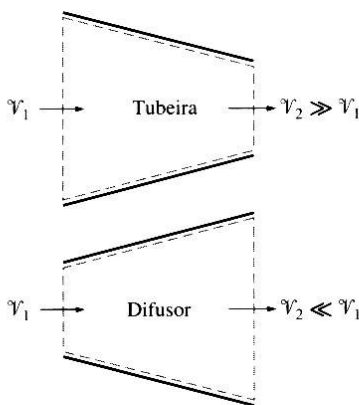
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-27

As tuberias e os difusores apresentam uma forma capaz de provocar grandes variações na velocidade do fluido e, portanto, energia cinética.

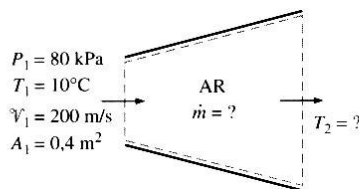


FIGURA 4-28

Esquema para o Exemplo 4-1.

mesmo quando os dispositivos não são isolados. Isto é deve-se sobretudo a o fluido ter velocidades altas, não existindo tempo suficiente para se verificar uma transferência de calor significativa. Portanto, na ausência de quaisquer dados, pode assumir-se o escoamento como adiabático.

$\dot{W} = 0$. O termo de trabalho para tuberias e difusores é nulo, visto que estes dispositivos são basicamente condutas com uma dada forma, não envolvendo quaisquer veios ou condutores eléctricos.

$\Delta ec \neq 0$. As tuberias e os difusores envolvem geralmente elevadas velocidades e, à medida que o fluido passa estas variam significativamente (Figura 4-27). Portanto, as variações da energia cinética devem ser tidas em conta durante a análise do escoamento, através destes dispositivos.

$\Delta ep \approx 0$. O fluido geralmente não sofre uma variação apreciável de cota ao passar através de uma tuberia ou difusor, podendo este termo ser desprezado.

EXEMPLO 4-1 Desaceleração do ar num difusor

Ar a 10°C e 80 kPa entra num difusor de um motor a jacto em regime permanente com uma velocidade de 200 m/s . A área de admissão do difusor é de $0,4\text{ m}^2$. O ar deixa este dispositivo com uma velocidade muito menor que a de entrada. Determine (a) o caudal mássico e (b) a temperatura do ar à saída do difusor.

Solução Toma-se o difusor como sistema (Figura 4-28). Este é um volume de controlo, visto que existe uma troca de massa na fronteira do sistema durante o processo. Observa-se que existe somente uma entrada e uma saída, sendo $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$.

Pressupostos 1 Este é um processo de escoamento em regime permanente, visto que não se altera com o tempo em qualquer ponto e, portanto, $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$. 2 O ar é um gás perfeito, visto que está a uma temperatura elevada e uma baixa pressão em relação aos valores do ponto crítico de -141°C e $3,77\text{ MPa}$. 3 A variação da energia potencial é nula, $\Delta ep = 0$. 4 A transferência de calor é desprezável. 5 A energia cinética à saída do difusor é desprezável. 6 Não existem interacções de trabalho.

Análise (a) Para determinar o caudal mássico é necessário calcular o volume específico do ar em primeiro lugar. Isto é efectuado através da equação de gases perfeitos com base nas condições de entrada:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{[0,287\text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](283\text{ K})}{80\text{ kPa}} = 1,015\text{ m}^3/\text{kg}$$

Então, da Equação 4-5:

$$\dot{m}_1 = \frac{1}{v_1} v_1 A_1 = \frac{1}{1,015\text{ m}^3/\text{kg}} (200\text{ m/s})(0,4\text{ m}^2) = 78,8\text{ kg/s}$$

Como o escoamento é em regime permanente, o caudal mássico através de todo o difusor mantém-se constante nesse valor.

(b) Com base nos pressupostos e observações, o balanço de energia para este sistema de escoamento em regime permanente pode ser expresso sob a forma de taxa como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{ocinética, potencial etc.,}}} \stackrel{0}{=} \text{(regime permanente)} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right) \quad (\text{visto que } \dot{Q} \equiv 0, \dot{W} = 0, \text{ e } \Delta p_e \equiv 0)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

A velocidade de saída de um difusor é geralmente pequena em comparação com o valor de entrada ($V_2 \ll V_1$); então a energia cinética à saída pode ser desprezável. A entalpia do ar à entrada é determinada a partir da Tabela A-17:

$$h_1 = h_{@283\text{ k}} = 283,14 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo, tem-se

$$h_2 = 283,14 \text{ kJ/kg} - \frac{0 - (200 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 303,14 \text{ kJ/kg}$$

Da Tabela A-17, a temperatura correspondente a este valor de entalpia é

$$T_2 = 303,1 \text{ K}$$

Que mostra que a temperatura do ar aumentou em cerca de 20° C, à medida que a sua velocidade diminuiu. Este aumento é devido principalmente à transformação da energia cinética em energia interna.

EXEMPLO 4-2 Aceleração de vapor numa tubeira

Vapor a 250 psia e 700° F entra em regime permanente numa tubeira cuja área de admissão é de 0,2 ft². O caudal mássico do vapor é de 10 lbm/s. O vapor deixa a tubeira a 200 psia e com uma velocidade de 900 ft/s. As perdas de calor por unidade de massa do vapor estimam-se em 1,2 Btu/lbm. Determine (a) a velocidade de admissão e (b) a temperatura do vapor.

Solução Toma-se a tubeira como sistema (Figura 4-29). Este é um volume de controlo, visto que existe troca de massa na fronteira do sistema durante o processo. Observa-se que existe somente uma entrada e uma saída, sendo $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$.

Pressupostos 1 É um processo de escoamento em regime permanente, visto não existir variação com o tempo em qualquer ponto e, portanto, $\Delta m_{\text{VC}} = 0$ e $\Delta E_{\text{VC}} = 0$. 2 Não existem interações de trabalho. 3 A variação da energia potencial é nula, $\Delta ep = 0$.

Análise (a) A velocidade de entrada é determinada a partir da Equação 4-5. Mas primeiro é necessário determinar o volume específico do vapor na entrada da tubeira.

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 250 \text{ psia} \\ P_2 = 700^\circ \text{ F} \end{array} \right\} \begin{array}{l} v_1 = 2,688 \text{ ft}^3/\text{lbm} \\ h_1 = 1371,1 \text{ Btu/lbm} \end{array} \quad (\text{Tabela A-6E})$$

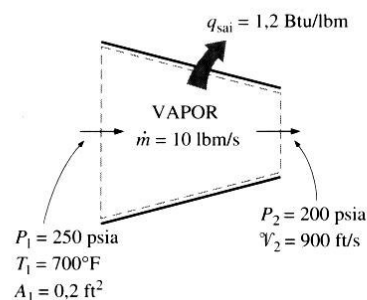


FIGURA 4-29

Esquema para o Exemplo 4-2.

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

Então, da Equação 4-5:

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1} \mathcal{V}_1 A_1$$

$$10 \text{ lbm/s} = \frac{1}{2,688 \text{ ft}^3/\text{lbm}} (\mathcal{V}_1)(0,2 \text{ ft}^2)$$

$$\mathcal{V}_1 = 134,4 \text{ ft/s}$$

(b) Com base nos pressupostos e observações efectuadas, o balanço de energia para este sistema de escoamento em regime permanente pode ser expresso sob a forma de taxa como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \stackrel{0}{=} \text{(regime permanente)} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{\mathcal{V}_1^2}{2} \right) = \dot{Q}_{\text{sai}} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{\mathcal{V}_2^2}{2} \right) \quad (\text{visto que } \dot{W} \equiv 0 \text{ e } \Delta ep \equiv 0)$$

Dividindo pelo caudal mássico \dot{m} e substituindo, h_2 é determinado da seguinte forma:

$$h_2 = h_1 - q_{\text{sai}} - \frac{\mathcal{V}_2^2 - \mathcal{V}_1^2}{2}$$

$$= (1371,1 - 1,2) \text{ Btu/lbm} - \frac{(900 \text{ ft/s})^2 - (134,4 \text{ ft/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ Btu/lbm}}{25\,037 \text{ ft}^2/\text{s}^2} \right)$$

$$= 1354,1 \text{ Btu/lbm}$$

Então:

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 200 \text{ psia} \\ h_2 = 1354,1 \text{ Btu/lbm} \end{array} \right\} T_2 = 661,9^\circ \text{ F} \quad (\text{Tabela A-6E})$$

Portanto, a temperatura do vapor irá descer em $38,1^\circ \text{ F}$ à medida que atravessa a tubeira. Esta queda é devida principalmente à conversão da energia interna em energia cinética. (A perda de calor é demasiado pequena para ter algum significado neste caso.)

Turbinas e compressores

Em centrais a vapor, a gás ou hídricas, o dispositivo que faz mover o gerador eléctrico é a turbina. À medida que o fluido passa por esta, o trabalho é realizado contra as pás, fixadas ao veio. Como resultado, o veio roda, produzindo trabalho, sendo positivo, pois é realizado pelo fluido.

Os compressores, as bombas e os ventiladores são dispositivos empregues para aumentar a pressão de um fluido. O trabalho é fornecido por uma fonte exterior através de um veio. Portanto, o termo do trabalho para compressores é negativo, visto que é realizado no fluido. Embora estes três dispositivos

funcionem de modo similar, as tarefas que desempenham são diferentes. Um *ventilador* aumenta a pressão do fluido ligeiramente, sendo empregue principalmente para fazer circular um gás. Um *compressor* é capaz de comprimir um gás até valores muito elevados de pressão. As *bombas* apresentam um funcionamento em tudo semelhante aos compressores, exceptuando o facto de o fluido operante ser um líquido e não um gás.

Para as turbinas e os compressores, os valores relativos dos diversos termos que surgem na equação da energia são:

$\dot{Q} \cong 0$. O calor transferido para estes dispositivos é geralmente pequeno relativamente ao trabalho de veio, a não ser que exista um arrefecimento intencional (como nos compressores). Um valor estimado baseado em experiências pode ser utilizado na análise, ou despreza-se o calor transferido, caso não exista arrefecimento intencional.

$\dot{W} \neq 0$. Todos estes dispositivos envolvem veios em rotação que atravessam a fronteira. Portanto, este termo é importante. Para as turbinas, \dot{W} representa a potência realizada, enquanto que, para os compressores e para as bombas, representa a potência fornecida.

$\Delta ep \cong 0$. A variação da energia potencial que o fluido sofre ao atravessar estes dispositivos é geralmente muito pequena, podendo ser desprezada.

$\Delta ec \cong 0$. As velocidades envolvidas nestes dispositivos, com excepção das turbinas, são em geral demasiadamente baixas, de modo a provocar variações na energia cinética. No entanto, as velocidades no interior das turbinas são muito elevadas, provocando uma variação significativa da energia cinética do fluido. Contudo, esta variação é pequena em relação à variação da entalpia, podendo ser desprezada.

EXEMPLO 4-3 Compressão de ar através de um compressor

Ar a 100 kPa e 280 K é comprimido continuamente até 600 kPa e 400 K. O caudal mássico é de 0,02 kg/s, e ocorre, durante o processo, uma perda de calor de 16 kJ/kg. Assumindo que as variações da energia cinética e da energia potencial são nulas, determine a potência a fornecer ao compressor.

Solução Considera-se o *compressor* como sistema (Figura 4-30). Este é um *volume de controlo*, visto que existe uma troca de massa através da fronteira durante o processo. Observa-se que existe somente uma entrada e uma saída e, portanto, $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Existe uma perda de calor do sistema e fornece-se trabalho a este.

Pressupostos 1 Este é um processo em regime permanente, visto que não se altera ao longo do tempo em qualquer ponto, e portanto $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$. 2 O ar é um gás perfeito, pois está a uma temperatura elevada e a uma pressão baixa em relação aos valores do ponto crítico de -141°C e 3,77 MPa. 3 As variações da energia cinética e da energia potencial são nulas, $\Delta ep = \Delta ec = 0$.

Análise Com base nos pressupostos e observações efectuadas, o balanço de energia para um sistema com escoamento em regime permanente pode ser expresso, sob a forma de taxa, como

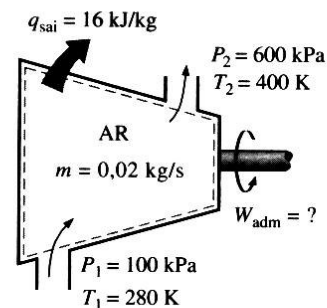


FIGURA 4-30

Esquema para o Exemplo 4-3.

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\dot{\Delta E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \stackrel{0}{=} 0 \quad (\text{regime permanente})$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{W}_{\text{adm}} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{\text{sai}} + \dot{m}h_2 \quad (\text{visto que } \Delta ec = \Delta ep \cong 0)$$

$$\dot{W}_{\text{adm}} = \dot{m}q_{\text{sai}} + \dot{m}(h_2 - h_1)$$

A entalpia de um gás perfeito depende somente da temperatura. Os valores das entalpias são determinados através das tabelas de ar (Tabela A-17), sendo

$$h_1 = h @ 280 \text{ K} = 280,13 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h @ 400 \text{ K} = 400,98 \text{ kJ/kg}$$

Substituindo, obtém-se o valor da potência a fornecer:

$$\dot{W}_{\text{adm}} = (0,02 \text{ kg/s})(16 \text{ kJ/kg}) + (0,02 \text{ kg/s})(400,98 - 280,13) = 2,74 \text{ kW}$$

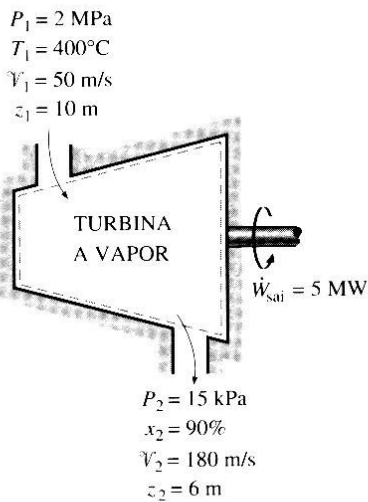


FIGURA 4-31

Esquema para o Exemplo 4-4.

EXEMPLO 4-4 Produção de potência numa turbina a vapor

A potência gerada por uma turbina adiabática a vapor é de 5 MW, sendo as condições de admissão e de saída do vapor dadas na Figura 4-31.

- Compare as magnitudes de Δh , Δec e Δep .
- Determine o trabalho realizado por unidade de massa de vapor na turbina.
- Calcule o caudal mássico do vapor.

Solução Considera-se a *turbina* como sistema (Figura 4-31). Este é um *volume de controlo*, visto que a massa atravessa a fronteira do sistema durante o processo. Observa-se que existe somente uma entrada e uma saída e, portanto, $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. O trabalho é realizado pelo sistema. Como são dadas as velocidades e as elevações de entrada e de saída, são consideradas as energias cinética e potencial.

Pressupostos **1** Este é um processo de escoamento em regime permanente, visto que não varia com o tempo em qualquer ponto, e portanto $\Delta m_{\text{VC}} = 0$ e $\Delta E_{\text{VC}} = 0$. **2** O sistema é adiabático, não existindo troca de calor.

Análise (a) Na admissão, o vapor está no estado sobreaquecido, sendo a sua entalpia de

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 2 \text{ MPa} \\ T_1 = 400^\circ \text{ C} \end{array} \right\} h_1 = 3247,6 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-6})$$

À saída, tem-se obviamente uma mistura de líquido e de vapor saturado à pressão de 15 kPa. A entalpia neste estado é

$$h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = [225,94 + (0,9)(2373,1)] \text{ kJ/kg} = 2361,73 \text{ kJ/kg}$$

Então:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = (2361,73 - 3247,6) \text{ kJ/kg} = -885,87 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta Ec = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = \frac{(180 \text{ m/s})^2 - (50 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 14,95 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta Ep = g(z_2 - z_1) = (9,807 \text{ m/s}^2)[(6 - 10) \text{ m}] \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = -0,04 \text{ kJ/kg}$$

Podem fazer-se duas observações acerca dos resultados anteriores. Primeiro, a variação da energia potencial é insignificante em comparação com a da entalpia e da energia cinética. Este é um caso típico na maioria dos dispositivos em engenharia. Segundo, como resultado da baixa pressão, e portanto do elevado volume específico, a velocidade do vapor na saída da turbina pode ser muito alta. No entanto, a variação da energia cinética representa uma pequena fracção da da entalpia (inferior a 2% neste caso), podendo assim ser desprezada.

(b) O balanço de energia para um sistema com escoamento em regime permanente pode ser expresso, sob a forma de taxa, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \stackrel{0}{=} \text{(regime permanente)} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{m}(h_1 + v_1^2/2 + gz_1) = \dot{W}_{\text{sai}} + \dot{m}(h_2 + v_2^2/2 + gz_2) \quad (\text{pois } \dot{Q} = 0)$$

Dividindo pelo caudal mássico \dot{m} e substituindo, o trabalho realizado pela turbina por unidade de massa do vapor é dado por

$$w_{\text{sai}} = - \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] = -(\Delta h + \Delta ec + \Delta ep)$$

$$= -[-885,87 + 14,95 - 0,04] \text{ kJ/kg} = 870,96 \text{ kJ/kg}$$

(c) Para uma potência de 5 MW, é necessário um caudal mássico de

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{w} = \frac{5000 \text{ kJ/s}}{870,96 \text{ kJ/kg}} = 5,74 \text{ kg/s}$$

Válvulas estranguladoras

As válvulas estranguladoras são *qualquer tipo de dispositivos que restringem o caudal*, provocando uma perda de carga significativa no fluido. Alguns exemplos comuns são as válvulas ajustáveis, os tubos capilares e as restrições porosas (Figura 4-32). Ao contrário das turbinas, estes dispositivos provocam uma perda de carga sem a realização de qualquer tipo de trabalho, sendo acompanhada, por vezes, por uma *grande descida da temperatura*. Devido a este facto, as válvulas estranguladoras são vulgarmente utilizadas em aplicações de frio e de ar condicionado. O valor da descida de temperatura (ou por vezes aumento) durante o processo de estrangulamento é governado por uma propriedade denominada *coeficiente de Joule-Thomson* que será discutida no Capítulo 11.

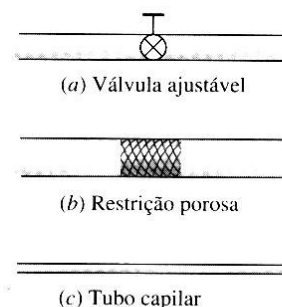


FIGURA 4-32

As válvulas de estrangulamento são dispositivos que provocam grandes perdas de carga no fluido.

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controle

As válvulas estranguladoras são geralmente pequenos dispositivos, e o escoamento através delas pode ser considerado adiabático ($q \cong 0$), visto que não há tempo nem superfície suficientes para existir uma transferência de calor efectiva. Também não se realiza trabalho ($w = 0$), e a variação de energia potencial, se existir, é muito pequena ($\Delta ep \cong 0$). Embora a velocidade de saída seja geralmente mais alta do que a de admissão, em muitos casos, o aumento de energia cinética é insignificante ($\Delta ec \cong 0$). Então, a equação de conservação da energia para este dispositivo de escoamento em regime permanente único reduz-se a

$$h_2 \cong h_1 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-26)$$

Ou seja, os valores da entalpia na admissão e na saída de uma válvula estranguladora são idênticos. Por esta razão, este tipo de válvulas é por vezes chamado *dispositivo isentálpico*.

De modo a compreender melhor a influência que uma válvula estranguladora exerce sobre o fluido, considere-se a Equação 4-26 do seguinte modo:

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

ou

$$\text{Energia interna} + \text{Energia de escoamento} = \text{Constante}$$

Portanto, o resultado final de um processo de estrangulamento depende do aumento de cada um dos termos durante o processo. A energia do escoamento aumenta ($P_2 v_2 > P_1 v_1$), pela utilização da energia interna. Como resultado, esta última decresce, sendo geralmente acompanhada por uma diminuição da temperatura. Se o produto Pv diminuir, verifica-se um aumento tanto da energia interna como da temperatura ao longo do processo. Para o caso de um gás perfeito, como $h = h(T)$, a temperatura tem de permanecer constante ao longo da válvula (Figura 4-33).

