

4

Análise do Volume de Controle Utilizando Energia

▶ RESULTADOS DE APRENDIZAGEM

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

- ▶ demonstrar conhecimento dos conceitos fundamentais relacionados à análise de volumes de controle, incluindo distinguir entre regime permanente e análise transiente, distinguir entre vazão mássica e vazão volumétrica e os significados de escoamento unidimensional e de trabalho de escoamento.
- ▶ aplicar os balanços de massa e de energia aos volumes de controle.
- ▶ desenvolver modelos apropriados de engenharia para volumes de controle, com especial atenção para a análise de componentes normalmente encontrados na prática de engenharia como bocais, difusores, turbinas, compressores, trocadores de calor, dispositivos de estrangulamento e sistemas integrados que incorporam dois ou mais componentes.
- ▶ utilizar dados de propriedades na análise de volume de controle apropriadamente.

4.1 Conservação de Massa para um Volume de Controle

Nesta seção será desenvolvida e ilustrada uma expressão para o princípio da conservação de massa para volumes de controle. Como parte da apresentação, o modelo de escoamento unidimensional será introduzido.

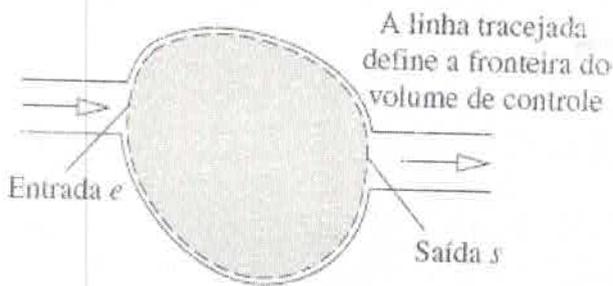


Fig. 4.1 Volume de controle com uma entrada e uma saída.

4.1.1 Desenvolvendo o Balanço da Taxa de Massa

conservação de massa

O balanço da taxa de massa para volumes de controle é apresentado utilizando-se a Fig. 4.1, a qual mostra um volume de controle com fluxo de entrada de massa e e saída s , respectivamente. Quando aplicado a esse volume de controle, o princípio da conservação de massa estabelece que

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de variação da} \\ \text{massa contida no interior do} \\ \text{volume de controle no instante } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de fluxo} \\ \text{de massa através da} \\ \text{entrada e no instante } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de fluxo} \\ \text{de massa através da} \\ \text{saída } s \text{ no instante } t \end{array} \right]$$

Representando a massa contida no volume de controle no instante t por $m_{vc}(t)$, esse enunciado do princípio da conservação de massa pode ser expresso matematicamente por

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (4.1)$$

vazões mássicas

em que dm_{vc}/dt é a taxa temporal da variação de massa contida no interior do volume de controle \dot{m}_e e \dot{m}_s são, respectivamente, as vazões mássicas instantâneas na entrada e na saída. Como nos símbolos \dot{w} e \dot{Q} , os "pontos" nas grandezas \dot{m}_e e \dot{m}_s denotam taxas temporais de transferência. No sistema SI todos os termos da Eq. 4.1 são expressos em kg/s. Quando unidades inglesas são empregadas, todos os termos são expressos em lb/s. Uma discussão sobre o desenvolvimento da Eq. 4.1 pode ser encontrada no boxe.

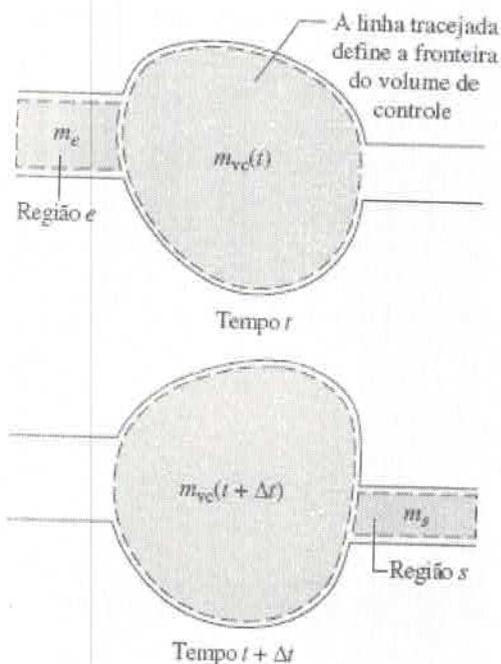
Em geral, podem existir vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai. Isso pode ser levado em conta através do somatório, conforme a seguir

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (4.2)$$

balanço da taxa de massa

A Eq. 4.2 é o balanço da taxa de massa em termos de taxa para volumes de controle com várias entradas e saídas. Ela é a formulação do princípio de conservação de massa normalmente empregada em engenharia. Outras formas de balanço de massa em termos de taxa serão consideradas em discussões posteriores.

Desenvolvendo o Balanço de Massa para um Volume de Controle



Para cada uma das propriedades extensivas dadas por massa, energia e entropia (Cap. 6), a formulação do balanço da propriedade para um volume de controle pode ser obtida pela transformação do sistema fechado correspondente. Isso será considerado para massa, lembrando que a massa de um sistema fechado é constante.