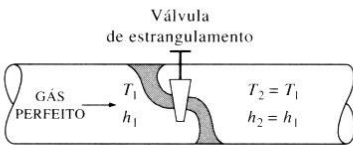


FIGURA 4-33

A temperatura de um gás perfeito não varia durante um processo de estrangulamento ($h = \text{constante}$) visto que $h = h(T)$.

EXEMPLO 4-5 Expansão de fluido refrigerante 134a num frigorífico

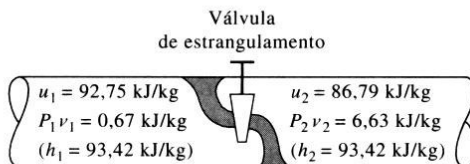
Fluido refrigerante 134a entra num tubo capilar de um frigorífico no estado de líquido saturado a 0,8 MPa, saindo à pressão de 0,12 MPa. Determine o título do fluido no estado final e a queda de temperatura ao longo do processo.

Solução Um tubo capilar é um dispositivo simples de estrangulamento vulgarmente utilizado em aplicações de frio, de modo a provocar uma elevada perda de carga no refrigerante. O escoamento ao longo deste é um processo de estrangulamento e, portanto, a entalpia do fluido permanece constante (Figura 4-34):

Na admissão: $P_1 = 0,8 \text{ MPa}$ } $T_1 = T_{\text{sat @ } 0,8 \text{ MPa}} = 31,33^\circ \text{C}$
 líquido saturado } $h_1 = h_f @ 0,8 \text{ MPa} = 93,42 \text{ kJ/kg}$ (Tabela A-12)

Na saída: $P_2 = 0,12 \text{ MPa}$ → $h_f = 21,32 \text{ kJ/kg}$ $T_{\text{sat}} = -22,36^\circ \text{C}$
 $(h_2 = h_1)$ $h_g = 233,86 \text{ kJ/kg}$

FIGURA 4-34
Durante um processo de estrangulamento, a entalpia (energia de escoamento + energia interna) de um fluido permanece constante. Mas as energias de escoamento e interna podem converter-se uma na outra.



Obviamente que $h_f < h_2 < h_g$; Portanto, na saída, o fluido encontra-se no estado de mistura saturada. O título desta é calculado por

$$x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} = \frac{93,42 - 21,32}{233,86 - 21,32} = \mathbf{0,339}$$

Como o estado de saída se encontra em mistura saturada a 0,12 MPa, a temperatura deve ser a de saturação para este valor de pressão, sendo de $-22,36^\circ\text{C}$. Então, a variação de temperatura durante o processo é de

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (-22,36 - 31,33)^\circ\text{C} = \mathbf{-53,69^\circ\text{C}}$$

Ou seja, a temperatura do refrigerante desce $53,69^\circ\text{C}$ ao passar pelo tubo capilar. Note-se que 33,9% do fluido se vaporizam durante o processo, e a energia necessária para tal é absorvida pelo próprio fluido.

Tanques misturadores

Em engenharia, a mistura de dois caudais é uma ocorrência vulgar. O local onde se realiza a mistura propriamente dita denomina-se **tanque misturador**. Este não deve necessariamente ser um tanque, no verdadeiro sentido da palavra. Por exemplo, uma ligação «T» ou «Y» de um chuveiro vulgar pode ser considerado como um tanque misturador, pois combina os caudais de água fria e quente (Figura 4-35).

O princípio de conservação da massa para este caso requer que a soma dos caudais mássicos que são admitidos seja igual à soma dos caudais de saída.

Os tanques misturadores são geralmente bem isolados ($q \cong 0$) e não envolvem qualquer forma de trabalho ($w = 0$), e as energias cinética e potencial do fluido podem ser desprezadas ($ep \cong 0$, $ec \cong 0$). Portanto, o termo restante da equação do balanço de energia (Equação 4-19) representa as energias totais dos caudais de entrada e saída. O princípio de conservação da energia requer que estes sejam iguais, sendo então esta equação idêntica à de conservação da massa.

EXEMPLO 4-6 Mistura de água fria e quente num chuveiro

Considere um chuveiro vulgar em que água quente a 140°F é misturada com água fria a 50°F . Sabendo que o caudal misturado deve sair a uma temperatura de 110°F , determine a relação entre os caudais mássicos de água quente e fria. Assuma que as perdas de calor no misturador são desprezáveis e que existem duas entradas e uma só saída.

Solução Toma-se o *tanque misturador* como o sistema (Figura 4-36). Este é um *volume de controlo*, visto que existe troca de massa através da fronteira do sistema. Observa-se que existem duas entradas e uma só saída.

Pressupostos 1 Este é um processo de escoamento em regime permanente, visto que não se altera ao longo do tempo em qualquer ponto, sendo $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$. 2 As energias cinética e potencial são desprezáveis, sendo $ec \cong ep \cong 0$. 3 As perdas de calor do sistema são desprezáveis, sendo $\dot{Q} \cong 0$. 4 Não existe qualquer interacção de trabalho presente.

Alguns dispositivos de escoamento em regime permanente

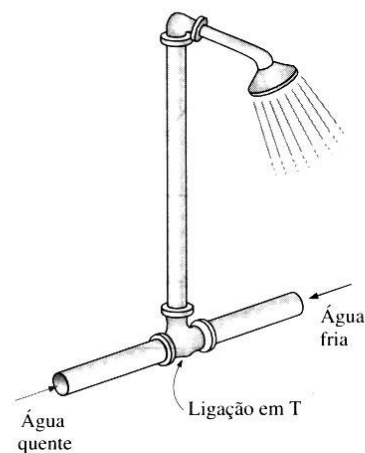


FIGURA 4-35

Uma ligação em T de chuveiro de casa de banho serve como um tanque misturador para caudais de água quente e fria.

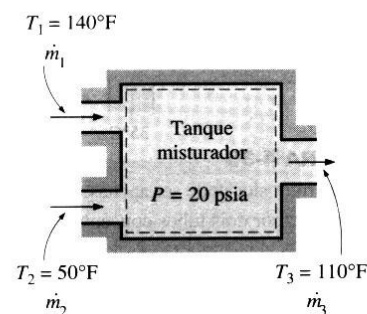


FIGURA 4-36

Esquema para o Exemplo 4-6.

CAPÍTULO 4

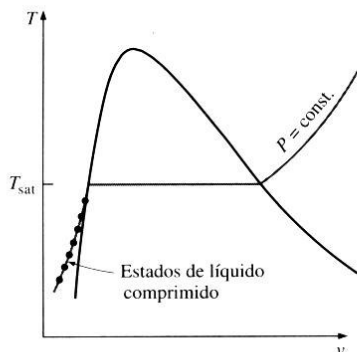
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-37

Uma substância existe como líquido comprimido a temperaturas inferiores à de saturação, a uma dada pressão.

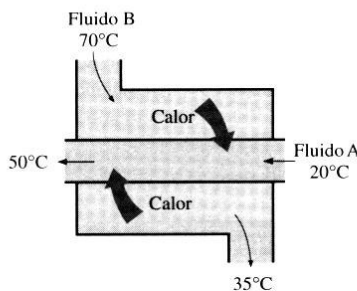


FIGURA 4-38

Um permutador pode ser apenas composto por dois tubos concêntricos.

Análise Com base nos pressupostos e observações efectuadas, os balanços de massa e de energia para este processo de escoamento em regime permanente podem ser expressos, sob a forma de taxa, como

Balanço de massa: $\dot{m}_{\text{adm}} = \dot{m}_{\text{sai}} = \Delta \dot{m}_{\text{sistema}} \xrightarrow{0} (\text{regime permanente}) = 0$

$$\dot{m}_{\text{adm}} = \dot{m}_{\text{sai}} \rightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Balanço de energia: $\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}} = \Delta \dot{E}_{\text{sistema}} \xrightarrow{0} (\text{regime permanente})$

Taxa de energia transferida por calor, trabalho e transferência de massa Taxa de variação das energias cinética, potencial, etc.

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \quad (\text{visto que } \dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, \text{ e } c \cong ep \cong 0)$$

Combinando as duas expressões, tem-se

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

Dividindo esta expressão por \dot{m}_2 :

$$y h_1 + h_2 = (y + 1) h_3$$

em que $y = \dot{m}_1 / \dot{m}_2$, representando o dado pretendido.

A temperatura de saturação da água a 20 psia é de 227,96° F. Como as temperaturas dos três caudais estão abaixo deste valor ($T < T_{\text{sat}}$), a água nos três casos está no estado de líquido comprimido (Figura 4-37), que pode ser tratado como líquido saturado à temperatura dada. Assim:

$$h_1 \cong h_f @ 140^\circ \text{ F} = 107,96 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_2 \cong h_f @ 50^\circ \text{ F} = 18,06 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_3 \cong h_f @ 110^\circ \text{ F} = 78,02 \text{ Btu/lbm}$$

Resolvendo em ordem a y , obtém-se

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{78,02 - 18,06}{107,96 - 78,02} = 2,0$$

Portanto, o caudal mássico de água quente deve ser o dobro do de água fria, de modo a a mistura sair a 110° F.

Permutadores de calor

Tal como o nome implica, **permutadores de calor** são dispositivos onde dois caudais de fluidos trocam calor sem se misturarem. Os permutadores de calor são vulgarmente empregues em diversas indústrias, apresentando-se sob diversas formas.

A mais simples é a *de tubo duplo* (também denominado *de tubo e carcaça*), ilustrada na Figura 4-38. É composta por dois tubos concêntricos de diâmetros diferentes. Faz-se passar um fluido pelo espaço anelar contido entre os dois tubos. O calor é transferido do fluido quente para o mais frio através da parede que o separa. Por vezes, faz-se passar o tubo interior diversas vezes, de modo a aumentar a superfície de transferência de calor, e portanto a sua taxa. Os tanques misturadores descritos anteriormente são por vezes classificados como permutadores de calor *de contacto directo*.

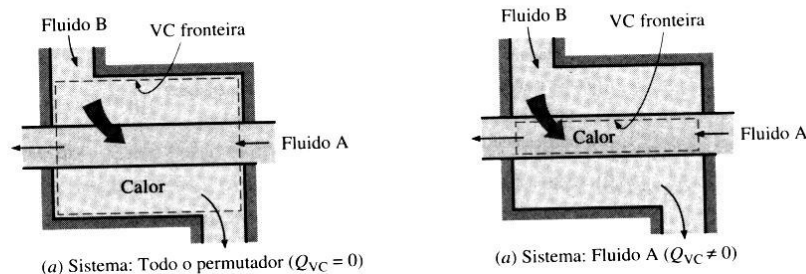


FIGURA 4-39

A transferência de calor associada ao permutador de calor pode ser ou não de valor zero, dependendo da escolha do sistema.

O princípio de conservação da massa aplicado a um permutador de calor com escoamento em regime permanente requer que a soma dos caudais mássicos de entrada seja igual à soma dos de saída. Este princípio pode também ser expresso da seguinte forma: *Sob as condições de escoamento em regime permanente, o caudal mássico de cada fluido que atravessa o permutador de calor deve permanecer constante.*

Normalmente, os permutadores de calor não envolvem qualquer interacção de trabalho ($w = 0$) e as variações de energias cinética e potencial são desprezáveis ($\Delta ec \equiv \Delta ep \equiv 0$) para cada caudal. A taxa de transferência de calor associada a permutadores de calor depende da escolha do volume de controlo. Nestes dispositivos, pretende-se que a transferência de calor se verifique no seu interior, entre os dois fluidos, sendo a superfície exterior geralmente isolada, de modo a evitar qualquer perda de calor para a vizinhança.

Quando se selecciona todo o permutador como volume de controlo, \dot{Q} torna-se 0, visto que, para este caso, a fronteira encontra-se imediatamente abaixo do isolamento, não se verificando trocas de calor através desta (Figura 4-39). Se porém a escolha do volume de controlo recair sobre um dos fluidos, o calor atravessa a fronteira à medida que se transfere de um fluido para o outro, sendo \dot{Q} diferente de 0. De facto, para este caso, o valor de \dot{Q} será igual à taxa de transferência de calor entre os dois fluidos.

EXEMPLO 4-7 Arrefecimento de frigorigénio-134a por água

Fluido frigorigénio 134a é arrefecido por água num condensador. O fluido entra neste com um caudal mássico de 6 kg/min a 1 MPa e 70° C, deixando-o a 35° C. A água de arrefecimento entra a 300 kPa e 15° C, saindo a 25° C. Desprezando qualquer perda de carga, determine (a) o caudal mássico de água necessário e (b) a taxa de transferência de calor do fluido para a água.

Solução Considera-se a *totalidade do permutador de calor* como sistema (Figura 4-40). Este é um *volume de controlo*, visto que a massa atravessa a fronteira durante o processo. Em geral, existem diversas escolhas possíveis do volume de controlo em dispositivos de caudais múltiplos e a apropriada depende de cada situação. Observa-se que existem dois escoamentos (e portanto duas entradas e duas saídas) sem mistura.

Pressupostos **1** Este é um processo de escoamento em regime permanente, visto que não se altera ao longo do tempo em qualquer ponto, sendo $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$. **2** As energias cinética e potencial são desprezáveis, sendo $ec \equiv ep \equiv 0$. **3** As perdas de calor do sistema são desprezáveis, sendo $\dot{Q} \equiv 0$. **4** Não existe qualquer interacção de trabalho presente.

Análise Com base nos pressupostos e observações efectuados, o balanço de massa e de energia para este processo de escoamento em regime permanente pode ser expresso, sob a forma de taxa como

$$\text{Balanço de massa:} \quad \dot{m}_{\text{adm}} = \dot{m}_{\text{sai}}$$

para cada fluido, visto que não existe mistura destes. Então:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{\text{R134a}}$$

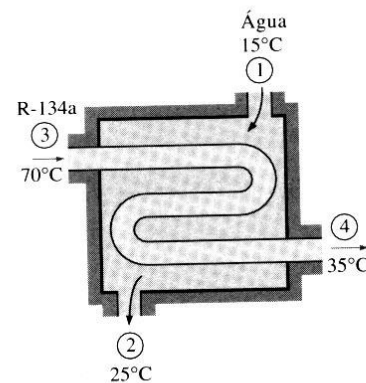


FIGURA 4-40

Esquema para o Exemplo 4-7.

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

Balço de energia:
$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transfer\ancia de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de varia\c\ao das energias} \\ \text{cin\etica, potencial, etc.}}} \stackrel{0}{=} \text{(regime permanente)} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 \quad (\text{visto que } \dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0, ec \cong ep \cong 0)$$

Combinando as duas express\oes e simplificando:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(h_2 - h_1) = \dot{m}_{\text{R134a}}(h_4 - h_3)$$

\c{E} necess\u00e1rio determinar as entalpias dos 4 estados. A \u00e1gua existe na forma de l\u00edquido comprimido tanto na entrada como na sa\u00edda, visto que as temperaturas em ambos os pontos s\u00e3o inferiores \u00e0 temperatura de satura\c\ao a 300 kPa (133,55\u00b0 C). Tratando o l\u00edquido comprimido como l\u00edquido saturado \u00e0 temperatura dada, tem-se

$$h_1 \cong h_f @ 15^\circ \text{C} = 62,99 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-4})$$

$$h_2 \cong h_f @ 25^\circ \text{C} = 104,89 \text{ kJ/kg}$$

O fluido frigorig\u00e9nio entra no permutador como vapor sobreaquecido e sai na forma de l\u00edquido saturado \u00e0 temperatura dada, sendo

$$\left. \begin{array}{l} P_3 = 1 \text{ MPa} \\ T_3 = 70^\circ \text{C} \end{array} \right\} h_3 = 302,34 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-13})$$

$$\left. \begin{array}{l} P_4 = 1 \text{ MPa} \\ T_4 = 35^\circ \text{C} \end{array} \right\} h_4 \cong h_f @ 35^\circ \text{C} = 98,78 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-11})$$

Substituindo, tem-se

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(62,99 - 104,89) \text{ kJ/kg} = (6 \text{ kg/min})[(-302,34) \text{ kJ/kg}]$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 29,15 \text{ kg/min}$$

(b) Para a determina\c\ao da transfer\encia de calor do frigorig\u00e9nio para a \u00e1gua, \c{e} necess\u00e1rio escolher-se um volume de controlo cuja fronteira seja localizada no percurso da transfer\encia de calor. Para tal pode-se escolher o volume de qualquer um dos dois fluidos. Sem nenhuma prefer\encia, escolheu-se o da \u00e1gua. Aplicam-se todos os pressupostos anteriores, com excep\c\ao da transfer\encia de calor, que deixa de ser nula. Assim, assumindo que a transfer\encia de calor se verifica para a \u00e1gua, o balanço de energia para este escoamento \u00fanico reduz-se a

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transfer\ancia de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de varia\c\ao das energias} \\ \text{cin\etica, potencial, etc.}}} \stackrel{0}{=} \text{(regime permanente)} = 0$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O adm}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} h_1 = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} h_2$$

Simplificando e substituindo, tem-se

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O adm}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}(h_2 - h_1) = (29,15 \text{ kg/min})[(104,89 - 62,99) \text{ kJ/kg}] = 1221 \text{ kJ/min}$$

Discussão Caso fosse escolhido o volume ocupado pelo refrigerante para volume de controle (Figura 4-41), obter-se-ia o mesmo resultado para $\dot{Q}_{\text{R-134a sai}}$, visto que o calor ganho pela água é igual ao cedido pelo refrigerante.

Escoamento em tubos e condutas

O transporte de líquidos ou gases tem muita importância em engenharia. O escoamento através de um tubo ou de uma conduta satisfaz geralmente as condições de escoamento em regime permanente, podendo ser analisado como um processo deste tipo. Como é óbvio, isto não se verifica para os períodos transientes de arranque e de paragem. O volume de controle pode ser escolhido, de modo a coincidir com as superfícies interiores do tubo ou da conduta em estudo.

No estudo destes dispositivos, é necessário considerar o seguinte:

$\dot{Q} \neq 0$. Sob as condições normais de funcionamento, a quantidade de calor ganha ou perdida pelo fluido pode ser bastante significativa, especialmente se o seu comprimento for elevado (Figura 4-42). Por vezes, é desejável que exista transferência de calor, pois é devido a esta que se processa o escoamento pelo tubo. Os escoamentos de água através da caldeira de uma central térmica ou através do fluido refrigerante num congelador são exemplos deste último caso. Porém, a transferência de calor pode ser indesejável, sendo as condutas e tubos isolados, de modo a prevenir isto, especialmente quando existe uma grande diferença entre as temperaturas do fluido e da vizinhança. Nestes casos, a transferência de calor pode ser desprezada.

$\dot{W} \neq 0$. Se o volume de controle envolve uma zona de aquecimento (resistências eléctricas), um ventilador ou uma bomba (veio), deve considerar-se o termo das interacções de trabalho (Figura 4-43). Destes, o trabalho de um ventilador é geralmente suficientemente pequeno, podendo ser desprezado. Caso o volume de controle não inclua qualquer destes dispositivos, o termo do trabalho (potência) é igual a 0.

$\Delta ec \cong 0$. As velocidades envolvidas no escoamento em tubos ou em condutas são relativamente baixas, e portanto as variações de energia cinética são desprezáveis. Isto verifica-se especialmente quando o diâmetro do dispositivo é constante e os efeitos de aquecimento são insignificantes. Contudo, a variação da energia cinética pode ser considerável para o caso de escoamentos de gases em condutas de secção variável.

$\Delta ep \neq 0$. Nas condutas e tubos, o fluido pode sofrer uma variação considerável de cota, e portanto o termo da energia potencial pode ser significativo. Isto verifica-se para o escoamento através de tubos isolados ou condutas em que a transferência de calor não é suficientemente relevante em relação aos outros efeitos.

Alguns dispositivos de escoamento em regime permanente

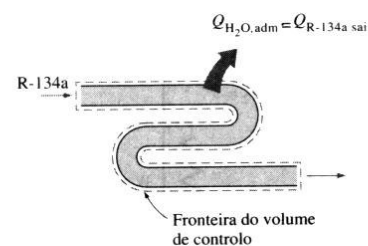


FIGURA 4-41

Num permutador de calor, a transferência de calor depende da escolha do sistema.

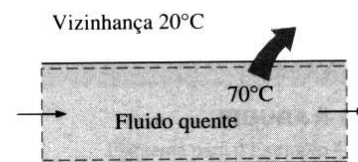


FIGURA 4-42

As perdas de calor do fluido quente, através de um tubo sem isolamento para o ambiente frio, podem ser significativas.

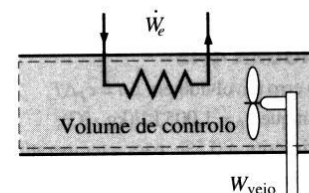


FIGURA 4-43

O escoamento através de tubos ou condutas pode envolver mais que uma forma de trabalho simultâneo.

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica: volumes de controlo

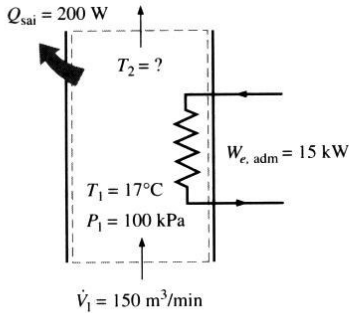


FIGURA 4-44
Esquema para o Exemplo 4-8.

EXEMPLO 4-8 Aquecimento eléctrico de uma casa

Os sistemas de aquecimento eléctrico utilizados em residências consistem simplesmente numa conduta com resistências eléctricas, sendo o ar aquecido ao passar por estas. Considere um sistema de 15 kW. Entra ar na zona de aquecimento a 100 kPa e 17° C, com um caudal volúmico de 150 m³/min. Sabendo que a perda de calor do ar para a vizinhança é de 200 W, determine a temperatura de saída deste.

Solução Considera-se a *zona de aquecimento da conduta* como o sistema (Figura 4-44). Este é um *volume de controlo* visto que a massa atravessa a fronteira durante o processo. Observa-se que existe uma única entrada e saída, sendo portanto $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Verifica-se que existe uma perda de calor do sistema e que se fornece trabalho para este.

Pressupostos **1** Este é um processo de escoamento em regime permanente, visto que não se altera ao longo do tempo em qualquer ponto, sendo $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$. **2** 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 MPa. **3** As variações das energias cinética e potencial são desprezáveis, sendo $\Delta ec \cong \Delta ep \cong 0$. **4** Podem utilizar-se os calores específicos do ar à temperatura ambiente.

Análise Às temperaturas usadas nos sistemas de aquecimento e ar de condicionado, Δh pode ser substituído por $c_p \Delta T$, em que $c_p = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ — valor à temperatura ambiente — com um erro desprezável (Figura 4-45). Então, o balanço de energia para este processo de escoamento em regime permanente pode ser expresso, sob a forma de taxa, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} \stackrel{\text{(regime permanente)}}{=} 0$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{W}_{e,\text{adm}} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{\text{sai}} + \dot{m}h_2 \quad (\text{visto que } \Delta ec \cong \Delta ep \cong 0)$$

$$\dot{W}_{e,\text{adm}} - \dot{Q}_{\text{sai}} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$

Da equação dos gases perfeitos, o volume específico do ar ao longo da conduta é calculado através de

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{[0,287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](290\text{K})}{100 \text{ kPa}} = 0,832 \text{ m}^3/\text{kg}$$

O caudal mássico de ar na conduta calcula-se por

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{150 \text{ m}^3/\text{min}}{0,832 \text{ m}^3/\text{kg}} \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 3,0 \text{ kg/s}$$

A temperatura de saída do ar é determinada por

$$(15 \text{ kJ/s}) - (0,2 \text{ kJ/s}) = (3 \text{ kg/s})[1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](T_2 - 17)^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 21,9^\circ\text{C}$$

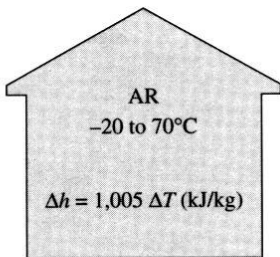


FIGURA 4-45
O erro envolvido em $\Delta h = c_p \Delta T$, em que $c_p = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, é inferior a 0,5%, para a temperatura do ar entre -20 e 70 °C.

EXEMPLO 4-9 Bombear água de um poço

Em zonas rurais, a água é geralmente extraída do subsolo por bombas. Considere um lençol de água cuja superfície livre se encontra a 60 m abaixo do nível do solo. É necessário que a água seja elevada até uma altura de 5 m acima do solo através de uma bomba cuja

conduta de admissão tem 15 cm e a de saída 20 cm. Desprezando qualquer transferência de calor com a vizinhança e o aquecimento por atrito, determine a potência a fornecer à bomba, de modo a obter água com um escoamento permanente com um caudal de 15 l/s ($= 0,015 \text{ m}^3/\text{s}$).

Solução Consideram-se a bomba e as condutas como sistema (Figura 4-46). Este é um volume de controlo, visto que a massa atravessa a fronteira durante o processo. Observa-se que existe uma única entrada e saída, sendo portanto $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Verifica-se que se fornece trabalho à bomba. Para este caso, as energias cinética e potencial são significativas, sendo portanto consideradas.

Pressupostos 1 Este é um processo de escoamento em regime permanente, visto que não se altera ao longo do tempo em qualquer ponto, sendo $\Delta m_{VC} = 0$ e $\Delta E_{VC} = 0$. 2 A transferência de calor é desprezável. 3 Desprezam-se os efeitos de aquecimento devido ao atrito.

Análise A massa volúmica da água à temperatura ambiente pode ser tomada como constante a um valor de 1000 kg/m^3 , com um erro insignificante. Então, o caudal mássico e as velocidades são dadas por

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho \dot{V} = (1000 \text{ kg/m}^3)(0,015 \text{ m}^3/\text{s}) = 15 \text{ kg/s} \\ \mathcal{V}_1 &= \frac{\dot{m}}{\rho_1 A_1} = \frac{15 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3) [\pi(0,15 \text{ m})^2/4]} = 0,85 \text{ m/s} \\ \mathcal{V}_2 &= \frac{\dot{m}}{\rho_2 A_2} = \frac{15 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3) [\pi(0,2 \text{ m})^2/4]} = 0,48 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Como foi mencionado no Capítulo 3, os líquidos podem ser tratados como substâncias incompressíveis ($v = \text{constante}$). Portanto, a variação de entalpia pode ser expressa como

$$h_2 - h_1 = (u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1) = (u_2 - u_1) + v(P_2 - P_1) = c(T_2 - T_1) + v(P_2 - P_1)$$

visto que $\Delta u = c\Delta T$. Para este caso, $\Delta h = 0$, pois não existe variação de temperatura ($T_2 = T_1$) e de pressão ($P_2 = P_1 = P_{\text{atm}}$). (Note-se que a pressão atmosférica se verifica tanto na entrada como na saída.) Então, o balanço de energia para este processo de escoamento em regime permanente pode ser expresso, sob a forma de taxa, como

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{adm}} - \dot{E}_{\text{sai}}}_{\substack{\text{Taxa de energia transferida} \\ \text{por calor, trabalho} \\ \text{e transferência de massa}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{sistema}}}_{\substack{\text{Taxa de variação das energias} \\ \text{cinética, potencial, etc.}}} = 0 \quad (\text{regime permanente})$$

$$\dot{E}_{\text{adm}} = \dot{E}_{\text{sai}}$$

$$\dot{W}_{\text{veio, adm}} + \dot{m} \left(\frac{\mathcal{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) = \dot{m} \left(\frac{\mathcal{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (\text{visto que } \dot{Q} = 0, \Delta h \cong 0)$$

$$\dot{W}_{e, \text{adm}} = \dot{m} \left[\frac{\mathcal{V}_2^2 - \mathcal{V}_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Substituindo, obtém-se

$$\begin{aligned}\dot{W}_{e, \text{adm}} &= (15 \text{ kg/s}) \left[\frac{(0,48 \text{ m/s})^2 - (0,85 \text{ m/s})^2}{2} + (9,8 \text{ m/s}^2)(65 \text{ m}) \right] \\ &= (15 \text{ kg/s})(-0,246 \text{ m}^2/\text{s}^2 + 637,5 \text{ m}^2/\text{s}^2) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{9,55 \text{ kW}}\end{aligned}$$

Alguns dispositivos de escoamento em regime permanente

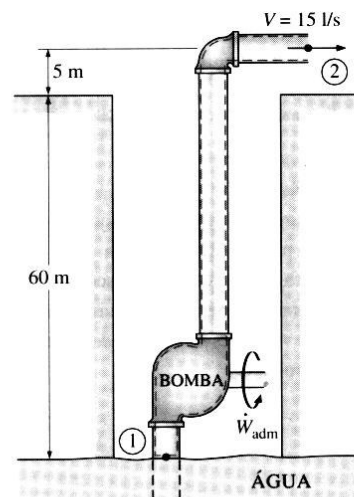


FIGURA 4-46
Esquema para o Exemplo 4-9.

CAPÍTULO 4

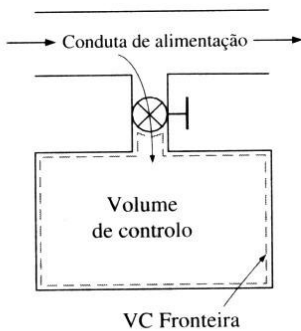
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-47

O enchimento de um reservatório rígido a partir de uma conduta cilíndrica é um processo de escoamento em regime não permanente, visto que envolve variações no interior do volume de controlo.

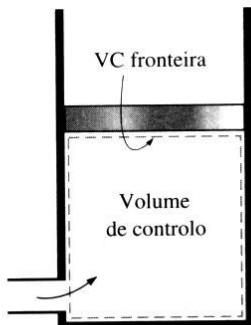


FIGURA 4-48

A forma e a dimensão do volume de controlo podem variar durante um processo de escoamento em regime não permanente.

Discussão Este é o valor da potência a fornecer à bomba. É interessante notar que o termo da energia cinética é muito pequeno em relação ao da energia potencial para o caso da elevação de um líquido. Esta ocorrência é vulgar em diversos processos reais. Deve notar-se que as perdas de carga devidas ao atrito podem ser muito significativas. Portanto, a potência a fornecer à bomba seria superior. As perdas de carga são discutidas em pormenor nos cursos de mecânica dos fluidos.

4-4 ■ PROCESSOS DE ESCOAMENTO NÃO PERMANENTE

Durante os processos de escoamento em regime permanente, não se verificam alterações no seio do volume de controlo; ou seja, não é necessário saber-se o que se passa no interior da fronteira do sistema ao longo do tempo, simplificando e facilitando a análise.

Contudo, diversos processos de interesse premente envolvem *variações* no seio do volume de controlo ao longo do tempo. Estes processos denominam-se **escoamentos em regime não permanente** ou **processos de escoamento transiente**. Obviamente que as expressões desenvolvidas na Secção 4-2 para os escoamentos em regime permanente não podem ser aplicadas a estes processos. Quando um escoamento em regime não permanente é analisado, é necessário acompanhar a evolução do conteúdo em massa e energia do volume de controlo e a interação de energia que se verifica na fronteira do sistema.

Alguns exemplos de processos de escoamento em regime não permanente são o enchimento de reservatórios rígidos através de condutas de alimentação (Figura 4-47), descarga de um fluido contido num reservatório pressurizado, accionamento de uma turbina através de ar comprimido contido num reservatório grande, enchimento de pneus ou balões e até mesmo o cozinhar através de uma panela de pressão.

Ao contrário de processos de escoamento em regime permanente, os transientes iniciam-se e finalizam-se num período de tempo finito em vez de se prolongarem infinitamente. Portanto, nesta secção, tratar-se-á de variações que ocorrem num dado intervalo de tempo Δt em vez de taxas de variação (variações por unidade de tempo). Em certos aspectos, um sistema com escoamento em regime não permanente é similar a um sistema fechado, exceptuando o facto de a massa contida no interior da fronteira não se manter constante.

Outra diferença entre estes processos de escoamento em regime permanente e os transientes reside no facto de os primeiros serem fixos no espaço, dimensão e forma. Os processos em regime não permanente não o são (Figura 4-48), sendo geralmente estacionários; ou seja, são fixos no espaço, mas podem envolver fronteiras móveis e, portanto, trabalho de fronteira. Em seguida ir-se-ão desenvolver as expressões gerais de balanços de massa e de energia para processos de escoamento em regime não permanente.

Balanço de massa

Ao contrário dos casos de processos de escoamento em regime permanente, nos processos em regime transiente, a quantidade de massa no interior do volume de controlo *varia* com o tempo, sendo a magnitude desta variação dependente das entradas e saídas. O balanço de massa para um sistema sujeito a qualquer processo foi expresso anteriormente, na Equação 4-1, como

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

em que $\Delta m_{\text{sistema}} = m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}}$ representa a variação de massa do sistema durante o processo (Figura 4-49). O balanço de massa para um volume de controlo pode ser expresso, de forma mais explícita, como

$$\sum m_{\text{adm}} - \sum m_{\text{sai}} = (m_2 - m_1)_{\text{sistema}} \quad (\text{kg}) \quad (4-27)$$

em que adm = admissão; sai = saída; 1 = inicial; 2 = final. Os símbolos de somatório servem para dar ênfase ao facto de terem de ser consideradas todas as entradas e saídas.

Vulgarmente, um ou mais termos da expressão anterior são nulos. Por exemplo, $m_{\text{adm}} = 0$ se não existir nenhuma entrada de massa durante o processo; $m_{\text{sai}} = 0$, se não sair nenhuma massa, e $m_1 = 0$, se o volume de controlo estiver vazio no estado inicial.

O balanço de massa pode também ser expresso sob a forma de taxa, na Equação 4-2, como

$$\dot{m}_{\text{adm}} - \dot{m}_{\text{sai}} = \Delta \dot{m}_{\text{sistema}} \quad (\text{kg/s})$$

em que \dot{m}_{adm} e \dot{m}_{sai} representam os totais dos caudais mássicos de entrada e de saída do sistema, e $\Delta \dot{m}_{\text{sistema}}$ a taxa de variação da massa no interior da fronteira do sistema. Se as propriedades na entrada, na saída e no interior não forem uniformes, então a equação do balanço de massa pode ser expressa como

$$\sum \int_{A_e} (\rho v_n dA)_e - \sum \int_{A_s} (\rho v_n dA)_s = \frac{d}{dt} \int_V (\rho dV)_{\text{VC}} \quad (4-28)$$

de modo a contabilizar a variação das propriedades. A integração de $dm_{\text{VC}} = \rho dV$ do lado direito no volume de controlo resulta na massa total contida no interior do volume de controlo no instante t .

Balanço de energia

O conteúdo de energia de um volume de controlo varia ao longo do tempo durante um processo em regime não permanente, e a magnitude desta variação depende da quantidade de transferência de energia que atravessa a fronteira do sistema sob a forma de trabalho, de calor e, também, de energia contida na massa que entra e sai. Quando se analisa este tipo de processos, deve acompanhar-se o conteúdo de energia no interior do volume de controlo e, também a energia que atravessa a fronteira do sistema através dos escoamentos de massa.

A equação geral do balanço de energia foi apresentada anteriormente, na Equação 4-8, como

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

sendo aplicável a qualquer sistema sujeito a qualquer processo. Tendo em conta que a energia pode apenas ser transferida sob a forma de calor, trabalho e massa, a equação anterior pode ser expressa, de forma mais explícita, como

$$Q_{\text{adm}} + W_{\text{adm}} + \sum m_e \theta_e = Q_{\text{sai}} + W_{\text{sai}} + \sum m_s \theta_s + \Delta E_{\text{sistema}} \quad (4-29)$$

em que $\theta = h + ec + ep = h + V^2/2 + gz$ representa a energia contida no fluido por unidade de massa, e $\Delta E_{\text{sistema}} = (\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep)_{\text{VC}}$.

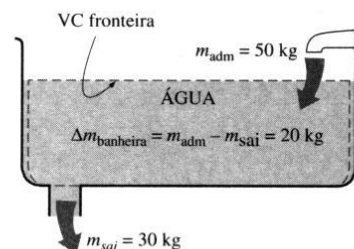


FIGURA 4-49

Princípio de conservação da massa aplicada a uma banheira comum.

Quando se realiza um estudo analítico geral ou se resolve um problema que envolva interações desconhecidas de trabalho ou de calor, é necessário assumir uma direcção para estas interações. Nestes casos, é prática comum assumir a direcção da transferência de calor Q para o sistema (entrada de calor) e a direcção do trabalho W para fora deste (saída de trabalho). Para este caso, a expressão do balanço de energia é

$$Q - W = \sum m_s \theta_s - \sum m_e \theta_e + \Delta E_{\text{sistema}} \quad (4-30)$$

Ou seja, o calor transferido para o sistema menos o trabalho realizado neste é igual à soma da variação da energia contida nos escoamentos de massa com a variação da energia contida no próprio sistema. A obtenção de um resultado negativo de Q ou W quer dizer que a direcção assumida é errada, devendo-se inverter o sentido.

Os termos de calor e trabalho (Q e W) na expressão anterior podem ser determinados por medição experimental. A energia total do volume de controlo no início e no fim do processo (E_1 e E_2) pode também ser determinado experimentalmente através da medição das propriedades relevantes da substância nos estados inicial e final. Contudo, a energia total transportada através da massa para o interior ou para fora do volume de controlo ($m_e \theta_e$ e $m_s \theta_s$) não é facilmente determinada, visto que as propriedades da massa podem alterar-se ao longo do tempo e ao longo do ponto de passagem da fronteira. Portanto, a única modo de determinar o transporte de energia através de uma passagem é pela consideração de diferenciais de massa suficientemente pequenos, δm , de modo a obter propriedades homogéneas, adicionando as energias totais.

A energia total de um fluido em escoamento de massa, δm , é $\theta \delta m$. Então, a energia total transportada pela massa através de uma entrada ou de uma saída ($m_e \theta_e$ e $m_s \theta_s$) é obtida por integração. Por exemplo, numa entrada, tem-se

$$\Theta_e = m_e \theta_{e, \text{med}} = \int_{m_e} \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) \delta m_e \quad (\text{kJ}) \quad (4-31)$$

Realizando isto para cada entrada e saída e substituindo na Equação 4-30 obtém-se

$$\begin{aligned} Q - W = & \sum \int_{m_s} \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) \delta m_s - \\ & - \sum \int_{m_e} \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) \delta m_e + \Delta E_{\text{sistema}} \end{aligned} \quad (4-32)$$

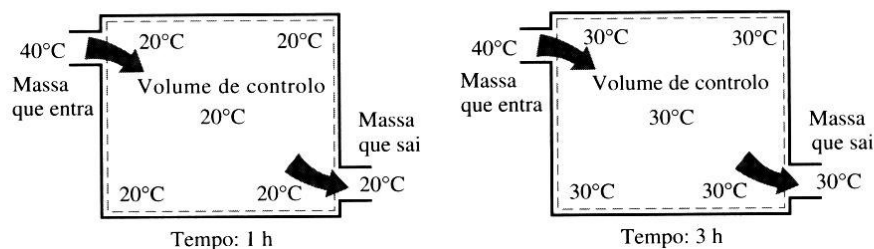
Esta equação pode também ser expressa sob a forma de taxa, dividindo cada termo por Δt e tomando o limite $\Delta t \rightarrow 0$, obtendo-se:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) + \frac{dE_{\text{sistema}}}{dt} \quad (4-33)$$

Para realizar as integrações nas expressões acima, é necessário conhecer as variações das propriedades das massas nas entradas e nas saídas.

Caso especial: processo de escoamento em regime uniforme

Em geral, os processos de escoamento em regime não permanente são de difícil análise, devido às integrações da Equação 4-32. Contudo, alguns processos deste



Processos de escoamento não permanente

FIGURA 4-50

Um volume de controle sujeito a um processo de escoamento em regime permanente.

tipo podem ser representados razoavelmente bem por um modelo simplificado — processo de escoamento em regime uniforme. Este envolve as seguintes simplificações:

1. Em qualquer instante, o estado do volume de controle é uniforme (ou seja, é o mesmo em toda a extensão). O estado do volume de controle pode variar com o tempo, mas fá-lo de modo uniforme (Figura 4-50). Consequentemente, o estado da massa que sai do volume de controle em qualquer instante é o mesmo do seu interior. (Esta suposição contrasta com a de escoamento em regime permanente que requer que o estado de um volume de controle varie com a localização, mas não com o tempo.)
2. As propriedades do fluido podem diferir de uma entrada ou saída para a outra, mas o escoamento do fluido deve ser *uniforme e permanente*. Ou seja, as propriedades não variam com o tempo ou a posição ao longo de uma secção de entrada ou de saída. Se existir alguma variação, calcula-se a média e toma-se como constante ao longo de todo o processo.