As figuras correspondentes a essa discussão mostram um sistema que consiste em uma quantidade fixa de matéria m que ocupa diferentes regiões em um instante t e em um outro, mais tarde, $t + \Delta t$. A massa sob consideração está ilustrada em um tom mais escuro nas figuras. Em um instante t , a massa é dada pela soma $m = m_{vc}(t) + m_e$, em que $m_{vc}(t)$ é a massa contida no interior do volume de controle e m_e é a massa no interior da pequena região designada por e , adjacente ao volume de controle. A quantidade fixa de matéria m será estudada à medida que o tempo transcorre.

Em um intervalo de tempo Δt , toda a massa da região e atravessa a fronteira do volume de controle, enquanto uma certa porção de massa, designada por m_s , inicialmente contida no interior do volume de controle, escapa de modo a preencher a região designada por s adjacente ao volume de controle. Embora as massas nas regiões e e s , assim como nos volumes de controle, sejam diferentes nos instantes t e $t + \Delta t$, a quantidade *total* de massa é constante. Dessa maneira,

$$m_{vc}(t) + m_e = m_{vc}(t + \Delta t) + m_s \quad (a)$$

ou rearrumando

$$m_{vc}(t + \Delta t) - m_{vc}(t) = m_e - m_s \quad (b)$$

A Eq. (b) é um balanço *contábil* para massa que enuncia que a variação de massa no volume de controle durante o intervalo de tempo Δt é igual à quantidade de massa que entra subtraída da quantidade que sai.

A Eq. (b) pode ser expressa em termos de uma taxa temporal. Primeiramente, divide-se por Δt de modo a obter

$$\frac{m_{vc}(t + \Delta t) - m_{vc}(t)}{\Delta t} = \frac{m_e}{\Delta t} - \frac{m_s}{\Delta t} \quad (c)$$

Assim, tomando-se o limite à medida que Δt tende a zero, a Eq. (c) transforma-se na Eq. 4.1, a equação da taxa instantânea de massa em um volume de controle

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (4.1)$$

em que dm_{vc}/dt indica a taxa temporal da variação de massa contida no interior do volume de controle e \dot{m}_e e \dot{m}_s são, respectivamente, as vazões mássicas na entrada e na saída, ambas no instante t .

4.1.2 Analisando a Vazão Mássica

Uma expressão para a vazão mássica \dot{m} da matéria que entra ou sai de um volume de controle pode ser obtida em termos de propriedades locais, considerando uma pequena quantidade de matéria que escoar com uma velocidade V através de uma área infinitesimal dA em um intervalo de tempo Δt , como ilustrado na Fig. 4.2. Como essa parcela da fronteira do volume de controle pela qual a massa escoar não se encontra necessariamente em repouso, a velocidade mostrada na figura é entendida como a velocidade *relativa* à área dA . A velocidade pode ser decomposta nas componentes normal e tangencial ao plano que contém dA . No desenvolvimento a seguir, V_n representa a componente da velocidade relativa normal a dA na direção do escoamento.

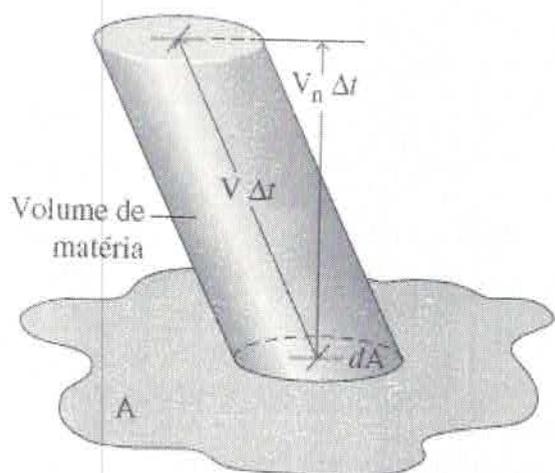


Fig. 4.2 Ilustração utilizada para o desenvolvimento de uma expressão para a vazão mássica em termos de propriedades locais do fluido.

O volume de matéria cruzando dA durante o intervalo de tempo Δt mostrado na Fig. 4.2 é um cilindro oblíquo com um volume igual ao produto da área de sua base dA pela sua altura $V_n \Delta t$. A multiplicação pela massa específica ρ fornece a quantidade de massa que cruza dA em um tempo Δt

$$\left[\begin{array}{l} \text{quantidade de massa} \\ \text{cruzando } dA \text{ durante o} \\ \text{intervalo de tempo } \Delta t \end{array} \right] = \rho(V_n \Delta t) dA$$

Dividindo ambos os lados dessa equação por Δt e tomando o limite quando Δt tende a zero, a vazão mássica instantânea ao longo da área infinitesimal dA é

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa instantânea de} \\ \text{fluxo de massa} \\ \text{cruzando } dA \end{array} \right] = \rho V_n dA$$

Quando essa relação é integrada ao longo da área A através da qual a massa escoar, obtém-se uma expressão para a vazão mássica

$$\dot{m} = \int_A \rho V_n dA \quad (4.3)$$

A Eq. 4.3 pode ser aplicada nas entradas e saídas de modo a se calcular as vazões mássicas que entram e saem do volume de controle.