Com base nestas simplificações, as integrações da Equação 4-32 podem ser facilmente calculadas, e a equação de conservação da energia para um processo de escoamento uniforme torna-se

$$Q - W = \sum m_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) + (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{VC} \quad (4-34)$$

Quando as variações das energias cinética e potencial associadas com o volume de controle e caudais de fluido são desprezáveis, a Equação 4-34 reduz-se a

$$Q - W = \sum m_s h_s - \sum m_e h_e + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{VC} \quad (\text{kJ}) \quad (4-35)$$

Novamente, os vários índices que surgem nas relações anteriores são e = entrada, s = saída, 1 = estado inicial e 2 = estado final do volume de controle.

Note-se que se não existir entrada ou saída de massa ($m_e = m_s = 0$), então os dois primeiros termos do lado direito da equação anterior anulam-se, e esta expressão reduz-se à relação da primeira lei aplicada a sistemas fechados (Figura 4-51).

Em seguida apresentam-se breves descrições dos diversos termos que surgem nas equações anteriores:

Q = transferência de calor total entre o volume de controle e a vizinhança durante o processo. É negativa se o calor sai do volume de controle e zero se este for bem isolado.

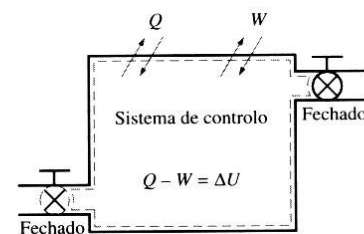


FIGURA 4-51

A equação da energia para um sistema com escoamento em regime uniforme reduz-se à equação de um sistema fechado, quando todas as entradas e saídas são fechadas.

CAPÍTULO 4

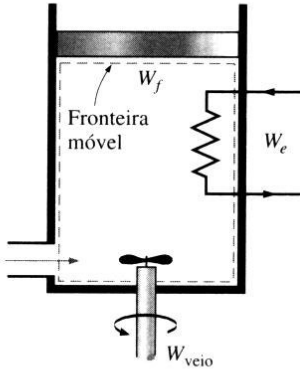
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA 4-52

Um sistema em escoamento em regime permanente pode envolver trabalho eléctrico, de fronteira e de veio, simultaneamente.

W = trabalho total associado ao volume de controlo. Pode envolver trabalho eléctrico, de veio e até mesmo de fronteira, se as fronteiras de volume de controlo se moverem durante o processo (Figura 4-52), sendo nulo se não existirem as formas anteriores.

m_s = massa que sai do volume de controlo. Toma o valor de zero se durante o processo não existir saída de massa do volume de controlo.

m_e = massa que entra no volume de controlo. Toma o valor de zero se não existir entrada de massa para o volume de controlo.

$U_1 = m_1 u_1$ = energia interna total inicial do volume de controlo. Toma o valor de zero para um volume de controlo inicialmente vazio.

$U_2 = m_2 u_2$ = energia interna total final do volume de controlo.

Embora ambos os processos de escoamento em regime permanente e uniforme sejam um tanto idealizados, os diversos processos reais podem ser aproximados suficientemente bem através de um deles, com resultados satisfatórios. O grau de aproximação depende da precisão desejada e da validade dos pressupostos efectuadas.

Os engenheiros encontram-se por vezes na posição de ter de optar entre uma análise simples e rápida, através de pressupostos simplificados à custa da precisão, sendo necessário reduzir as simplificações e os pressupostos e realizar um estudo profundo, de modo a obter resultados mais precisos. A escolha correcta depende do caso em estudo.

EXEMPLO 4-10 Enchimento de um reservatório rígido com vapor de água

Um reservatório rígido e isolado encontra-se inicialmente vazio, estando ligado a uma conduta de abastecimento, através de uma válvula, contendo vapor de água a 1 MPa e 300° C. Abre-se a válvula, permitindo a passagem lenta do vapor até que se encha o reservatório, atingindo a pressão de 1 MPa. Neste instante, a válvula é fechada. Determine a temperatura final do vapor contido no reservatório.

Solução Considera-se o *reservatório* como sistema (Figura 4-53). Este é um *volume de controlo*, visto que existe troca de massa através da fronteira do sistema. Observa-se que este é um processo de escoamento em regime não permanente, visto que ocorrem alterações no seio do volume de controlo. Este encontra-se inicialmente vazio, e portanto $m_1 = 0$ e $m_1 u_1 = 0$. Observa-se também que existe somente uma entrada e nenhuma saída de escoamento.

Pressupostos **1** Este processo pode ser analisado como um *escoamento uniforme*, visto que as propriedades do vapor permanecem constantes ao longo do processo. **2** As energias cinética e potencial dos escoamentos são desprezáveis, $ec \cong ep \cong 0$. **3** O reservatório é estacionário e, portanto, as variações das energias cinética e potencial são nulas. Ou seja, $\Delta Ec = \Delta Ep = 0$ e $\Delta E_{sistema} = \Delta U_{sistema}$. **4** Não existe trabalho de fronteira, eléctrico ou de veio. **5** O reservatório é isolado, não existindo transferência de calor.

Análise Tendo em conta que as energias microscópicas de fluidos estacionários ou em escoamento são representadas respectivamente através da energia interna u e a entalpia h ,

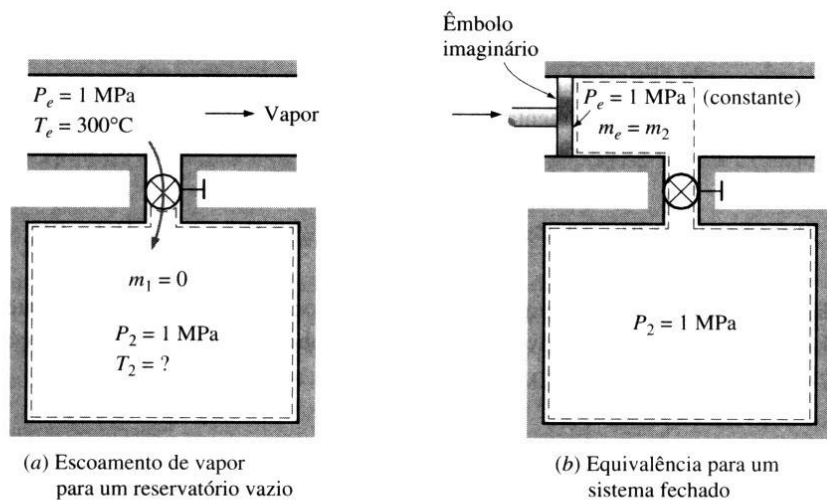


FIGURA 4-53

Esquema para o Exemplo 4-10.

os balanços de massa e de energia para este escoamento em regime uniforme podem ser expressos como

$$\text{Balanço de massa: } m_{\text{adm}} - m_{\text{sai}} = \Delta m_{\text{sistema}} \rightarrow m_e = m_2 - m_1^0 = m_2$$

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

$$m_e h_e = m_2 u_2 \quad (\text{visto que } W = Q = 0, \text{ } ec \cong ep \cong 0, m_1 = 0)$$

Combinando as expressões dos balanços de massa e energia, tem-se

$$u_2 = h_e$$

Ou seja, a energia interna final do vapor contido no reservatório é igual à entalpia do caudal de entrada neste. A entalpia do vapor nas condições de entrada é

$$\left. \begin{array}{l} P_e = 1 \text{ MPa} \\ T_e = 300^\circ \text{ C} \end{array} \right\} h_e = 3051,2 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Tabela A-6})$$

que é igual a u_2 . Como se conhecem agora duas propriedades do estado final, este encontra-se estabelecido, e a temperatura é determinada através da mesma tabela

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 1 \text{ MPa} \\ u_2 = 3051,2 \text{ kJ/kg} \end{array} \right\} T_2 = 456,2^\circ \text{ C}$$

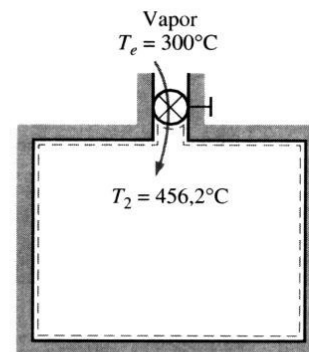


FIGURA 4-54

A temperatura do vapor aumenta de 300 para 456,2° C, à medida que entra no reservatório, devido à conversão de energia de escoamento em energia interna.

Discussão Note-se que a temperatura do vapor no reservatório aumentou em 156,2° C. Este resultado pode ser surpreendente à primeira vista, podendo-se interrogar de onde veio a energia para este aumento. A resposta reside no termo da entalpia $h = u + Pv$. Parte da energia representada pela entalpia é energia de escoamento Pv , sendo esta convertida em energia interna sensível, uma vez terminado o escoamento, mostrando-se no aumento de temperatura (Figura 4-54).

Solução alternativa Este problema pode também ser resolvido, considerando que a região interior do reservatório e a massa que é destinada a entrar constituem um

CAPÍTULO 4
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controle

sistema fechado, como mostra a Figura 4-53b. Como não existe troca de massa na fronteira, este pode ser encarado como um sistema fechado.

Durante o processo, o vapor a montante (do êmbolo imaginário) irá empurrar o vapor retido na conduta de alimentação para dentro do reservatório à pressão constante de 1 MPa. Então, o trabalho de fronteira realizado durante este processo é de

$$W_{f, adm} = -\int_1^2 P_e dV = -P_e(V_2 - V_1) = -P_e[V_{\text{reservatório}} - (V_{\text{reservatório}} + V_e)] = P_e V_e$$

Em que V_e representa o volume ocupado pelo vapor antes de entrar no reservatório e P_e é a pressão na fronteira móvel (superfície do êmbolo imaginário). O balanço de energia para um sistema fechado é expresso por

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

$$W_{f, adm} = \Delta U$$

$$m_e P_e v_e = m_2 u_2 - m_e u_e \quad u_2 = u_e + P_e v_e = h_e$$

visto que o estado inicial do sistema são as condições da conduta de vapor. Este resultado é idêntico ao obtido através de uma análise de escoamento uniforme. Novamente, o aumento de temperatura é causado pelo denominado escoamento de energia ou de trabalho que é a energia necessária para empurrar a substância para dentro do reservatório.

EXEMPLO 4-11 Cozinhar com uma panela de pressão

Uma panela de pressão cozinha alimentos muito mais rapidamente, pois mantém uma pressão e temperatura superior. A pressão no interior é controlada através de regulador (válvula) que mantém um valor constante, ao permitir a saída periódica de vapor, evitando a acumulação de pressão.

Uma dada panela de pressão tem um volume de 6 l e uma pressão de funcionamento manométrica de 75 kPa. Esta contém inicialmente 1 kg de água. Fornece-se calor à taxa de 500 W por 30 min após alcançar a pressão de funcionamento. Assumindo uma pressão atmosférica de 100 kPa, determine (a) a temperatura à qual se inicia o cozinhar e (b) a quantidade de água deixada na panela no fim do processo.

Solução Toma-se a *panela de pressão* como sistema (Figura 4-55). Isto é um *volume de controle*, visto que existe troca de massa na fronteira do sistema durante o processo. Observa-se que este é um processo de escoamento não permanente, pois ocorrem variações no interior do volume de controle. Existe apenas uma entrada e nenhuma saída para o escoamento de massa.

Pressupostos **1** Este processo pode ser analisado como de *escoamento uniforme*, visto que as propriedades de vapor que sai do volume de controle permanecem constantes ao longo de todo o processo. **2** As energias cinética e potencial do escoamento são desprezáveis, $ec \cong ep \cong 0$. **3** A panela de pressão é estacionária, sendo portanto a variação das energias cinética e potencial igual a zero; ou seja, $\Delta Ec = \Delta Ep = 0$ e $\Delta E_{\text{sistema}} = \Delta U_{\text{sistema}}$. **4** A pressão (e a temperatura) na panela permanecem constantes. **5** O vapor deixa a panela sob a forma de vapor saturado. **6** Não existe qualquer interação de trabalho. **7** O calor é transferido para a panela a uma taxa constante.

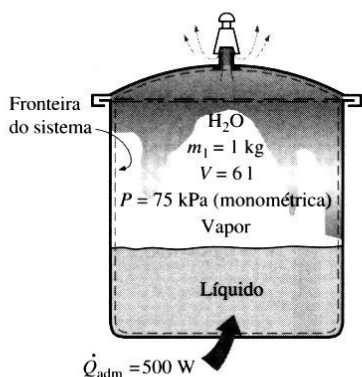


FIGURA 4-55
 Esquema para o Exemplo 4-11.

Análise (a) A pressão absoluta no interior da panela é

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{atm}} = 75 \text{ kPa} + 100 \text{ kPa} = 175 \text{ kPa}$$

Visto que as condições de saturação existem no interior durante todo o processo (Figura 4-56), a temperatura interior deve ser a de saturação correspondente a esta pressão. Da Tabela A-5, tem-se

$$T = T_{\text{sat @ } 175 \text{ kPa}} = 116,06^\circ \text{ C}$$

sendo cerca de 16° C superior à temperatura comum de cozedura.

(b) Observando que as energias microscópicas de fluidos (em escoamento ou não) são representadas pela entalpia h e pela energia interna u , respectivamente, a massa e o balanço de energia para um escoamento uniforme podem ser expressos como

Balanço de massa:

$$m_{\text{adm}} - m_{\text{sai}} = \Delta m_{\text{sistema}} \rightarrow -m_s = (m_2 - m_1)_{\text{VC}} \quad \text{ou} \quad m_s = (m_1 - m_2)_{\text{VC}}$$

Balanço de energia:

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

$$Q_{\text{adm}} - m_s h_s = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{\text{VC}} \quad (\text{visto que } W = 0, \text{ ec} \equiv \text{ep} \equiv 0)$$

Combinando estes dois, obtém-se

$$Q_{\text{adm}} = (m_1 - m_2) h_s + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{\text{VC}}$$

A quantidade de transferência de calor durante o processo é dada por

$$Q_{\text{adm}} = \dot{Q}_{\text{adm}} \Delta t = (0,5 \text{ kJ/s})(30 \times 60 \text{ s}) = 900 \text{ kJ}$$

O vapor deixa a panela à pressão de vapor saturado a 175 kPa ao longo de todo o processo (Figura 4-57). Assim:

$$h_e = h_g @ 175 \text{ kPa} = 2700,6 \text{ kJ/kg}$$

A energia interna inicial é determinada com base no título

$$v_1 = \frac{V}{m_1} = \frac{0,006 \text{ m}^3}{1 \text{ kg}} = 0,006 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$x_1 = \frac{v_1 - v_f}{v_{fg}} = \frac{0,006 - 0,001}{1,004 - 0,001} = 0,005$$

Assim:

$$u_1 = u_f + x_1 u_{fg} = 468,8 + (0,005)(2038,1) \text{ kJ/kg} = 497,0 \text{ kJ/kg}$$

e

$$U_1 = m_1 u_1 = (1 \text{ kg})(497 \text{ kJ/kg}) = 497 \text{ kJ}$$

A massa do sistema até ao estado final é de $m_2 = V/v_2$. Substituindo este na equação da energia, obtém-se

$$Q_{\text{adm}} = \left(m_1 - \frac{V}{v_2} \right) h_s + \left(\frac{V}{v_2} u_2 - m_1 u_1 \right)$$

Existem duas incógnitas na equação anterior, u_1 e v_2 . Assim, é necessário relacioná-las com uma única variável, de modo a ser possível o seu cálculo. Assumindo que ainda

Processos de escoamento
não permanente

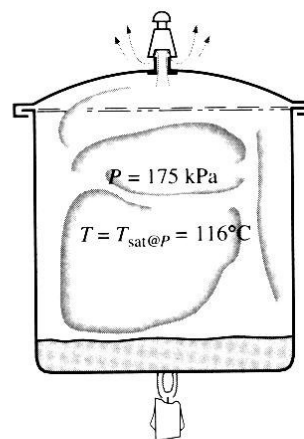


FIGURA 4-56

Desde que exista líquido no interior de uma panela de pressão, há condições de saturação, e a temperatura permanece constante.

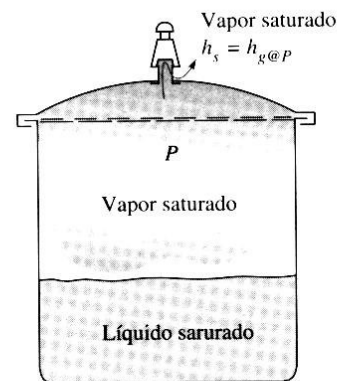


FIGURA 4-57

Numa panela de pressão, a entalpia do vapor existente é $h_{g@P}$ (entalpia de vapor saturado à pressão dada).

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

existe alguma água líquida no estado final (isto é, existem as condições de saturação), v_2 e u_2 podem ser expressos como

$$v_2 = v_f + x_2 v_{fg} = 0,001 + x_2(1,004 - 0,001) = \text{m}^3/\text{kg}$$

$$u_2 = u_f + x_2 u_{fg} = 486,8 + x_2(2\,038,1) \text{ kJ/kg}$$

Note-se que durante o processo de ebulição a pressão constante, as propriedades de cada fase permanecem constantes (apenas variam as quantidades). Quando essas expressões são substituídas na equação da energia dada acima, x_2 será a única incógnita, sendo determinada como

$$x_2 = 0,009$$

Então:

$$v_2 = 0,001 + (0,009)(1,004 - 0,001) \text{ m}^3/\text{kg} = 0,010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

e

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{0,006 \text{ m}^3}{0,01 \text{ m}^3/\text{kg}} = \mathbf{0,6 \text{ kg}}$$

Portanto, após 30 min, existem 0,6 kg de água (líquido + vapor) na panela de pressão.

4-5 ■ SUMÁRIO

O volume de controlo difere de um sistema fechado, pois envolve transferência de massa. Esta transporta energia, e portanto a massa e a energia contidas no sistema variam, à medida que se efectua a troca de massa. Os balanços de massa e de energia para *qualquer sistema* sujeito a *qualquer processo* podem ser expressos como

$$m_{\text{adm}} - m_{\text{sai}} = \Delta m_{\text{sistema}} \quad (\text{kg})$$

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

Podem também ser expressos, sob a forma de taxa, como

$$\dot{m}_{\text{adm}} - \dot{m}_{\text{sai}} = \Delta \dot{m}_{\text{sistema}} \quad (\text{kg/s})$$

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

O escoamento de massa através de uma secção por unidade de tempo é denominado *caudal mássico*, sendo denotado por \dot{m} , sendo expresso por

$$\dot{m} = \rho \mathcal{V}_{\text{med}} A \quad (\text{kg/s})$$

em que

ρ = massa volúmica, kg/m^3 ($= 1/v$)

\mathcal{V}_{med} = velocidade média do fluido normal a A , m/s

A = área da secção normal à direcção do escoamento, m^2

O volume de um fluido que escoar através de uma secção por unidade de tempo denomina-se *caudal volúmico* \dot{V} e é dado por

$$\dot{V} = \int_A v_n dA = v_{\text{med}} A \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Os caudais mássico e volúmico são relacionados por

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}$$

Os processos termodinâmicos que envolvem volumes de controlo podem ser classificados em dois grupos: processos de *escoamento em regime permanente* e de *escoamento em regime não permanente*. Durante um processo do primeiro tipo, o fluido escoar através do volume de controlo, de modo permanente, sem variar ao longo do tempo em qualquer ponto. Os conteúdos de massa e de energia de um volume de controlo permanecem constantes ao longo de um processo de escoamento em regime permanente. Tomando a transferência de calor *para* o sistema e o trabalho realizado *por* este como quantidades positivas, as equações de conservação da massa e da energia para processos de escoamento em regime permanente são expressas por

$$\sum \dot{m}_{\text{adm}} = \sum \dot{m}_{\text{sai}} \quad (\text{kg/s})$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \underbrace{\sum \dot{m}_s \left(h_s \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right)}_{\text{para cada saída}} - \underbrace{\sum \dot{m}_e \left(h_e \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{para cada admissão}} \quad (\text{kW})$$

em que o índice *e* representa a entrada, e o índice *s*, a saída. Estas são as formas mais generalizadas de equações para processos de escoamento em regime permanente. Para escoamentos de caudal único (uma entrada — uma saída), tais como tuberias, difusores, turbinas, compressores e bombas, simplifica-se da seguinte forma:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{kg/s})$$

ou
$$\frac{1}{v_1} v_1 A_1 = \frac{1}{v_2} v_2 A_2$$

e
$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (\text{kW})$$

Nas equações anteriores, os índices 1 e 2 denotam os estados de entrada e de saída, respectivamente.

Durante um processo de escoamento em regime permanente, o estado do volume de controlo pode variar ao longo do tempo mas de modo uniforme. As propriedades do fluido nas entradas e saídas são consideradas constantes durante todo o processo. A equação de conservação da energia para um processo de escoamento em regime permanente reduz-se a

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) + (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{\text{VC}}$$

Quando as variações da energia cinética e da energia potencial associadas ao volume de controlo e ao escoamento do fluido são desprezáveis, simplifica-se:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{\text{VC}} \quad (\text{kJ})$$

REFERÊNCIAS E SUGESTÕES DE LEITURA

1. A. Bejan. *Advanced Engineering Thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
2. W. Z. Black and J. G. Hartley. *Thermodynamics*. New York: Harper & Row, 1985.
3. J. R. Howell and R. O. Buckius. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1987.
4. J. B. Jones and G. A. Hawkins. *Engineering Thermodynamics*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons 1986.
5. W. C. Reynolds and H. C. Perkins. *Engineering Thermodynamics*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1977.
6. G. J. Van Wylen and R. E. Sonntag. *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.
7. K. Wark. *Thermodynamics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

EXERCÍCIOS**Análise generalizada de volumes de controlo**

- 4-1C*** Defina caudal mássico e caudal volúmico. Em que diferem?
- 4-2C** Quais são os diferentes mecanismos de transferência de energia de e para um volume de controlo?
- 4-3C** Que entende por energia de escoamento? Os fluidos em repouso possuem energia de escoamento?
- 4-4C** Quais as diferenças entre as energias de fluidos em escoamento e em repouso? Identifique as formas específicas de energia associadas a cada caso.

Processos de escoamento em regime permanente

- 4-5C** Quando é que um escoamento através de um volume de controlo é em regime permanente?
- 4-6C** Como caracteriza um sistema com escoamento em regime permanente?
- 4-7C** Um sistema com escoamento em regime permanente pode envolver trabalho de fronteira?

Tubeiras e difusores

- 4-8C** Um difusor é um dispositivo adiabático que diminui a energia cinética de um fluido através da redução da sua velocidade. O que acontece a esta energia cinética perdida?
- 4-9C** A energia cinética de um fluido aumenta à medida que este é acelerado numa tubeira adiabática. De onde vem esta energia?
- 4-10C** É desejável que exista transferência de calor de ou para um fluido à medida que este atravessa uma tubeira? Qual será o efeito desta transferência na velocidade de saída?

* Os estudantes devem responder a todas as perguntas conceptuais marcadas com «C».

4-11 Entra ar, em regime permanente, numa tubeira adiabática a 300 kPa, 200° C e 30 m/s e sai a 100 kPa e 180 m/s. A área de entrada da tubeira é de 80 cm². Determine (a) o caudal mássico, (b) a temperatura de saída do ar e (c) a área de saída da tubeira.

Solução: (a) 0,5304 kg/s; (b) 184,60° C; (c) 38,7 cm².

4-12 Vapor de água a 5 MPa e 500° C entra numa tubeira em regime permanente, com uma velocidade 80 m/s, e sai com 2 MPa e 400° C. A área de entrada da tubeira é de 50 cm² e verifica-se uma perda de calor de 90 kJ/s. Determine (a) o caudal mássico do vapor, (b) a sua velocidade de saída e (c) a área de saída da tubeira.

4-13 Numa tubeira adiabática entra dióxido de carbono em regime permanente a 1 MPa e 500° C, com um caudal mássico de 6000 kg/h, e sai a 100 kPa e 400 m/s. A área da entrada da tubeira é de 40 cm². Determine (a) a velocidade de entrada e (b) a temperatura de saída. *Solução:* (a) 60,8 m/s; (b) 685,8 K.

4-14E** Numa tubeira entra ar, em regime permanente, a 50 psia, 140° F e 150 ft/s e sai a 14,7 psia e 900 ft/s. Estima-se que a perda de calor é de 6,5 Btu/lbm de ar. A área de entrada da tubeira é de 0,1 ft². Determine (a) a temperatura de saída e (b) a área de saída da tubeira.

Solução: (a) 441,7 R; (b) 0,0417 ft².

4-15 Fluido frigorígeno 134a a 700 kPa e 100° C entra, em regime permanente, numa tubeira adiabática, com velocidade de 20 m/s, e sai a 300 kPa e 30° C. Determine (a) a velocidade de saída e (b) a relação entre as áreas de entrada e de saída A_1/A_2 .

4-16 Vapor de água a 3 MPa e 400° C entra numa tubeira adiabática, em regime permanente, com uma velocidade de 40 m/s, e sai a 2,5 MPa e 300 m/s. Determine (a) a temperatura de saída e (b) a relação entre as áreas de entrada e de saída A_1/A_2 .

4-17 Numa tubeira adiabática cuja relação de áreas de entrada e saída é de 2:1 entra ar a 600 kPa e 500 K, com uma velocidade 120 m/s, e sai a 380 m/s. Determine (a) a temperatura de saída e (b) a pressão de saída do ar.

Solução: (a) 436,5 K; (b) 330,8 kPa.

4-18 Ar a 80 kPa e 127° C entra, em regime permanente, num difusor adiabático, com um caudal de 6000 kg/h, e sai a 100 kPa. A velocidade do escoamento diminui, à medida que atravessa o difusor, de 230 para 30 m/s. Calcule (a) a temperatura de saída e (b) a área de saída do difusor.

4-19E Ar a 13 psia e 20° F entra em regime permanente num difusor, com uma velocidade 600 ft/s, e sai com uma velocidade baixa e a uma pressão de 14,5 psia. A área de saída do difusor é 5 vezes a de entrada. Determine (a) a temperatura de saída e (b) a velocidade de saída do ar.

4-20 Ar a 80 kPa, 27° C e 220 m/s entra num difusor, com um caudal de 2,5 kg/s, e sai a 42° C. A área de saída deste é de 400 cm². Estima-se que o ar perde calor durante o processo, a uma taxa de 18 kJ/s. Determine (a) a velocidade de saída e (b) a pressão de saída do ar.

Solução: (a) 62,0 m/s; (b) 91,1 kPa.

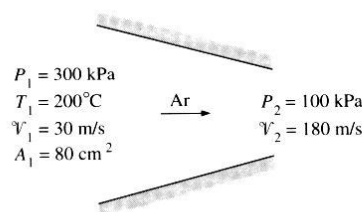


FIGURA P4-11

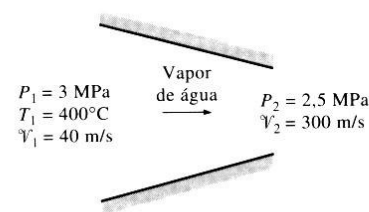


FIGURA P4-16

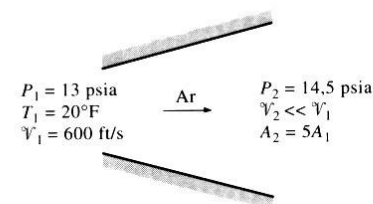


FIGURA P4-19E

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

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

4-21 Azoto gasoso a 60 kPa e 7° C entra, em regime permanente, num difusor adiabático, com uma velocidade de 200 m/s, e sai a 85 kPa e 22° C. Determine (a) a velocidade de saída do azoto e (b) a relação entre a área de entrada e de saída A_1/A_2 .

4-22 Fluido frigorígeno 134a entra, em regime permanente, num difusor num estado de vapor saturado a 700 kPa, com uma velocidade de 140 m/s, e sai a 800 kPa e 40° C. O fluido recebe calor a uma taxa de 3 kJ/s, à medida que atravessa o dispositivo. Sabendo que a área de saída é 80% superior à de entrada, (a) determine a velocidade de saída e (b) o caudal mássico.

Solução: (a) 71,7 m/s; (b) 0,655 kg/s.

Turbinas e compressores

4-23C Considere uma turbina adiabática funcionando em regime permanente. O débito de trabalho desta deve ser igual ao decréscimo de energia do vapor que a atravessa?

4-24C Considere uma turbina adiabática funcionando em regime permanente. Será que as temperaturas de entrada e de saída da turbina serão iguais?

4-25C Considere um compressor funcionando em regime permanente. Será que as massas volúmicas de entrada e de saída apresentam o mesmo valor?

4-26C Considere um compressor funcionando em regime permanente. Como compararia o caudal volúmico à entrada e à saída do compressor?

4-27C A temperatura do ar aumenta, à medida que este é comprimido por um compressor adiabático? Porquê?

4-28C Alguém propõe o seguinte sistema para arrefecer uma casa no Verão: comprimir o ar exterior, deixá-lo arrefecer até à temperatura exterior, passá-lo por uma turbina e descarregar o ar à saída desta para dentro da casa. Do ponto de vista termodinâmico, o sistema proposto é válido?

4-29 Numa turbina adiabática entra vapor de água em regime permanente. As condições de entrada são 10 MPa, 450° C e 80 m/s, e as de saída, 10 kPa, título de 92% e 50 m/s. O caudal mássico de vapor é de 12 kg/s. Determine (a) a variação de energia cinética, (b) a potência debitada e (c) a área de entrada da turbina. *Solução:* (a) -1,95 kJ/kg; (b) 10,2 MW; (c) 0,004 46 m².

4-30 Numa turbina adiabática entra vapor a 10 MPa e 400° C e sai a 20 kPa e com um título de 90%. Desprezando as variações das energias cinética e potencial, determine o caudal mássico necessário para desenvolver uma potência de 5 MW. *Solução:* 6,919 kg/s.

4-31E Escolha-se vapor de água em regime permanente através de uma turbina, com um caudal de 45 000 lbm/h, entrando a 1000 psia e 900° F e saindo a 5 psia, sob a forma de vapor saturado. Sabendo que a potência gerada é de 4 MW, determine a taxa de perda de calor do vapor.

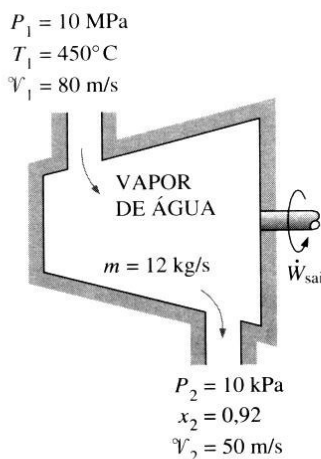


FIGURA P4-29

4-32 Numa turbina entra vapor de água a 10 MPa e 500° C, com um caudal de 3 kg/s, e sai a 20 kPa. Sabendo que a turbina desenvolve 2 MW, determine a temperatura de saída do vapor. Despreze a variação da energia cinética.

Solução: 110,8° C.

4-33 Árgon gasoso entra, em regime permanente, numa turbina adiabática a 900 kPa e 450° C, com uma velocidade de 80 m/s, e sai a 150 kPa e com uma velocidade de 150 m/s. A área de entrada da turbina é de 60 cm². Sabendo que a potência debitada é de 250 kW, determine a temperatura de saída do árgon.

Solução: 267° C.

4-34E Escoa-se ar, em regime permanente, através de uma turbina, entrando a 150 psia, 900° F e 350 ft/s e saindo a 20 psia, 300° F e 700 ft/s. A área de entrada da turbina é de 0,1 ft². Determine (a) o caudal mássico do ar e (b) o débito de potência da turbina.

4-35 Fluido frigorígeno 134a entra num compressor adiabático como vapor saturado a -20° C e sai a 0,7 MPa e 70° C. O caudal do fluido é de 1,2 kg/s. determine (a) a potência fornecida ao compressor e (b) o caudal volúmico do frigorígeno 134a à entrada do compressor.

4-36 Entra ar num compressor de uma central de turbinas a gás nas condições ambientais de 100 kPa e 25° C, com uma velocidade baixa, e sai a 1 MPa e 347° C, com uma velocidade de 90 m/s. O compressor é arrefecido a uma taxa de 15 000 kJ/min, e a potência fornecida é de 250 kW. Determine o escoamento do ar. *Solução:* 0,680 kg/s.

4-37E É comprimido ar desde 14,7 psia e 60° F para uma pressão de 150 psia, enquanto que é arrefecido a uma taxa de 10 Btu/lbm pela circulação de água através do exterior do compressor. O caudal volúmico de ar nas condições de entrada é de 5000 ft³/min e a potência consumida pelo compressor é de 700 cv. Determine (a) o caudal mássico do ar e (b) a temperatura de saída do compressor. *Solução:* (a) 6,36 lbm/s; (b) 781 R.

4-38 É comprimido hélio desde 120 kPa e 310 K para 700 kPa e 430 K. Durante o processo ocorre uma perda de calor de 20 kJ/kg. Desprezando a variação de energia cinética, determine a potência que é necessário fornecer ao compressor, de forma a obter um caudal mássico de 90 kg/min.

4-39 Num compressor adiabático entra dióxido de carbono a 100 kPa e 300 K com um caudal de 0,5 kg/s e sai a 600 kPa e 450 K. Desprezando a variação de energia cinética, determine (a) o caudal volúmico de dióxido de carbono na entrada do compressor e (b) a potência a fornecer ao compressor.

Solução: (a) 0,28 m³/s; (b) 68,8 kW.

Válvulas de estrangulamento

4-40C Porque se utilizam dispositivos de estrangulamento em aplicações de refrigeração e de ar condicionado?

4-41C Durante um processo de estrangulamento, a temperatura de um fluido desce de 30 para -20° C. Este processo pode ocorrer adiabaticamente?

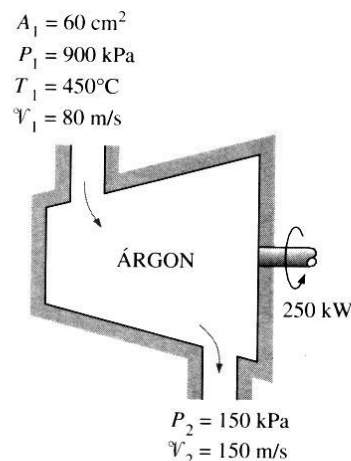


FIGURA P4-33

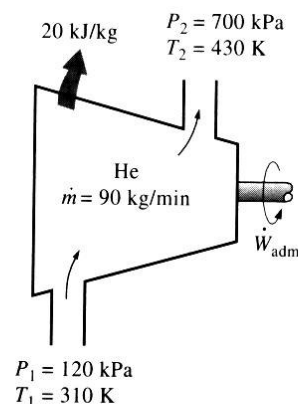


FIGURA P4-38

CAPÍTULO 4

Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

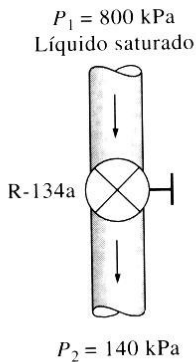


FIGURA P4-44

4-42C Espera uma descida da temperatura do ar, à medida que este sofre um processo de escoamento estrangulado em regime permanente?

4-43C Espera uma variação de temperatura de um líquido, à medida que este é estrangulado? Como?

4-44 Fluido frigorígeno 134a é estrangulado desde o estado de líquido saturado a 800 kPa até a uma pressão de 140 kPa. Determine a descida de temperatura durante este processo e o volume específico final do frigorígeno.

Solução: 50,1° C, 0,0454 m³/kg.

4-45 Fluido frigorígeno 134a a 800 kPa e 25° C é estrangulado até uma temperatura de -20° C. Determine a sua pressão e energia interna no estado final.

Solução: 133 kPa, 78,8 kJ/kg.

4-46 Uma válvula isolada termicamente é utilizada para estrangular vapor de água desde 8 MPa e 500° C para 6 MPa. Determine a temperatura final do vapor.

Solução: 490,1° C.

4-47E Ar a 200 psia e 90° F é estrangulado até à pressão atmosférica de 14,7 psia. Determine a temperatura final do ar.

Tanques misturadores e permutadores de calor

4-48C Quando dois caudais de fluidos são misturados num tanque, a temperatura de mistura pode ser inferior à temperatura dos dois caudais? Justifique.

4-49C Considere um processo de mistura de escoamento em regime permanente. Sob que condições irá a energia transportada para dentro do volume de controlo, através dos caudais de entrada, ser igual à energia transportada para fora deste, pelo caudal de saída?

4-50C Considere um permutador de calor com escoamento em regime permanente envolvendo dois caudais de fluidos diferentes. Em que condições a quantidade de calor perdida por um fluido irá ser igual à ganha pelo outro?

4-51 Um caudal de água quente de 0,5 kg/s a 80° C entra num tanque misturador onde se junta a um de água fria a 20° C. Sabendo que a mistura deve sair do tanque a 42° C, determine o caudal mássico de água fria. Considere ambos os caudais à pressão de 250 kPa. *Solução:* 0,864 kg/s.

4-52 Um caudal de 1,8 kg/s de água líquida a 300 kPa e 20° C é aquecida num tanque misturador através da mistura com vapor sobreaquecido a 300 kPa e 300° C. Sabendo que a mistura sai a 60° C, determine o caudal mássico necessário de vapor sobreaquecido. *Solução:* 0,107 kg/s.

4-53 Em centrais térmicas a vapor, utiliza-se frequentemente vapor extraído da turbina para pré-aquecer a água de entrada da caldeira. Considere que a mistura se processa a 800 kPa. A água a 50° C deve ser aquecida através de vapor saturado a 200° C e 8000 kPa. Num processo ideal, a mistura sai como líquido saturado. Determine a relação de caudais mássicos de água e vapor sobreaquecido. *Solução:* 4,14.

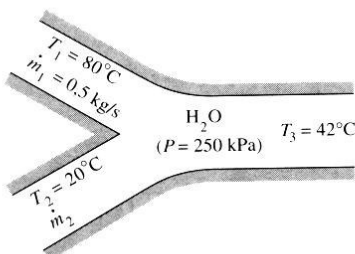


FIGURA P4-51

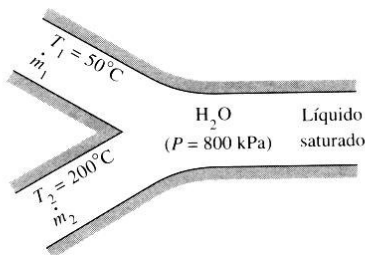


FIGURA P4-53



4-54E Água a 50°F e 50 psia é aquecida num tanque pela mistura com vapor saturado a 50 psia . Sabendo que os caudais mássicos são de igual valor, determine a temperatura e o título à saída. *Solução:* 281°F ; $0,374$.

4-55 Um caudal de fluido frigorígeno 134a a 1 MPa e 12°C é misturado com outro a 1 MPa e 60°C . Sabendo que ambos entram num tanque misturador com o mesmo caudal mássico, determine a temperatura e o título à saída.

4-56 Fluido frigorígeno 134a a 1 MPa e 80°C é arrefecido por ar até 1 MPa e 30°C num condensador. O ar entra a 1 kPa e 27°C com um caudal volúmico de $800\text{ m}^3/\text{min}$ e sai a 95 kPa e 60°C . Determine o caudal mássico do frigorígeno. *Solução:* $139\text{ kg}/\text{min}$.

4-57E Entra ar na secção do evaporador de um aparelho de ar condicionado a $14,7\text{ psia}$ e 90°F , com um caudal volúmico de $200\text{ ft}^3/\text{min}$. Fluido frigorígeno 134a a 20 psia e 30% de título entra no evaporador, com um caudal de $4\text{ lbm}/\text{min}$, e sai como vapor saturado à mesma pressão. Determine (a) a temperatura de saída do ar e (b) a taxa de transferência de calor do ar.

4-58 Fluido frigorígeno 134a a 800 kPa , 70°C e $8\text{ kg}/\text{min}$ é arrefecido por água num condensador até se transformar em líquido saturado à mesma pressão. A água entra no condensador a 300 kPa e 15°C e sai a 30°C e à mesma pressão. Determine o caudal mássico de água necessário para arrefecer o frigorígeno.