4.2 Formas do Balanço de Massa em Termos de Taxa

O balanço da taxa de massa, Eq. 4.2, é uma formulação importante para a análise em volume de controle. No entanto, em muitos casos é conveniente aplicar o balanço de massa com formulações mais adequadas aos objetivos em vista. Nesta seção são consideradas algumas formas alternativas.

4.2.1 Formulação do Balanço da Taxa de Massa para escoamento Unidimensional

fluxo unidimensional

Quando um fluxo de massa que entra ou sai de um volume de controle satisfaz às idealizações que se seguem, ele é considerado unidimensional:

- ▶ O escoamento é normal à fronteira nas posições onde a massa entra ou sai do volume de controle.
- ▶ *Todas* as propriedades intensivas, incluindo a velocidade e a massa específica, são *uniformes com relação à posição* (valores globais médios) ao longo de cada área de entrada ou saída através da qual a massa esco.

TOME NOTA...

Nas análises de volume de controle subsequentes admitiremos rotineiramente que as idealizações de escoamento unidimensional sejam apropriadas. Assim, a hipótese de escoamento unidimensional não se encontra explicitamente listada nos exemplos resolvidos.

- ▶ **POR EXEMPLO** a Fig. 4.3 ilustra o significado do escoamento unidimensional. A área através da qual a massa esco é representada por A . O símbolo V indica um único valor que representa a velocidade de escoamento do ar. Analogamente, T e ν são valores únicos que representam a temperatura e o volume específico, respectivamente, do escoamento do ar.

Quando o escoamento é unidimensional, a Eq. 4.3 para a vazão mássica torna-se

$$\dot{m} = \rho AV \quad (\text{escoamento unidimensional}) \quad (4.4a)$$

ou, em termos do volume específico

$$\dot{m} = \frac{AV}{\nu} \quad (\text{escoamento unidimensional}) \quad (4.4b)$$

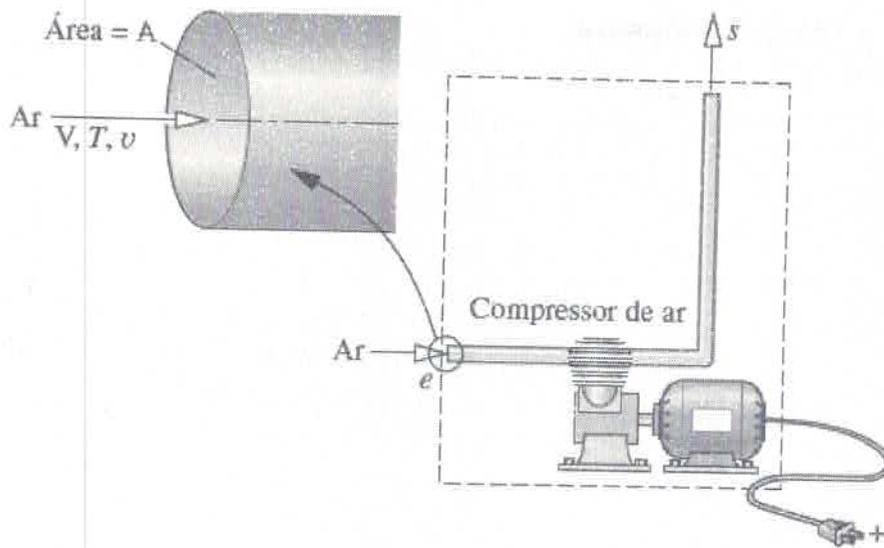


Fig. 4.3 Ilustração do modelo de escoamento unidimensional.

vazão volumétrica

Quando a área está em m^2 , a velocidade em m/s e o volume específico em m^3/kg , a vazão mássica determinada a partir da Eq. 4.4b aparece em kg/s , conforme pode ser verificado. O produto AV nas Eqs. 4.4 é a vazão volumétrica. A vazão volumétrica tem dimensões de m^3/s ou ft^3/s .

A substituição da Eq. 4.4b na Eq. 4.2 resulta em uma expressão para o princípio da conservação de massa para volume de controle limitada ao caso de escoamento unidimensional nas entradas e saídas.

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \frac{A_e V_e}{v_e} - \sum_s \frac{A_s V_s}{v_s} \quad (\text{escoamento unidimensional}) \quad (4.5)$$

Note que a Eq. 4.5 envolve somatórios ao longo das entradas e saídas do volume de controle. Cada termo em cada um desses somatórios refere-se a uma certa entrada ou saída. A área, a velocidade e o volume específico que aparecem em um termo referem-se apenas à entrada ou à saída correspondente.

4.2.2 Formulação do Balanço da Taxa de Massa para Regime Permanente

regime permanente

Muitos sistemas de engenharia podem ser idealizados como estando em regime permanente, indicando que *nenhuma* das propriedades se altera com o tempo. Para um volume de controle em regime permanente a identidade da matéria no interior do volume de controle varia continuamente, mas a quantidade total presente em qualquer instante permanece constante, assim $dm_{vc}/dt = 0$ e a Eq. 4.2 reduz-se a

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (4.6)$$

(taxa de entrada de massa) (taxa de saída de massa)

Ou seja, as taxas totais de vazão mássica nas entradas e saídas são iguais.