Solução: $27,0\text{ kg}/\text{min}$.



4-59E Num sistema de aquecimento a vapor, é aquecido ar ao passar por tubos contendo vapor em regime permanente. Este entra a 30 psia , 400°C e com um caudal de $15\text{ lbm}/\text{min}$, e sai a 25 psia e 212°F . O ar entra a $14,7\text{ psia}$ e 80°F e sai a 130°F . Determine o caudal volúmico do ar à entrada.

4-60 Num condensador de uma central térmica entra vapor de água a 20 kPa , 95% de título e um caudal de $20\,000\text{ kg}/\text{h}$. Este deve ser arrefecido através da água de um rio que circula pelos tubos do condensador. Para evitar a poluição térmica, a temperatura da água do rio não deve aumentar em mais de 10°C . Sabendo que o vapor deve sair do condensador no estado de líquido saturado a 20 kPa , determine o caudal mássico da água de arrefecimento.

Solução: $17\,866\text{ kg}/\text{min}$.

4-61 Num permutador de calor de uma central térmica é condensado vapor até à temperatura de 50°C ($h_{fg} = 2\,305\text{ kJ}/\text{kg}$) através de um caudal de água de $101\text{ kg}/\text{s}$, proveniente de um lago [$c_p = 4,20\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$], que entra a 18°C e sai a 27°C . Determine a taxa de condensação do vapor no condensador.

Solução: $1,65\text{ kg}/\text{s}$.

4-62 Um permutador de calor deve aquecer água [$c_p = 4,18\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$] de 25 até 60°C , com um caudal de $0,2\text{ kg}/\text{s}$. O aquecimento é realizado através da água de uma nascente geotérmica [$c_p = 4,31\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$], disponível a 140°C e com um caudal mássico de $0,3\text{ kg}/\text{s}$. O tubo interior é de parede fina e possui um diâmetro de $0,8\text{ cm}$. Determine a taxa de transferência de calor e a temperatura de saída da água da nascente.

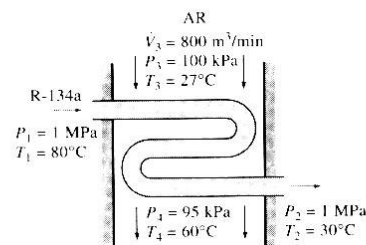


FIGURA P4-56

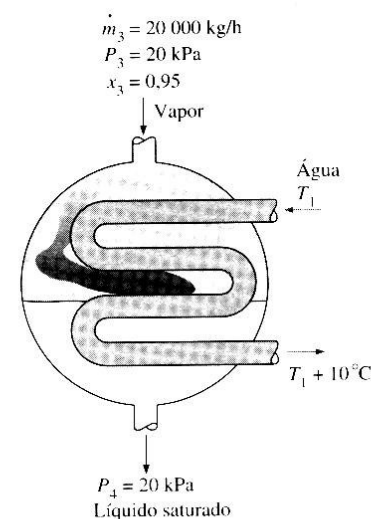


FIGURA P4-60

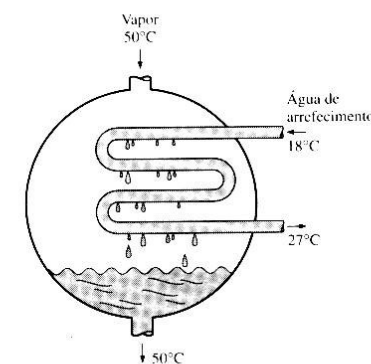


FIGURA P4-61

CAPÍTULO 4

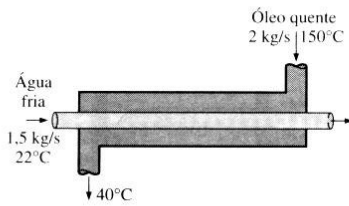
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA P4-64

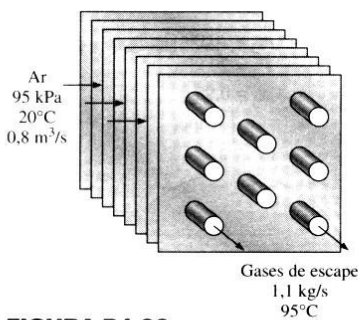


FIGURA P4-66

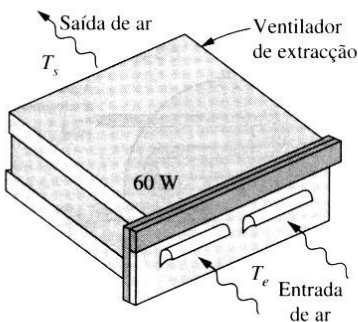


FIGURA P4-69

4-63 Um permutador de calor arrefece um caudal de 2 kg/s de etileno glicol [$c_p = 2,56 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], desde 80°C até 40°C , através de água [$c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], que entra a 20°C e sai a 55°C . Determine (a) a taxa de transferência de calor e (b) o caudal mássico da água.

4-64 Um permutador de calor de tubo duplo de parede fina em contracorrente é utilizado para arrefecer óleo [$c_p = 2,20 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] de 150 para 40°C e com um caudal de 2 kg/s, com água [$c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], que entra a 22°C com um caudal de 1,5 kg/s. Determine a taxa de transferência de calor e a temperatura de saída da água.

4-65 Água fria [$c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] entra num permutador de calor em contracorrente de tubo duplo de parede fina a 15°C com um caudal de 0,25 kg/s e é aquecida até 45°C por água quente [$c_p = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], que entra a 100°C , com um caudal de 3 kg/s. Determine a taxa de transferência de calor e a temperatura de saída da água quente.

4-66 Ar [$c_p = 1,005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] é pré-aquecido, através de gases de escape quentes, num permutador de calor de fluxo cruzado, antes de entrar numa fornalha. O ar entra no permutador a 95 kPa e 20°C , com um caudal de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Os gases de escape [$c_p = 1,10 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] entram a 180°C , com um caudal de 1,1 kg/s, e saem a 95°C . Determine a taxa de transferência de calor para o ar e a sua temperatura de saída.

4-67 Um permutador de calor isolado, de tubo concêntrico, é utilizado para aquecer água [$c_p = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], de 20 para 70°C , com caudal de 4,5 kg/s. Fornece-se calor através de óleo quente [$c_p = 2,30 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] que entra a 170°C , com um caudal de 10 kg/s. Determine a taxa de transferência de calor e a temperatura de saída do óleo.

4-68E Vapor de água a 90°F ($h_{fg} = 1043 \text{ Btu}/\text{lbm}$) é condensado num permutador de calor de tubo concêntrico. A água de arrefecimento [$c_p = 1,0 \text{ Btu}/(\text{lbm} \cdot ^\circ\text{F})$] entra a 60°F , com um caudal de 115,3 lbm/s, e sai a 73°F . Assumindo que o permutador é isolado, determine a taxa de transferência de calor e a taxa de condensação do vapor.

Escoamento em tubos e condutas

4-69 Um computador pessoal, cujos componentes electrónicos consomem 60 W de potência nas condições de carga total, é arrefecido com um ventilador. Este computador deve poder funcionar a temperaturas ambientes até 45°C e altitudes de 3400 m onde a pressão atmosférica média é de 66,63 kPa. A temperatura de saída do ar não deve superar 60°C , de modo a cumprir com os requisitos de fiabilidade, e a sua velocidade também não deve exceder 110 m/min na saída da caixa do computador onde se encontra instalado o ventilador, de modo a manter o nível de ruído. Determine o caudal que o ventilador deve fornecer e o diâmetro da conduta onde este está instalado.

4-70 Repita o Exercício 4-69 para um computador que consome 100 W.

4-71E Entra água nos tubos de uma placa fria a 95° F, com uma velocidade média de 60 ft/min, e sai a 105° F. O diâmetro dos tubos é de 0,25 in. Assumindo que 15% do calor gerado é dissipado pelos componentes para o ambiente, por convecção e radiação, e os restantes 85% são removidos pela água de arrefecimento, determine a quantidade de calor gerada pelos componentes electrónicos montados na placa fria. *Solução:* 263 W.

4-72 Uma caixa electrónica selada é arrefecida por água da torneira que se escoa através de canais entre duas paredes. Estabelece-se que o aumento de temperatura da água não deve exceder 4° C. A potência a dissipar é de 2 kW, sendo totalmente removida pela água. Sabendo que a caixa funciona durante 24 h/dia e 365 dia por ano, determine a quantidade de água por ano utilizada.

4-73 Repita o Exercício 4-72 para uma potência de 3 kW.

4-74 Uma bobina de 2 m de largura de aço Mn de 0,5 cm de espessura [$\rho = 785 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,454 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] sai de um forno a 820° C e é arrefecida num banho de óleo a 45° C até à temperatura de 51,1° C. Sabendo que a chapa se desloca a uma velocidade constante de 10 m/min, determine a taxa de calor que deve ser removida do óleo, de modo a manter a sua temperatura constante.

Solução: 437 kW.

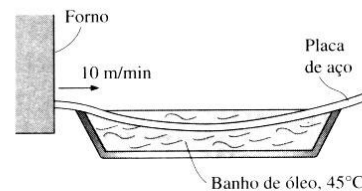


FIGURA P4-74



4-75 Os componentes de um sistema electrónico dissipam 180 W, encontrando-se localizados numa conduta horizontal de 1,4 m de comprimento e de 20 × 20 cm de secção. Os componentes são arrefecidos por ar forçado que entra na conduta a 30° C e 1 atm, com um caudal de 0,6 m³/min, e sai a 40° C. Determine a taxa de transferência de calor das paredes exteriores da conduta para o ambiente. *Solução:* 64,3 W.

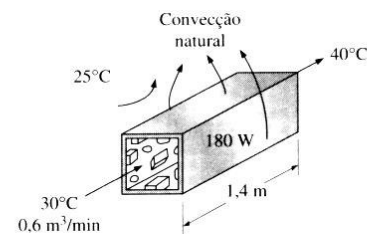


FIGURA P4-75

4-76 Repita o Exercício 4-75 para uma conduta de secção circular com 10 cm de diâmetro.

4-77E As necessidades de água quente de uma residência devem ser conseguidas pelo aquecimento de um caudal de 4 lbm/s, de 55 para 200° F, através de um colector solar parabólico. A água passa por um tubo fino de alumínio, com 1,25 in de diâmetro, cuja superfície exterior é anodizada em preto, de modo a maximizar a capacidade de absorção solar. O eixo do tubo coincide com a linha focal do colector, e uma manga de vidro é colocada no exterior, de modo a minimizar as perdas de calor. Sabendo que a energia solar é transferida para a água a uma taxa de 350 Btu/h por ft de comprimento de tubo, determine o comprimento necessário do colector, de modo a cumprir as necessidades.

4-78 Considere uma placa oca de circuito impresso de 12 cm de altura e 18 de comprimento, dissipando um total de 20 W. A largura da passagem de ar no meio desta placa é de 0,25 cm. Sabendo que o ar para arrefecimento entra no canal de 12 cm de largura com um caudal de 0,8 l/s, determine a temperatura média de saída. *Solução:* 53,7° C.

CAPÍTULO 4

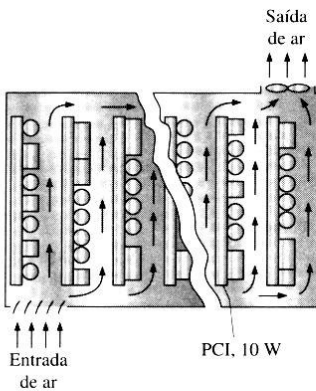
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA P4-79

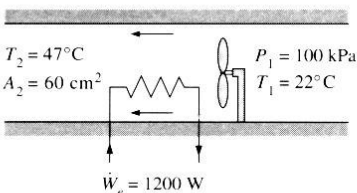


FIGURA P4-83

4-79 Um computador contendo 8 PCI, cada um dissipando 10 W, é arrefecido através de um ventilador. A altura de cada PCI é de 12 cm e o comprimento de 18 cm. O ar é fornecido por um ventilador de 25 W montado na entrada. Sabendo que o aumento de temperatura do ar que atravessa a caixa do computador não deve exceder 10° C, determine (a) o caudal que o ventilador deve fornecer e (b) a fracção do aumento de temperatura que é devido ao calor gerado pelo ventilador e o seu motor. *Solução:* (a) 0,010 4 kg/s; (b) 31%.

4-80 Água quente a 90° C entra numa secção de 15 m de um tubo de ferro fundido cujo diâmetro interior é de 4 cm, com uma velocidade média de 0,8 m/s. A superfície exterior do tubo está exposta a ar frio a 10° C. Sabendo que a água sai do tubo a 88° C, determine a taxa de perda de calor.

4-81 Um recinto com 5 × 6 × 8 m é aquecido por um aquecedor eléctrico, colocado numa conduta pequena. Inicialmente, o recinto encontra-se a 15° C e a pressão atmosférica local é de 98 kPa. O recinto perde calor continuamente para o exterior a uma taxa de 200 kJ/min. Um ventilador de 200 W faz circular o ar através da conduta, com um caudal mássico médio de 50 kg/min. A conduta pode ser considerada adiabática e não existe qualquer troca de ar com o exterior. Sabendo que demora 15 min para que a temperatura do ar no recinto alcance o valor médio de 25° C, calcule (a) a potência do aquecedor eléctrico e (b) o aumento de temperatura que o ar sofre ao passar pelo aquecedor.

4-82 Uma residência tem um sistema de aquecimento eléctrico que consiste num ventilador de 300 W e um elemento de resistências colocado numa conduta. O ar escoar-se em regime permanente através da conduta, com um caudal de 0,6 kg/s e sofre um aumento de temperatura de 5° C. Estima-se que a taxa de perda de calor da conduta seja de 400 W. Determine a potência nominal das resistências. *Solução:* 3,12 kW.

4-83 Um secador de cabelo é basicamente constituído por uma conduta onde é colocada uma série de resistências eléctricas. Um pequeno ventilador admite o ar exterior e fá-lo passar pelas resistências, onde é aquecido. Num secador de cabelo de 1200 W entra ar a 100 kPa e 22° C e sai a 47° C. A área da secção de saída do secador é de 60 cm². Desprezando o consumo do ventilador e as perdas de calor através das paredes, determine (a) o caudal volúmico do ar na entrada do secador e (b) a velocidade de saída.

4-84 As condutas de um sistema de aquecimento passam por um local não climatizado. Devido às perdas de calor, a temperatura do ar na conduta desce 4° C. Sabendo que o caudal mássico do ar é de 120 kg/min, determine a taxa de perda de calor para o ambiente frio.

4-85E Numa conduta de ar condicionado entra ar a 15 psia e 50° F, com um caudal volúmico de 450 ft³/min. O diâmetro da conduta é de 10 in e transfere-se calor da vizinhança para o ar a uma taxa de 2 Btu/lbm. Determine (a) a velocidade do ar na entrada da conduta e (b) a temperatura de saída deste.

4-86 É aquecida água num tubo isolado de diâmetro constante através de um aquecedor eléctrico de 7 kW. Sabendo que a água entra no aquecedor em regime permanente a 15° C e sai a 70° C, determine o caudal mássico.

4-87 É necessário bombear água de um poço até ao topo de um edifício de 200 m de altura. Existe uma bomba de 15 kW na cave, e a superfície livre da água do poço encontra-se a 40 m abaixo do nível do solo. Desprezando qualquer transferência de calor e efeito de atrito, determine o caudal mássico que esta bomba pode manter.

4-88 Entra vapor num tubo longo e horizontal, com um diâmetro de entrada de $D_1 = 12$ cm, a 1 MPa e 250° C, com uma velocidade de 2 m/s. Mais a jusante, as condições são de 800 kPa e 200° C, e o diâmetro é de $D_2 = 10$ cm. Determine (a) o caudal mássico de vapor e (b) a taxa de transferência de calor.

Solução: (a) 0,097 2 kg/s; (b) -10,04 kJ/s.

4-89E Uma bomba de 5 cv é utilizada para elevar água do nível de um lago para 75 ft, medidos desde a superfície livre do lago. A conduta de admissão encontra-se a 6 ft abaixo da superfície livre. A temperatura da água aumenta em 0,1° F durante este processo, devido aos efeitos de atrito. Desprezando qualquer transferência de calor e variação da energia cinética, determine o caudal mássico da água.

4-90 A superfície livre da água de um poço encontra-se 20 m abaixo do nível do solo. Esta água deve ser bombeada em regime permanente até uma altura de 30 m acima do nível do solo. Desprezando qualquer transferência de calor, variação da energia cinética e efeitos de atrito, determine a potência necessária a fornecer à bomba, de modo a que esta entregue, em regime permanente, 1,5 m³/min. *Solução:* 12,3 kW.

Processos de escoamento em regime não permanente

4-91C Num processo de regime não permanente, a quantidade de massa que entra num volume de controlo deve ser igual à que sai? Verifica-se o mesmo para a energia?

4-92C Em que condições um processo de escoamento em regime não permanente pode ser aproximado a um em regime permanente?

4-93C Um sistema com escoamento em regime uniforme pode envolver trabalho de fronteira?

4-94C A válvula de um reservatório rígido adiabático, inicialmente vazio, é aberta, deixando entrar ar a 30° C. Quando a pressão no interior atingir a atmosférica, a temperatura aumenta para 150° C. Explique o que provocou este aumento de temperatura.

4-95C Quando uma lata contendo um refrigerante a 500 kPa e 25° C é ligeiramente aberta, permitindo a saída da bebida, forma-se uma camada de gelo na superfície exterior da lata. Explique como ocorre.

4-96C Uma válvula de um reservatório rígido isolado contendo ar a elevada pressão é ligeiramente aberta, permitindo a saída de algum ar. Irá a temperatura do ar do reservatório alterar-se durante este processo? Como?

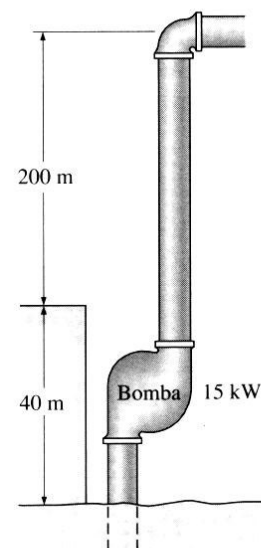


FIGURA P4-87

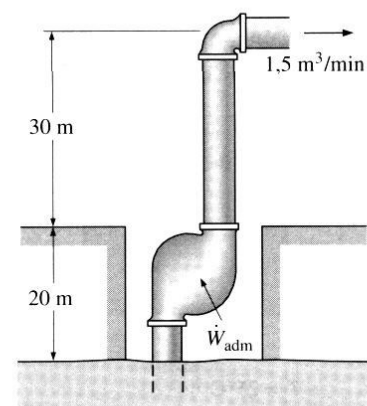


FIGURA P4-90

CAPÍTULO 4
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controle

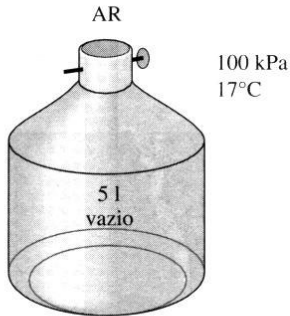


FIGURA P4-97

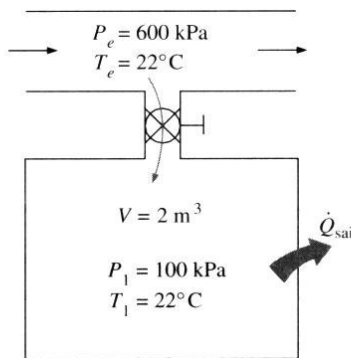


FIGURA P4-99

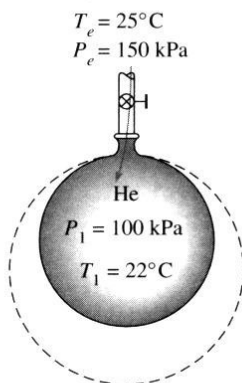


FIGURA P4-102

Processos de enchimento

4-97 Considere uma garrafa rígida de 5 l vazia, colocada num ambiente a 100 kPa e 17° C. Uma válvula no gargalo é aberta, permitindo a entrada de ar. Uma vez no interior, o ar alcança o equilíbrio térmico com a atmosfera devido à transferência de calor através da parede da garrafa. A válvula permanece aberta durante o processo, de modo a que o ar alcance o equilíbrio mecânico com o ambiente. Determine a transferência de calor através da parede da garrafa durante este processo de enchimento. *Solução:* 0,5 kJ.