Observe que a igualdade entre as taxas totais de entrada e saída não implica necessariamente que um volume de controle se encontra em regime permanente. Embora a quantidade total de massa no interior do volume de controle em qualquer instante seja constante, outras propriedades, como temperatura e pressão, podem estar variando com o tempo. Quando um volume de controle encontra-se em regime permanente, *cada* propriedade é independente do tempo. Note também que a hipótese de regime permanente e a de escoamento unidimensional são idealizações independentes. Uma hipótese não pressupõe a outra.

4.2.3 Formulação Integral do Balanço da Taxa de Massa

Será considerado a seguir o balanço de massa expresso em termos de propriedades locais. A massa total contida no interior do volume de controle em um instante t pode estar relacionada com a massa específica local como se segue

$$m_{vc}(t) = \int_V \rho dV \quad (4.7)$$

em que a integração é realizada ao longo do volume no instante t .

Com as Eqs. 4.3 e 4.7 o balanço da taxa de massa, Eq. 4.2, pode ser escrito como

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \sum_e \left(\int_A \rho V_n dA \right)_e - \sum_s \left(\int_A \rho V_n dA \right)_s \quad (4.8)$$

fluxo de massa

em que as integrais de área são avaliadas nas regiões nas quais a massa entra e sai, respectivamente, do volume de controle. O produto ρv_n que aparece nessa equação é conhecido como o fluxo de massa, e fornece a taxa temporal de escoamento de massa por unidade de área. Para elucidar, dos termos do lado direito da Eq. 4.8, necessita-se de informações sobre a variação do fluxo de massa ao longo das áreas associadas ao escoamento. A formulação do princípio de conservação de massa dada pela Eq. 4.8 é usualmente explorada em detalhes na mecânica dos fluidos.

4.3 Aplicações do Balanço da Taxa de Massa

4.3.1 Aplicação em Regime Permanente

Para um volume de controle em regime permanente, a situação da massa em seu interior e em sua fronteira não se altera com o tempo.

O Exemplo 4.1 ilustra uma aplicação da formulação do balanço de massa para um volume de controle em regime permanente englobando uma câmara de mistura denominada *aquecedor de água*. Os aquecedores de água são componentes dos sistemas de potência a vapor considerados no Cap. 8.

EXEMPLO 4.1 ▶

Aplicando o Balanço da Taxa de Massa a um Aquecedor de Água em Regime Permanente

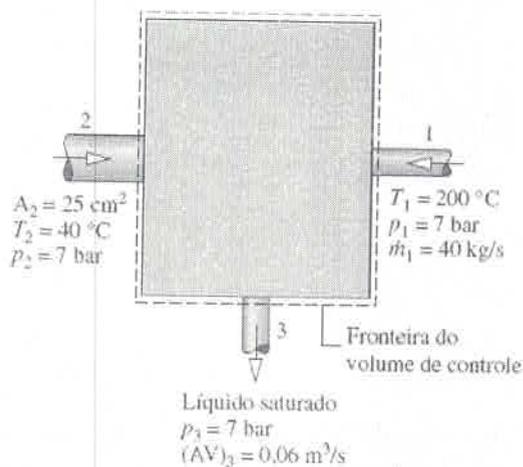
Um aquecedor de água operando em regime permanente tem duas entradas e uma saída. Na entrada 1, o vapor d'água entra a $p_1 = 7$ bar, $T_1 = 200^\circ\text{C}$ com uma vazão mássica de 40 kg/s. Na entrada 2, água líquida a $p_2 = 7$ bar, $T_2 = 40^\circ\text{C}$ entra por uma área $A_2 = 25 \text{ cm}^2$. Líquido saturado a 7 bar sai em 3 com uma vazão volumétrica de $0,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Determine a vazão mássica na entrada 2 e na saída, em kg/s, e a velocidade na entrada 2, em m/s.

SOLUÇÃO

Dado: um fluxo de vapor d'água se mistura com um fluxo de água líquida produzindo um fluxo de líquido saturado na saída. Os estados nas entradas e na saída são especificados. Dados sobre as taxas de vazão mássica e de vazão volumétrica são fornecidos em uma entrada e na saída, respectivamente.

Pede-se: determine a vazão mássica na entrada 2 e na saída e a velocidade V_2 .

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia: o volume de controle mostrado na figura encontra-se em regime permanente.