4-98 Um reservatório rígido e isolado encontra-se inicialmente vazio. Abre-se uma válvula, e ar atmosférico a 95 kPa e 17° C entra, até que a pressão no interior atinja 95 kPa. Neste instante, a válvula é fechada. Determine a temperatura final do ar. Considere calores específicos constantes. *Solução:* 406 K.

4-99 Um reservatório rígido de 2 m³ contém inicialmente ar a 100 kPa e 22° C. O reservatório está ligado a uma conduta de alimentação, contendo ar a 600 kPa e 22° C, através de uma válvula. A válvula é aberta, permitindo a entrada de ar para o reservatório, até que este alcance a pressão da conduta, fechando-se a válvula neste instante. Um termômetro no interior do reservatório indica uma temperatura final de 77° C. Determine (a) a massa de ar que entrou no reservatório e (b) a quantidade de calor transferida. *Solução:* (a) 9,58 kg; (b) $Q_{\text{sai}} = 339,4 \text{ kJ}$.

4-100 Um reservatório rígido de 0,2 m³ contém inicialmente fluido refrigerante 134a a 8° C. Neste estado, 60% da massa encontra-se na fase de vapor, e o restante, na fase líquida. O reservatório está ligado através de uma válvula a uma conduta de alimentação contendo refrigerante a 1 MPa e 120° C. Abre-se a válvula ligeiramente, permitindo a entrada do fluido. Quando a pressão no reservatório atingir 800 kPa, todo o refrigerante do reservatório se encontra na fase de vapor, sendo fechada a válvula neste instante. Determine (a) a temperatura final no reservatório, (b) a massa de refrigerante admitida e (c) a transferência de calor entre o sistema e a vizinhança.

4-101E Um reservatório rígido de 4 ft³ contém inicialmente vapor de água saturado a 200° F. O reservatório está ligado, através de uma válvula, a uma conduta de alimentação que transporta vapor a 160 psia e 400° F. Abre-se a válvula permitindo a entrada de vapor no reservatório. Ocorre uma transferência de calor com a vizinhança, de modo a que a temperatura permaneça sempre constante e igual a 250° F. A válvula é fechada quando se verifica que metade do volume do reservatório é ocupada com água líquida. Calcule (a) a pressão final, (b) a quantidade de vapor admitida e (c) a quantidade de calor transferido. *Solução:* (a) 29,82 psia; (b) 117,5 lbm; (c) -117,539 Btu.

4-102 Um balão contém inicialmente 65 m³ de hélio gasoso nas condições atmosféricas de 100 kPa e 22° C. O balão está ligado através de uma válvula a um reservatório grande que contém hélio, gasoso a 150 kPa e 25° C. Abre-se

a válvula, permitindo a entrada de hélio, até que se atinja o equilíbrio de pressão. O material do balão é tal que o seu volume aumenta linearmente com a pressão. Sabendo que não existe transferência de calor durante este processo, calcule a temperatura final do balão. *Solução:* 320,2 K.

4-103 Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical contém inicialmente $0,01 \text{ m}^3$ de vapor de água a 200°C . A massa do êmbolo é tal que mantém uma pressão constante no interior de 500 kPa. Permite-se a entrada de vapor a 1 MPa e 350°C através de uma conduta de alimentação, até que o volume interior duplique. Desprezando qualquer transferência de calor, determine (a) a temperatura final do vapor no cilindro e (b) a quantidade de massa que entrou.

Solução: (a) $262,2^\circ \text{C}$; (b) 0,0176 kg.

4-104 Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical contém inicialmente 10 kg de água, 8 dos quais na fase de vapor. A massa do êmbolo é tal que mantém uma pressão constante no interior de 300 kPa. Permite-se a entrada de vapor a 0,5 MPa e 350°C através de uma conduta de alimentação, até que o volume interior duplique. Desprezando qualquer transferência de calor, determine (a) a temperatura final do vapor no cilindro e (b) a quantidade de massa que entrou.

Solução: (a) $133,6^\circ \text{C}$; (b) 9,78 kg.

4-105 Um reservatório rígido de $0,1 \text{ m}^3$ contém inicialmente fluido refrigerante 134a a 1 MPa e 100% de título. O reservatório está ligado, através de uma válvula, a uma conduta de alimentação que transporta refrigerante a 1,2 MPa e 30°C . Abre-se a válvula, permitindo a entrada de fluido, sendo fechada quando se observa que o reservatório contém líquido saturado a 1,2 MPa. Determine (a) a massa de fluido que entrou no reservatório e (b) a quantidade de calor transferido. *Solução:* (a) 107,1 kg; (b) 1825 kJ.

Processos de descarga

4-106 Um reservatório rígido de $0,3 \text{ m}^3$ está inicialmente repleto de líquido saturado de água a 200°C . Uma válvula no fundo do reservatório é aberta, descarregando-o. Transfere-se calor para a água, de modo a que a temperatura no reservatório permaneça constante. Determine a quantidade de calor que deve ser transferida, até que se tenha descarregado metade da massa total.

4-107 Um reservatório rígido de $0,1 \text{ m}^3$ contém fluido refrigerante 134a saturado a 800 kPa. Inicialmente, 40% do volume é ocupado por líquido, e o restante por vapor. Abre-se uma válvula no fundo do reservatório, extraíndo-se o líquido. Transfere-se calor para o fluido, de modo a que a pressão permaneça constante. Determine a transferência de calor total deste processo.

Solução: 267,6 kJ.

4-108E Um reservatório rígido de 4 ft^3 contém refrigerante 134a saturado a 100 psia. Inicialmente, 20% do volume é ocupado por líquido, e o restante por vapor. Abre-se uma válvula no fundo do reservatório extraíndo-se o líquido. Transfere-se calor para o fluido, de modo a que a pressão permaneça constante. Determine a transferência de calor total deste processo.

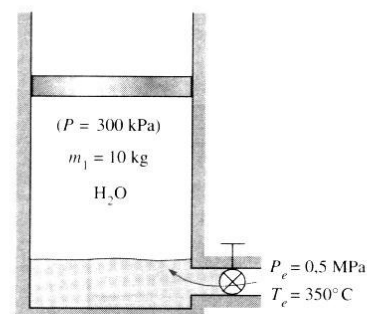


FIGURA P4-104

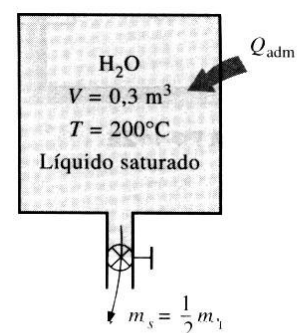


FIGURA P4-106

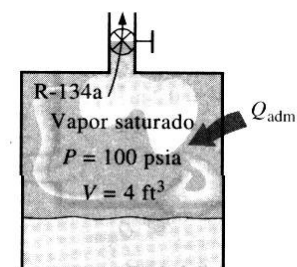


FIGURA P4-108E

CAPÍTULO 4

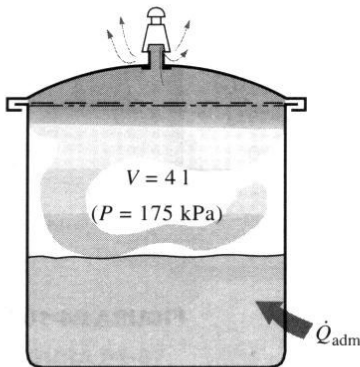
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controle

FIGURA P4-110

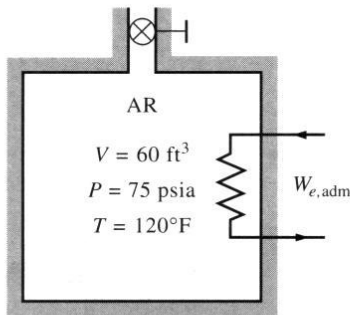


FIGURA P4-112E

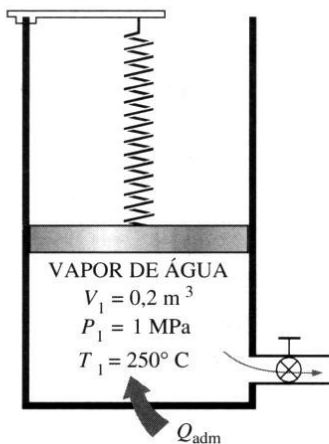


FIGURA P4-115

4-109 Um reservatório rígido de $0,2 \text{ m}^3$, munido de um regulador de pressão, contém vapor de água a 2 MPa e 300°C . O vapor no reservatório é aquecido, e o regulador mantém a pressão constante, mas a temperatura no interior aumenta. Determine o calor transferido quando a temperatura atingir 500°C .

4-110 Uma panela de pressão de 4 l tem uma pressão de funcionamento de 175 kPa . Inicialmente, metade do volume é composto por líquido, e o restante é vapor. Sabendo que não se pretende que se esgote a água líquida durante 1 h , determine a taxa máxima de transferência de calor ocorrida.

4-111 Um reservatório isolado de $0,08 \text{ m}^3$ contém hélio a 2 MPa e 80°C . Abre-se uma válvula permitindo a saída de algum gás. Esta é fechada quando metade da massa inicial sai. Determine a temperatura e a pressão final do reservatório. *Solução:* 225 K , 637 kPa .

4-112E Um reservatório rígido isolado de 60 ft^3 contém ar a 75 psia e 120°F . Abre-se uma válvula permitindo a saída de ar, até que a pressão no interior baixe para 30 psia . Mantém-se a temperatura durante o processo através de aquecedores elétricos colocados no interior do reservatório. Determine o trabalho elétrico realizado.

4-113 Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical contém inicialmente $0,2 \text{ m}^3$ de ar a 20°C . A massa do êmbolo é tal que mantém no interior uma pressão constante de 300 kPa . Abre-se uma válvula permitindo a saída de ar, até que o volume do cilindro decresça para metade. Ocorre uma transferência de calor, de modo a que a temperatura do ar se mantenha constante. Determine (a) a quantidade de ar descarregado e (b) a quantidade de calor transferido. *Solução:* (a) $0,357 \text{ kg}$; (b) 0 .

4-114 Um balão contém inicialmente 10 m^3 de hélio gasoso a 150 kPa e 27°C . Abre-se uma válvula permitindo a saída, até que a pressão no interior desça para 100 kPa , sendo fechada a válvula neste instante. Durante este processo, o volume do balão decresce em 15% . O material do balão é tal que o volume deste varia linearmente com a pressão. Sabendo que a transferência de calor durante o processo é desprezável, calcule (a) a temperatura final do gás e (b) a quantidade deste libertada.

4-115 Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical contém inicialmente $0,2 \text{ m}^3$ de vapor a 1 MPa e 250°C . Neste instante, uma mola linear aplica a sua força total no êmbolo. Uma válvula no cilindro é aberta, permitindo a saída de vapor. À medida que o êmbolo desce, decresce a força exercida pela mola, e no estado final a pressão é de 800 kPa e o volume $0,1 \text{ m}^3$. Sabendo que no estado final o cilindro contém somente vapor saturado, determine (a) a massa inicial e final contida e (b) a quantidade e a direção de qualquer transferência de calor.

4-116 Um dispositivo cilindro-êmbolo contém $0,3 \text{ m}^3$ de vapor a 250°C . A massa do êmbolo é tal que mantém uma pressão constante de 300 kPa . Abre-se uma válvula permitindo a saída de vapor. Ocorre uma transferência de calor de forma a que a temperatura permanece constante. Sabendo que o volume final é de $0,1 \text{ m}^3$, determine (a) a quantidade de vapor libertado e (b) a quantidade de calor transferido. *Solução:* (a) $0,251 \text{ kg}$, (b) 0 .

Exercícios de revisão

4-117 Considere dois edifícios idênticos: um em Los Angeles, Califórnia, onde a pressão atmosférica é de 101 kPa, e outro em Denver, Colorado, onde a pressão atmosférica é de 83 kPa. Ambos os edifícios são mantidos a uma temperatura de 21° C e com uma taxa de renovação de ar por infiltração de 1,2 por hora (rph). Ou seja, todo o ar do edifício é completamente substituído por ar exterior 1,2 vezes por hora durante um dia, em que a temperatura exterior em ambos os locais é de 10° C. Desprezando o calor latente, determine a relação de perda de calor por infiltração nas duas cidades.

4-118 O ventilador da casa de banho de um edifício tem um caudal volumétrico de 30 l/s, funcionando em contínuo. Este edifício localiza-se em São Francisco, na Califórnia, onde a temperatura exterior média no Inverno é de 12,2° C, mantendo permanentemente 22° C no interior. O edifício é aquecido por electricidade, com um custo unitário de €0,09/kWh. Determine o custo de aquecimento desperdiçado por mês, durante o Inverno.

4-119 Considere uma sala de aulas grande, num dia quente de Verão, com 150 alunos, cada um dissipando 60 W de calor sensível. Todas as luzes de 4,0 kW de potência nominal são mantidas acesas. A sala não tem paredes exteriores e portanto, os ganhos de calor são desprezáveis. Ar frio está disponível a 15° C, e a temperatura de retorno não deve exceder 25° C. Determine o caudal necessário, em kg/s, que deve ser insuflado no recinto, de modo a manter a temperatura média constante. *Solução:* 1,29 kg/s.

4-120 Um recinto típico de armazenamento de bananas contém 36 caixotes. Cada um é composto por 24 caixas e, portanto, o recinto armazena 864 caixas de bananas. Uma caixa contém, em média, 19 kg de bananas e é constituída por 2,3 kg de cartão. Os calores específicos da banana e do cartão são 3,55 kJ/(kg · °C) e 1,7 kJ/(kg · °C), respectivamente. O calor de respiração máximo das bananas é de 0,3 W/kg, e estas são arrefecidas a uma taxa de 0,4° C/h. A taxa de ganho de calor através das superfícies do recinto é aproximadamente de 1800 kJ/h. Sabendo que o aumento de temperatura do ar insuflado no armazém não deve exceder 2,0° C, determine o caudal mínimo necessário. Considere a massa volúmica e o calor específico do ar de 1,2 kg/m³ e 1,0 kJ/(kg · °C), respectivamente.

4-121 Um recinto de arrefecimento de carne tem as dimensões de 15 × 18 × 5,5 m e uma capacidade de 350 carcaças de bovino. A potência consumida pelos ventiladores e luzes é de 22 e 2 kW, respectivamente, e o ganho de calor através das envolventes é de 11 kW. As carcaças têm uma massa média de 280 kg e entram no recinto de arrefecimento a 35° C, após serem lavadas, para facilitar o arrefecimento evaporativo, sendo então arrefecidas até 16° C em 12 h. O ar entra no recinto a -2,2° C e sai a 0,5° C. Determine (a) a carga de refrigeração do recinto e (b) o caudal volumétrico do ar. Os calores específicos das carcaças e do ar são de 3,14 e de 1,0 kJ/(kg · °C), respectivamente. Considere a massa volúmica do ar de 1,28 kg/m³.

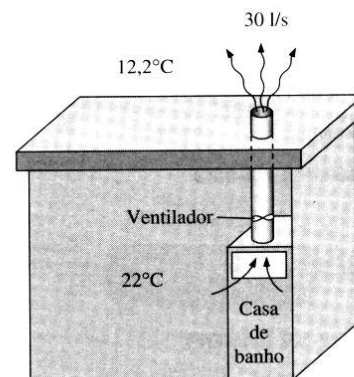


FIGURA P4-118

CAPÍTULO 4

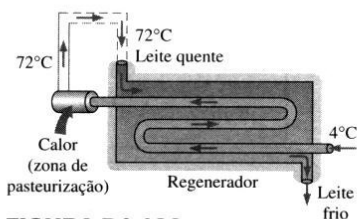
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA P4-123

4-122 Frangos com uma massa média de 2,2 kg e calor específico médio de $3,54 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ são arrefecidos por água fria que entra num tanque de arrefecimento por imersão contínua de água a $0,5^\circ\text{C}$. Os frangos são mergulhados com uma temperatura inicial uniforme de 15°C , a uma cadência de 500 frangos por hora, saindo a uma temperatura média de 3°C . Os ganhos de calor da vizinhança para o tanque são de 200 kJ/h . Determine (a) a taxa de remoção de calor dos frangos em kW e (b) o caudal mássico de água em kg/s, sabendo que a temperatura desta não deve exceder 2°C .

4-123 Numa fábrica de laticínios, leite a 4°C é pasteurizado em processo em regime permanente até 72°C , com um débito de 12 l/s , durante 24h/dia e 365 dias por ano. O leite é aquecido até à temperatura de pasteurização através de água quente proveniente de uma caldeira a gás natural cujo rendimento é de 82%. O leite é posteriormente arrefecido por água fria a 18°C , até que é refrigerado a 4°C . De forma a poupar energia e reduzir os custos, a fábrica instala um regenerador que tem uma efectividade de 82%. Sabendo que o custo do gás natural é de $\text{€}0,52/\text{termia}$ (1 termia = $105\,500 \text{ kJ}$), determine qual a poupança nos custos devida à instalação do regenerador.

4-124E Um sistema de refrigeração foi projectado, de modo a arrefecer ovos [$\rho = 67,4 \text{ lbf}/\text{ft}^3$ e $c_p = 0,80 \text{ Btu}/(\text{lbf} \cdot ^\circ\text{F})$], com uma massa média de $0,14 \text{ lbf}$, desde uma temperatura inicial de 90°F até um valor médio de 50°F , através de ar a 34°F , com uma cadência de 10 000 ovos por hora. Determine (a) a taxa de transferência de calor dos ovos e (b) o caudal volúmico de ar necessário, em ft^3/h , de modo a que o aumento da temperatura deste não exceda 10°F .

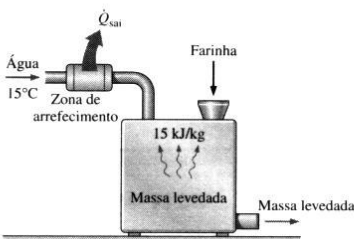


FIGURA P4-125

4-125 O calor de fermentação da massa levedada, que é de 15 kJ/kg , irá aumentar a sua temperatura para valores indesejáveis, a menos que se utilize algum mecanismo de arrefecimento. Uma forma prática de arrefecer esta massa é o emprego de água fria durante a fase de amassar. Sabendo que uma receita determina a mistura de 2 kg de farinha com 1 kg de água, à temperatura da rede de 15°C , calcule para que temperatura esta última deve ser arrefecida antes de ser misturada, de modo a absorver todo o calor de fermentação e que a temperatura final seja de 15°C . Considere os calores específicos da farinha e da água como sendo $1,76$ e $4,18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$. Solução: $4,2^\circ\text{C}$.

4-126 Uma instalação de lavagem de garrafas utiliza um tanque de água quente agitada a 50°C . As garrafas entram neste a uma cadência de $800/\text{min}$, a uma temperatura ambiente de 20°C , saindo à temperatura da água. Cada garrafa tem 150 g de massa e remove $0,2 \text{ g}$ de água quando retirada do tanque. A água de compensação é fornecida a 15°C . Desprezando qualquer perda de calor da superfície exterior do tanque, determine a taxa a que (a) a água e (b) o calor devem ser fornecidos, de modo a manter a operação em contínuo.

4-127 Repita o Exercício 4-126 para uma temperatura da água do tanque de 50°C .

4-128 Arame de alumínio com 3 mm de diâmetro [$\rho = 2702 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,896 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$] é extrudido a uma temperatura de 350°C , sendo arrefecido, ao ar, a 30°C , até 50°C . Sabendo que o arame é extrudido à velocidade de 10 m/min , determine a taxa de transferência de calor do arame para o recinto.

4-129 Repita o Exercício 4-128 para arame de cobre [$\rho = 8950 \text{ kg/m}^3$ e $c_p = 0,383 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$].

4-130 Perus com uma massa média de $7,5 \text{ kg}$ e calor específico médio de $3,28 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ são arrefecidos por água fria num tanque de água de imersão contínua com uma temperatura de $0,6^\circ\text{C}$. As aves são imersas no tanque, com uma temperatura inicial uniforme de 14°C , a uma cadência de $200/\text{h}$, sendo arrefecidos até uma temperatura média de 4°C antes de serem retiradas. O tanque absorve calor da vizinhança a uma taxa de 350 kJ/h . Determine (a) a taxa de remoção de calor dos perus, em kW e (b) o caudal mássico da água, em kg/s , sabendo que o aumento da temperatura desta não deve exceder $2,5^\circ\text{C}$.