Fig. E4.1

Análise: as principais relações a serem empregadas são o balanço da taxa de massa (Eq. 4.2) e a expressão $\dot{m} = AV/v$ (Eq. 4.4b). No regime permanente o balanço da taxa de massa torna-se

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3$$

Resolvendo para \dot{m}_2 ,

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 - \dot{m}_1$$

A vazão mássica \dot{m}_1 é fornecida. A vazão mássica na saída pode ser avaliada pela vazão volumétrica dada por

$$\dot{m}_3 = \frac{(AV)_3}{v_3}$$

em que v_3 é o volume específico na saída. Ao se escrever esta expressão a hipótese de escoamento unidimensional é adotada. Da Tabela A-3, $v_3 = 1,108 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$. Assim,

$$\dot{m}_3 = \frac{0,06 \text{ m}^3/\text{s}}{(1,108 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})} = 54,15 \text{ kg/s}$$

A vazão mássica na entrada 2 é, então,

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 - \dot{m}_1 = 54,15 - 40 = 14,15 \text{ kg/s}$$

Para o escoamento unidimensional em 2, $\dot{m}_2 = A_2 V_2/v_2$, assim

$$V_2 = \dot{m}_2 v_2 / A_2$$

O estado 2 corresponde a líquido comprimido. O volume específico nesse estado pode ser aproximado por $v_2 \approx v_f(T_2)$ (Eq. 3.11). Da Tabela A-2 a 40°C, $v_2 = 1,0078 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$. Então,

$$V_2 = \frac{(14,15 \text{ kg/s})(1,0078 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})}{25 \text{ cm}^2} \left| \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \right| = 5,7 \text{ m/s}$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar o balanço da taxa de massa para regime permanente.

aplicar a expressão da vazão mássica, Eq. 4.4b.

obter dados de propriedades da água.

① De acordo com a Eq. 4.6, a vazão mássica na saída é igual à soma das vazões nas entradas. Como exercício, mostre que a vazão volumétrica na saída *não é igual* à soma das vazões volumétricas nas entradas.

Teste-Relâmpago

Analise a vazão volumétrica em m^3/s em cada entrada. **Resposta:** $(AV)_1 = 12 \text{ m}^3/\text{s}$, $(AV)_2 = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.3.2 Aplicação Dependente do Tempo (Transiente)

Muitos dispositivos passam por períodos de operação durante os quais o estado varia com o tempo – por exemplo, o acionamento e o desligamento de motores. Exemplos adicionais incluem o processo de enchimento ou de descarga de recipientes e aplicações relativas a sistemas biológicos. O modelo de regime permanente não é apropriado na análise de casos dependentes do tempo (transientes).

O Exemplo 4.2 ilustra uma aplicação não permanente, ou transiente, do balanço da taxa de massa. Nesse caso, enche-se um barril com água.

EXEMPLO 4.2

Aplicando o Balanço da Taxa de Massa ao Processo de Enchimento de um Barril com Água

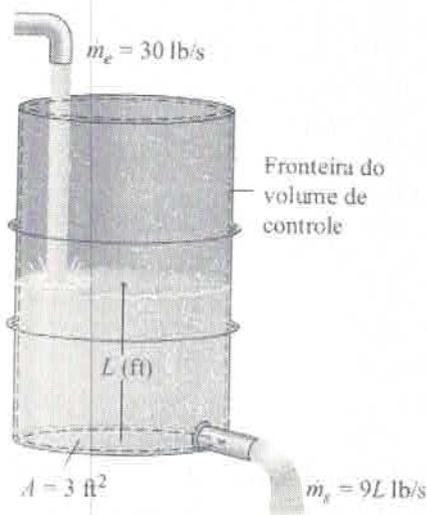
A água escoava para um barril aberto a partir de seu topo com uma vazão mássica constante de 30 lb/s (13,6 kg/s). Essa água sai por um tubo perto da base com uma vazão mássica proporcional à altura do líquido no interior do barril, que é igual a $\dot{m}_s = 9L$, em que L é a altura instantânea de líquido em ft. A área da base é 3 ft^2 ($0,28 \text{ m}^2$) e a massa específica da água é de $62,4 \text{ lb/ft}^3$ ($999,6 \text{ kg/m}^3$). Se o barril se encontra inicialmente vazio, faça um gráfico da variação da altura do líquido com o tempo e comente esse resultado.

SOLUÇÃO

Dado: água entra e sai através de um barril inicialmente vazio. A vazão mássica na entrada é constante. Na saída, a vazão mássica é proporcional à altura do líquido no barril.

Pede-se: esboçar graficamente a variação da altura do líquido com o tempo e comentar.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle é definido pela linha tracejada no diagrama.
2. A massa específica da água é constante.

Fig. E4.2a

Análise: para o volume de controle com uma entrada e uma saída, a Eq. 4.2 reduz-se a

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

A massa de água contida no interior do barril em um instante t é dada por

$$m_{vc}(t) = \rho AL(t)$$

em que ρ é a massa específica, A é a área da base e $L(t)$ é a altura instantânea do líquido. Substituindo-se essas variáveis no balanço de massa juntamente com as vazões mássicas fornecidas

$$\frac{d(\rho AL)}{dt} = 30 - 9L$$

Como a massa específica e a área são constantes, essa equação pode ser escrita como

$$\frac{dL}{dt} + \left(\frac{9}{\rho A}\right)L = \frac{30}{\rho A}$$

que é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem com coeficientes constantes. A solução é

1

$$L = 3,33 + C \exp\left(-\frac{9t}{\rho A}\right)$$

em que C é a constante de integração. A solução pode ser verificada pela sua substituição na equação diferencial.

Para calcular C , use a condição inicial: em $t = 0$, $L = 0$. Assim, $C = -3,33$, e a solução pode ser escrita como

$$L = 3,33 [1 - \exp(-9t/\rho A)]$$

Substituindo $\rho = 62,4 \text{ lb/ft}^3$ e $A = 3 \text{ ft}^2$, resulta em

$$L = 3,33 [1 - \exp(-0,048t)]$$

Essa relação pode ser esboçada graficamente à mão ou usando um programa de computador apropriado. O resultado é

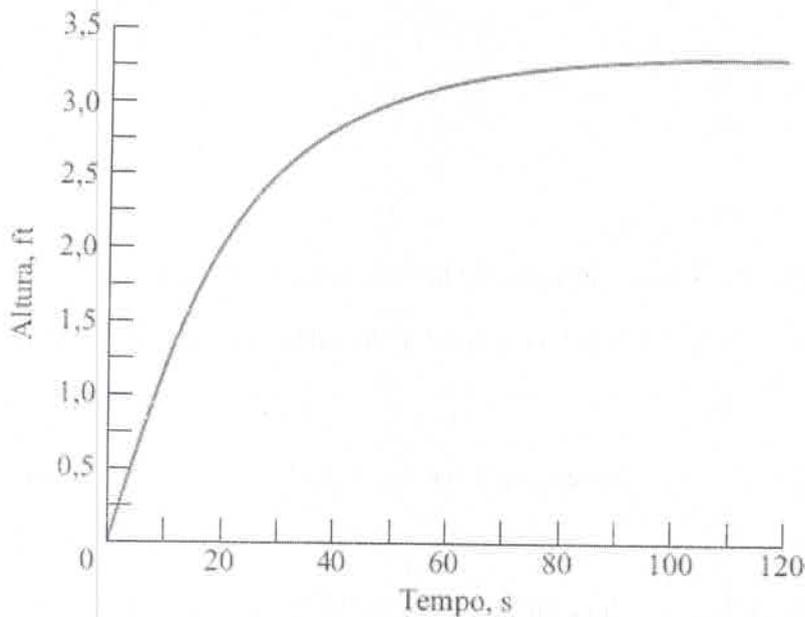


Fig. E4.2b

Pelo gráfico, podemos verificar que no início a altura do líquido aumenta com rapidez e em seguida ela se estabiliza. Após cerca de 100 s a altura permanece aproximadamente constante com o tempo. Nesse ponto a vazão de água na entrada do barril se iguala à taxa de saída. Do gráfico, o valor-limite de L é 3,33 ft, o que também pode ser verificado tomando-se o limite da solução analítica quando $t \rightarrow \infty$.

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar o balanço da taxa de massa para regime transiente.
- resolver uma equação diferencial ordinária e representar a solução em um gráfico.

1 Alternativamente, essa equação diferencial pode ser resolvida usando o *Interactive Thermodynamics: IT*, ou um programa similar. A equação diferencial pode ser expressa por

$$\text{der}(L, t) + (9 * L)/(\rho * A) = 30/(\rho * A)$$

$$\rho = 62.4 \text{ lb/ft}^3$$

$$A = 3 \text{ ft}^2$$

em que $\text{der}(L,t)$ é dL/dt , ρ é a massa específica e A é a área. Usando o botão **Explore**, imponha a condição inicial em $L = 0$ e varie t desde 0 até 200 com 0,5 de passo. A seguir, o gráfico pode ser construído usando o botão **Graph**.

Teste-Relâmpago

Se a vazão mássica da água que está escoando para dentro do barril fosse de 27 lb/s (12,2 kg/s) e todos os outros dados permanecessem os mesmos, qual seria o valor-limite da altura do líquido, L , em ft? **Resposta:** 3,0 ft.



BIOCONEXÕES

O coração humano fornece um bom exemplo de como sistemas biológicos podem ser modelados como volumes de controle. A Fig. 4.4 mostra a seção transversal de um coração humano. O fluxo é controlado por válvulas que permitem de modo intermitente que o sangue entre nas veias e saia através de artérias conforme os músculos do coração bombeiam. Trabalho é realizado para aumentar a pressão do sangue, que deixa o coração a um nível que irá impulsioná-lo através do sistema cardiovascular do corpo. Observe que a fronteira do volume de controle que engloba o coração não é fixa, mas se move com o tempo conforme o coração pulsa.

A compreensão da condição médica conhecida como *arritmia* requer a consideração do comportamento dependente do tempo do coração. Arritmia é uma mudança no ritmo regular do coração. Ele pode se apresentar sob diversas formas. O coração pode bater de maneira irregular, pular uma batida ou bater muito rapidamente ou lentamente. Uma arritmia pode ser detectada através da auscultação do coração com um estetoscópio, porém um eletrocardiograma oferece uma abordagem mais precisa. Embora a arritmia ocorra em pessoas sem doenças básicas de coração, pacientes com sérios sintomas podem necessitar de tratamento para manter suas batidas cardíacas regulares. Muitos pacientes com arritmia não necessitam de qualquer intervenção médica.