4-131 Vapor a 40°C condensa-se no exterior de um tubo de cobre horizontal, com 4 m de comprimento e 3 cm de diâmetro, por onde circula água de arrefecimento que entra a 25°C , com velocidade média de 2 m/s e sai a 35°C . Determine a taxa de condensação de vapor e o coeficiente médio global de transferência de calor do vapor e da água de arrefecimento, baseado na superfície exterior do tubo.

4-132E Um condensador de uma central térmica a vapor funciona a uma pressão de $0,95 \text{ psia}$. Este consiste em 144 tubos horizontais dispostos numa matriz de 12×12 . O vapor condensa-se nas superfícies exteriores dos tubos cujos diâmetros interior e exterior são de 1 in e de $1,2 \text{ in}$, respectivamente. Sabendo que o vapor se condensa a um caudal de 6800 lbm/h e que o aumento da temperatura da água está limitado a 8°F , determine (a) a taxa de transferência de calor do vapor para a água e (b) a velocidade média da água através dos tubos.

4-133 Vapor saturado de fluido frigorigénio 134a a 30°C é condensado, à medida que se escoa num tubo horizontal de 1 cm de diâmetro, com um caudal de $0,1 \text{ kg/min}$. Determine a taxa de transferência de calor do fluido. Qual seria a sua resposta se o fluido fosse arrefecido até 20°C ?

4-134E A pressão média atmosférica em Spokane, Washington (altitude = 2350 ft), é de $13,5 \text{ psia}$, e a temperatura média de Inverno é de $36,5^\circ\text{F}$. Um teste de pressurização de um edifício antigo de 9 ft de altura e 3000 ft^2 de área revelou que a taxa de infiltração média é de $2,2$ renovações de ar por hora (rph). Ou seja, todo o ar contido é completamente substituído por ar exterior, $2,2$ vezes por hora. Recomenda-se que esta taxa de infiltração seja reduzida para metade através da calafetagem de portas e janelas. Sabendo que o edifício é aquecido por gás natural, cujo custo unitário é de $\text{€}0,62/\text{termia}$ e que a época fria dura cerca de 6 meses, determine qual a poupança anual de custos de aquecimento, devido a esta recomendação. Considere que o edifício é mantido permanentemente a 72°F e que o rendimento da caldeira é de $0,65$. Considere também desprezável a carga térmica devida ao calor latente.

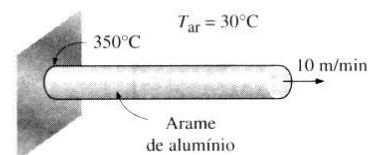


FIGURA P4-128

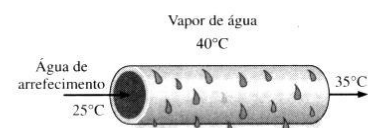


FIGURA P4-131

CAPÍTULO 4

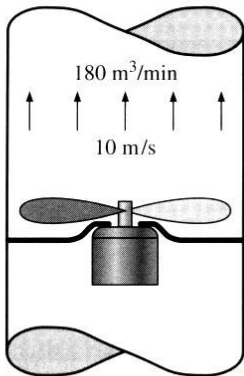
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA P4-138

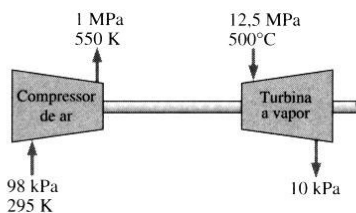


FIGURA P4-140

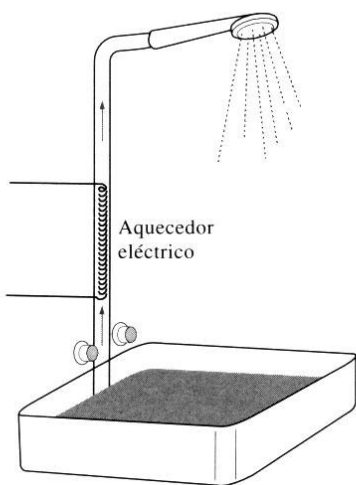


FIGURA P4-141

4-135 Determine a taxa de perda de calor sensível de um edifício, devida à infiltração de ar exterior, de -10°C e 90 kPa , que entra com um caudal de 35 l/s , sabendo que o interior é mantido a 22°C .

4-136 O caudal máximo de chuveiros comuns é de cerca de $3,5\text{ gpm}$ ($13,3\text{ l/min}$), podendo ser reduzido para $2,75\text{ gpm}$ ($10,5\text{ l/min}$) pela utilização de chuveiros equipados com controlador de caudal. Considere uma família de 4 pessoas, cada uma tomando um banho de 15 min , todas as manhãs. A água da rede, a 15°C , é aquecida para 55°C num cilindro eléctrico e regulada para 42°C através de água fria numa ligação em T colocada antes da saída do chuveiro. Considerando o calor específico constante da água a $4,18\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, determine (a) a relação de caudais de água quente e fria que entram na ligação em T e (b) a electricidade poupada por ano, em kWh, pela substituição dos chuveiros por outros mais eficientes.

4-137 Um ventilador é accionado por um motor de $0,5\text{ cv}$, debitando 130 m^3 por minuto de ar. Determine o valor médio mais elevado da velocidade do ar mobilizado pelo ventilador. Considere a massa volúmica do ar como sendo $1,18\text{ kg/m}^3$.

4-138 Um sistema de ar condicionado necessita de um escoamento de ar da conduta principal de $180\text{ m}^3/\text{min}$. A velocidade média nesta conduta circular não deve exceder 10 m/s , de modo a evitar vibrações e perdas de carga. Assumindo que o ventilador converte 70% da energia eléctrica que consome em energia cinética do ar, determine a potência do motor eléctrico necessária para impelir o ventilador e o diâmetro da conduta principal. Considere a massa volúmica do ar com sendo de $1,20\text{ kg/m}^3$.

4-139 Considere uma garrafa rígida vazia de volume V num ambiente com pressão P_0 e T_0 . Abre-se a válvula do gargalo, permitindo a entrada de ar. Este alcança eventualmente o equilíbrio térmico com o ambiente devido à transferência de calor através das paredes da garrafa. A válvula permanece aberta durante o processo, de modo a que o ar também alcance o equilíbrio mecânico. Determine a transferência de calor através da parede da garrafa durante este processo de enchimento, em termos das propriedades do sistema e do ambiente exterior.

4-140 Um compressor adiabático é accionado directamente por uma turbina adiabática a vapor que também está ligada a um gerador. Entra vapor na turbina a $12,5\text{ MPa}$ e 500°C , com um caudal de 25 kg/s , e sai a 10 kPa , com um título de $0,92$. Entra ar no compressor a 88 kPa e 295 K , com um caudal de 10 kg/s , e sai a 1 MPa e 550 K . Determine a potência desenvolvida pela turbina para accionar o gerador.

4-141 Escoa-se água através de um chuveiro em regime permanente, com um caudal de 10 l/min . Um aquecedor eléctrico é colocado no tubo, aquecendo a água de 16 para 43°C . Tomando a massa volúmica da água como 1 kg/l , determine a potência eléctrica do aquecedor em kW.

Num esforço para poupar energia, propõe-se fazer passar a água quente, que vai para o ralo a uma temperatura de 39°C , através de um permutador de calor, para pré-aquecer a água fria. Se este tiver um rendimento de 50% (ou seja,

recuperando apenas metade da energia que pode ser transferida), determine a potência eléctrica necessária para este caso. Sabendo que o preço da energia eléctrica é de 85 cêntimos por kWh, determine qual a poupança durante um banho de 10 min, devido à instalação do permutador.

4-142 Numa turbina entra vapor de água em regime permanente a 10 MPa e 550° C, com uma velocidade de 60 m/s, e sai a 25 kPa, com um título de 95%. Ocorre uma perda de calor de 30 kJ/kg durante o processo. A área de entrada da turbina é de 150 cm² e a de saída é de 1400 cm². Determine (a) o caudal mássico do vapor, (b) a velocidade de saída e (c) a potência da turbina.

4-143E Fluido frigorígeno 134a entra num compressor adiabático a 15 psia e 20° F, com um caudal volúmico de 10 ft³/s, e sai a uma pressão de 120 psia. A potência necessária é de 60 cv. Calcule (a) o caudal mássico do fluido e (b) a temperatura de saída.

4-144 Nas grandes centrais térmicas a gás, o ar é pré-aquecido por gases de escape, num permutador de calor denominado regenerador, antes de entrar na câmara de combustão. Num regenerador entra ar a 1 MPa e 550 K, com um caudal mássico de 800 kg/min. Transfere-se calor para o ar a uma taxa de 3200 kJ/s. Os gases de escape entram no regenerador a 140 kPa e 800 K, saindo a 130 kPa e 600 K. Tomando os gases de escape como ar, determine (a) a temperatura de saída do ar e (b) o caudal mássico dos gases de escape.

Solução: (a) 775 K; (b) 14,9 kg/s.

4-145 Nas grandes centrais térmicas, a água é geralmente pré-aquecida num economizador através da utilização de vapor extraído da turbina. Num economizador entra vapor de água a 1 MPa e 200° C, saindo como líquido saturado à mesma pressão. A água entra no economizador a 2,5 MPa e 50° C e sai a uma temperatura 10° C inferior à temperatura de saída do vapor. Determine a relação entre os caudais de água e de vapor.

4-146 Um edifício com um volume interior de 400 m³ é aquecido através de um aquecedor eléctrico de 30 kW, colocado numa conduta interior. Inicialmente, o ar do edifício encontra-se a 14° C e a pressão atmosférica local é de 95 kPa. O edifício perde calor para a vizinhança a uma taxa contínua de 450 kJ por minuto. O ar escoar-se através da conduta, devido ao accionamento de um ventilador de 250 W, verificando-se um aumento de 5° C, cada vez que passa pela conduta, podendo esta ser considerada adiabática. (a) Quanto tempo demorará para que o ar no interior atinja a temperatura média de 24° C? (b) Determine o caudal mássico médio através da conduta.

Solução: (a) 146 s; (b) 6,02 kg/s.

4-147 Propõe-se construir um aquecedor de água que consiste num tubo isolado de 5 cm de diâmetro contendo uma resistência eléctrica no interior. Água fria a 15° C entra na zona de aquecimento em regime permanente, com um caudal de 30 l/min. Sabendo que a água deve ser aquecida até 50° C, determine (a) a potência da resistência eléctrica e (b) a velocidade média da água no interior do tubo.

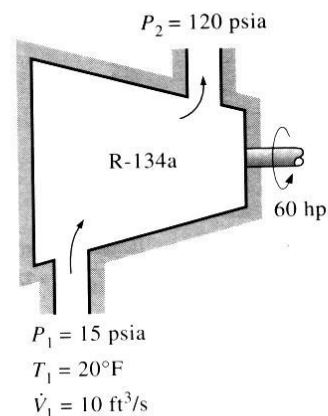


FIGURA P4-143E

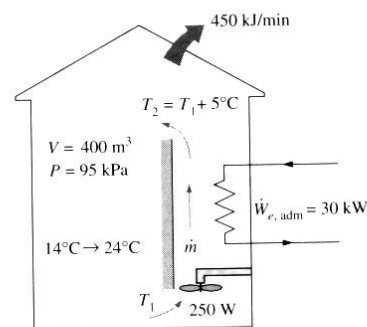


FIGURA P4-146

CAPÍTULO 4

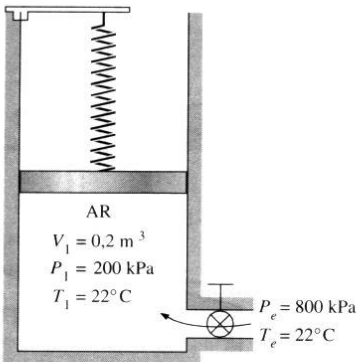
Primeira lei da termodinâmica:
volumes de controlo

FIGURA P4-148

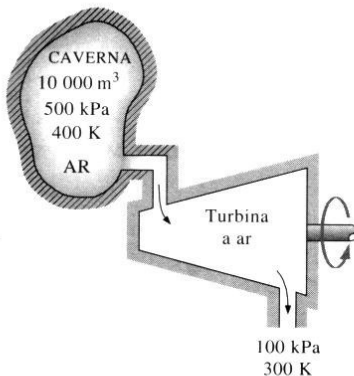


FIGURA P4-149

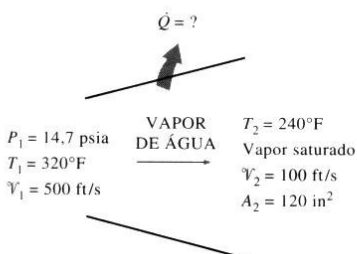


FIGURA P4-151E

4-148 Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical isolado contém inicialmente $0,2 \text{ m}^3$ de ar a 200 kPa e 22°C . Neste estado, uma mola linear toca no êmbolo sem exercer força. O cilindro está ligado, através de uma válvula, a uma conduta que fornece ar a 800 kPa e 22°C . Abre-se a válvula, permitindo que ar da conduta entre no cilindro. Esta é fechada quando a pressão no interior atingir 600 kPa . Se o volume contido no cilindro duplicar durante este processo, determine (a) a massa de ar que entrou no cilindro e (b) a temperatura interior.

4-149 Ar pressurizado armazenado numa caverna de $10\,000 \text{ m}^3$ a 500 kPa e 400 K é utilizado para accionar uma turbina durante os picos de consumo de energia eléctrica. Sabendo que as condições de saída da turbina são de 1000 kPa e 300 K , determine a quantidade de trabalho realizado pela turbina quando a pressão do ar da caverna desce para 300 kPa . Considere a caverna e a turbina adiabáticas. *Solução:* $980,8 \text{ kJ}$.

4-150 A velocidade de um líquido em escoamento numa conduta circular, de raio R , varia desde 0 , junto à parede, até um máximo no centro. A distribuição de velocidades pode ser representada como $V(r)$, em que r representa a distância radial desde o centro. Baseando-se na definição de caudal mássico, determine a relação da velocidade média em termos de $V(r)$, R e r .

4-151E Vapor de água a $14,7 \text{ psia}$ e 320°F entra num difusor, com uma velocidade de 500 ft/s , e sai como vapor saturado a 240°F e 100 ft/s . A área de saída do difusor é de 120 in^2 . Determine (a) o caudal mássico do vapor, (b) a taxa de transferência de calor e (c) a área de entrada do difusor. *Solução:* (a) $5,1 \text{ lbm/s}$; (b) perda de $235,8 \text{ Btu/s}$; (c) $46,1 \text{ in}^2$.

4-152 Uma panela de pressão de 5 l tem uma pressão de funcionamento de 200 kPa . Inicialmente, 20% do volume são ocupados por líquido, e os restantes por vapor. A panela é colocada num fogão que fornece calor à água, a uma taxa de 400 W . Determine quanto tempo demorará para esgotar a água (ou seja, a panela conter somente vapor saturado). *Solução:* $1,44 \text{ h}$.

4-153 Um balão esférico contém inicialmente 25 m^3 de hélio gasoso a 20°C e 150 kPa . Abre-se uma válvula permitindo a saída lenta do gás, sendo esta fechada quando a pressão interior atingir o valor ambiente de 100 kPa . O material do balão é tal que a pressão no interior durante o processo varia de acordo com a relação $P = a + bV$, em que $a = -100 \text{ kPa}$ e b é uma constante. Desprezando qualquer transferência de calor, determine (a) a temperatura final (b) a massa de hélio libertada. *Solução:* (a) 249 K ; (b) $2,306 \text{ kg}$.

Exercícios de computação, projecto e trabalhos

4-154 Escreva um programa de computador para resolver o Exercício 4-153 utilizando uma abordagem por passos. Utilize (a) 5, (b) 20 e (c) 50 incrementos de pressão entre o estado inicial de 150 kPa e o final de 100 kPa. Inicie o ponto de partida do primeiro passo como o estado do hélio (150 kPa, 20° C e 25 m³). O ponto de partida do segundo passo é o estado do hélio no final do primeiro passo, e assim sucessivamente. Compare os seus resultados com os obtidos, utilizando a abordagem de escoamento em regime uniforme (ou seja, solução de um único passo).

4-155 Utilizando somente um termómetro e uma fita métrica, explique como poderá determinar a velocidade média do ar à saída de um secador de cabelo na sua posição máxima.

4-156 Projecte um secador eléctrico de cabelo de 1200 W cuja temperatura e velocidade do ar não excedam 50° C e 3 m/s, respectivamente.

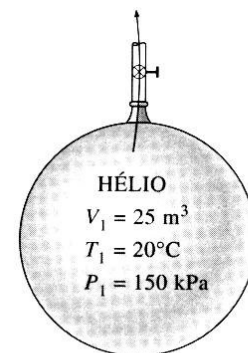
4-157 Projecte um aquecedor de água eléctrico para uma residência com quatro habitantes. A temperatura e o consumo máximo não devem exceder 60° C e 4 kW respectivamente. Na residência existem dois chuveiros, e o caudal de cada um é de cerca de 10 l/min. Cada ocupante toma um banho de 5 min todas as manhãs. Explique a necessidade de um reservatório de água quente (termoacumulador) e determine a dimensão de um para esta residência.

4-158 Descreva os diferentes tipos de permutadores de calor incluindo o seu funcionamento e as diferenças entre eles.

4-159 Uma fábrica necessita de um caudal de 1,2 kg/min de vapor de água saturado a 120° C. Projecte uma caldeira eléctrica para este efeito, com base nos seguintes constrangimentos:

- A caldeira deve ter uma forma cilíndrica com uma relação altura/diâmetro de 1,5, podendo ser horizontal ou vertical.
- Deve ser utilizado um elemento eléctrico aquecedor, de aço inoxidável polido. O diâmetro do aquecedor pode estar compreendido entre 0,5 e 3 cm. O fluxo de calor à superfície deste não deve exceder 150 kW/m².
- Metade do volume da caldeira deve ser ocupado por vapor, e esta deve ser suficientemente grande, de modo a conter um abastecimento de vapor para 2 h. A caldeira deve ser bem isolada.

Deve especificar o seguinte: (1) a altura e o diâmetro interior do reservatório, (2) o comprimento, o diâmetro, a potência nominal e a temperatura de superfície do elemento eléctrico aquecedor, e (3) o débito máximo de produção de vapor durante curtos períodos de tempo (menos que 30 min) em condições de pico de utilização e como isto pode ser obtido.

**FIGURA P4-153**

4-160 Repita o Exercício 4-159 para uma caldeira que produza vapor a 150°C com um caudal de $2,5\text{ kg/min}$.

4-161 Projecte uma unidade de escaldamento de frangos abatidos, de modo a amolecer as suas penas antes de estes serem encaminhados para as máquinas de depenagem, com uma capacidade de 1200 frangos/h nas seguintes condições:

A unidade é do tipo de imersão, cheia com água quente a uma temperatura média constante de 53°C . Frangos com massa média de $2,2\text{ kg}$ e uma temperatura de 36°C irão ser submersos, mantidos debaixo de água durante $1,5\text{ min}$ e removidos através de uma esteira de baixa velocidade. Espera-se que o frango saia do tanque cerca de 15% mais pesado, devido a estar molhado. A distância entre frangos em qualquer direcção deve ser, no mínimo, 30 cm . O tanque pode ter, no máximo, 3 m de largura e 60 cm de altura. A água deve circular e ser aquecida através de uma caldeira a gás natural, mas o aumento de temperatura não deve exceder 5°C , entre a entrada e saída desta. As paredes do tanque são bem isoladas. A unidade funciona 24 h por dia e 6 dias por semana. Assumindo valores razoáveis para as propriedades médias, indique valores aceitáveis para (a) o caudal de água de reposição que deve ser fornecido ao tanque, (b) a taxa de calor transferido da água para os frangos, em kW, (c) a dimensão do sistema de aquecimento em kJ/h e (d) os custos de operação da unidade de escaldamento por mês, para um custo de $\text{€}0,56/\text{termia}$ de gás natural ($1\text{ termia} = 105\,500\text{ kJ}$).