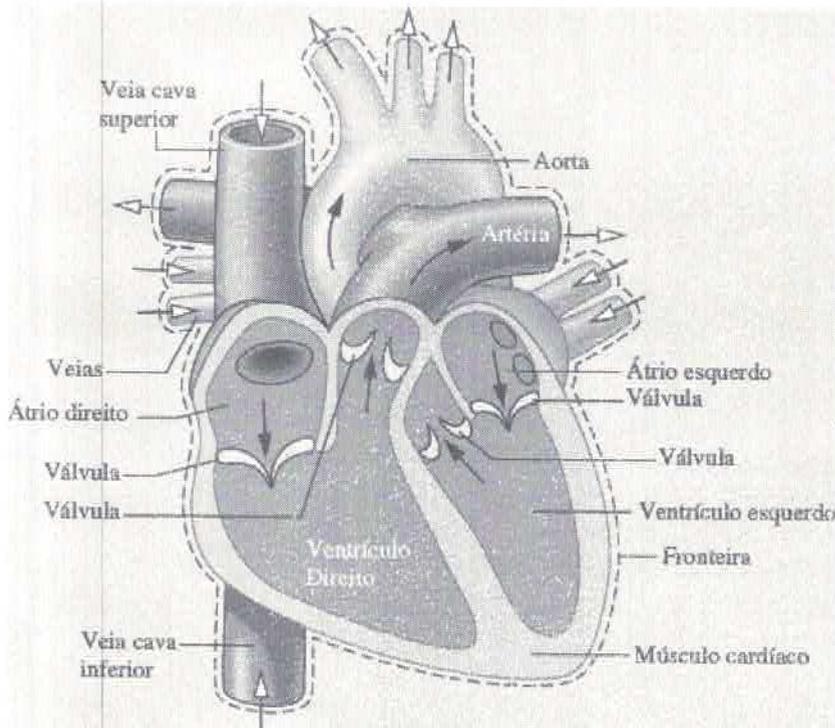


Fig. 4.4 Volume de controle englobando o coração.

4.4 Conservação de Energia para um Volume de Controle

Nesta seção é obtida uma formulação do balanço de energia em termos de taxa para volumes de controle. O balanço de energia exerce um importante papel em seções posteriores deste livro.

4.4.1 Desenvolvendo o Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle

Começamos observando que a formulação de volume de controle do balanço de energia pode ser deduzida com uma abordagem semelhante à utilizada no boxe da Seção 4.1.1, na qual o balanço da taxa de massa para volume de controle é obtido transformando-se a formulação para sistema fechado. O presente desenvolvimento se dá de maneira menos formal, utilizando o argumento de que, como a massa, a energia é uma propriedade extensiva, assim também pode ser transferida para dentro ou para fora de um volume de controle como resultado da massa que atravessa a fronteira. Como essa é a principal diferença entre o sistema fechado e a formulação de volume de controle, o balanço da taxa de energia para volume de controle pode ser obtido modificando-se o balanço da taxa de energia para sistema fechado de modo a levar em conta essas transferências de energia.

Dessa maneira, o princípio da *conservação de energia* aplicado a um volume de controle estabelece:

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de} \\ \text{variação da energia} \\ \text{contida no interior} \\ \text{do volume de} \\ \text{controle no instante } t \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{taxa líquida na qual} \\ \text{a energia está sendo} \\ \text{transferida para dentro} \\ \text{por transferência de} \\ \text{calor no instante } t \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{taxa líquida na qual} \\ \text{a energia está sendo} \\ \text{transferida para} \\ \text{fora por trabalho} \\ \text{no instante } t \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{taxa líquida da energia} \\ \text{transferida para o} \\ \text{volume de controle} \\ \text{juntamente com} \\ \text{fluxo de massa} \end{array} \right]$$

Para o volume de controle com uma entrada e uma saída com escoamento unidimensional, ilustrado na Fig. 4.5, o balanço da taxa de energia é

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \underline{\dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)} - \underline{\dot{m}_s \left(u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)} \quad (4.9)$$

em que E_{vc} representa a energia do volume de controle no instante t . Os termos \dot{Q} e \dot{W} representam, respectivamente, a taxa líquida de transferência de energia por calor e por trabalho através da fronteira do volume de controle no instante t . Os termos sublinhados representam as taxas de transferência de energia interna, cinética e potencial dos fluxos de entrada e saída. Se não houver fluxo de massa de entrada ou saída, as vazões mássicas respectivas são nulas e os termos sublinhados correspondentes desaparecem da Eq. 4.9. A equação se reduz então à forma da taxa temporal do balanço de energia para sistemas fechados: Eq. 2.37.

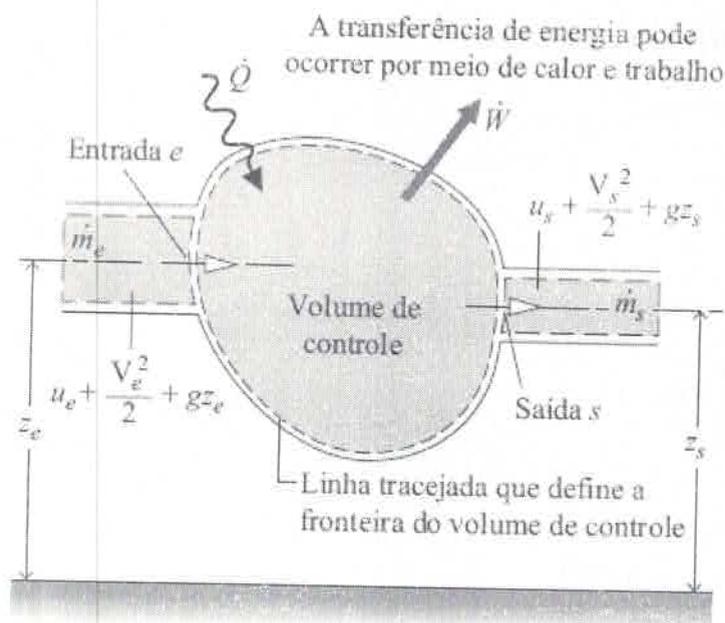


Fig. 4.5 Figura utilizada para o desenvolvimento da Eq. 4.9.

A seguir, a Eq. 4.9 será colocada em uma forma alternativa, mais conveniente para as aplicações subsequentes. Isso será feito principalmente reorganizando o termo do trabalho \dot{W} , que representa a taxa líquida de transferência de energia sob a forma de trabalho ao longo de todas as partes da fronteira do volume de controle.

Bal_da_Taxa_de_Energia_VC

A.16 – Aba a



4.4.2 Avaliando o Trabalho para um Volume de Controle

Por ser o trabalho sempre realizado sobre ou por um volume de controle no qual a matéria escoar através da fronteira, é conveniente separar o termo de trabalho, \dot{w} , da Eq. 4.9 em *duas contribuições*. Uma é o trabalho associado à pressão do fluido à medida que a massa é introduzida nas entradas e removida nas saídas. A outra contribuição, designada por \dot{W}_{vc} , inclui *todos os outros* efeitos devidos ao trabalho, como aqueles associados a eixos que giram, a deslocamentos de fronteira e a efeitos elétricos.

Considere o trabalho associado à pressão da matéria escoando através de uma saída s . Como se pode observar a partir da Eq. 2.13, a taxa de transferência de energia por trabalho pode ser expressa pelo produto da força pela velocidade no ponto de aplicação da força. Consequentemente, o produto da força normal, $p_s A_s$, pela velocidade do fluido, V_s , corresponde à taxa pela qual o trabalho é realizado na saída pela força normal (normal em relação à área de saída na direção do escoamento) devido à pressão. Ou seja

$$\left[\begin{array}{l} \text{taxa temporal de} \\ \text{transferência de energia por} \\ \text{trabalho saindo do volume de} \\ \text{controle na saída } s \end{array} \right] = (p_s A_s) V_s \quad (4.10)$$

em que p_s é a pressão, A_s é a área e V_s é a velocidade na saída s , respectivamente. Uma expressão análoga pode ser escrita para a taxa de transferência de energia por trabalho na entrada e do volume de controle.

Com essas considerações, o termo do trabalho \dot{W} da equação da energia, Eq. 4.9, pode ser escrito como

$$\dot{W} = \dot{W}_{vc} + (p_s A_s) V_s - (p_e A_e) V_e \quad (4.11)$$

em que, de acordo com a convenção de sinais para trabalho, o termo na entrada apresenta um sinal negativo porque nesta situação a energia está sendo transferida para o volume de controle. Um sinal positivo precede o termo de trabalho na saída porque a energia está sendo transferida para fora do volume de controle. Com $AV = \dot{m}_v$ da Eq. 4.4b, a expressão anterior pode ser escrita como

$$\dot{W} = \dot{W}_{vc} + \dot{m}_s(p_s v_s) - \dot{m}_e(p_e v_e) \quad (4.12)$$

trabalho de escoamento

em que \dot{m}_s são as vazões mássicas e v_e e v_s são os volumes específicos avaliados, respectivamente, na entrada e na saída. Na Eq. 4.12, os termos $\dot{m}_e(p_e v_s)$ levam em conta, respectivamente, o trabalho associado à pressão na entrada e na saída. Eles são comumente conhecidos como trabalho de fluxo ou trabalho de escoamento. O termo \dot{W}_{vc} leva em conta *todas as outras* transferências de energia associadas a trabalho através da fronteira do volume de controle.

4.4.3 Formulação de Escoamento Unidimensional do Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle

Substituindo-se a Eq. 4.12 na Eq. 4.9 e agrupando-se todos os termos referentes à entrada e à saída em expressões separadas, tem-se a seguinte formulação para o balanço de energia para volume de controle:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e \left(u_e + p_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left(u_s + p_s v_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4.13)$$

O subscrito "vc" foi adicionado a Q para enfatizar que esta é a taxa de transferência de calor ao longo da fronteira (superfície de controle) do *volume de controle*.

Os últimos dois termos da Eq. 4.13 podem ser reescritos usando a entalpia específica h apresentada na Seção 3.6.1. Com $h = u + pv$, o balanço de energia torna-se

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4.14)$$

Bal_da_Taxa_de_Energia_VC

A.16 - Aba b



O aparecimento da soma $u + pv$ na equação da energia para volume de controle é a principal razão para se apresentar a entalpia anteriormente. Ela é introduzida apenas por *conveniência*: a forma algébrica do balanço de energia é simplificada pelo uso da entalpia e, como vimos anteriormente, a entalpia é em geral tabelada junto com outras propriedades.

balanço da taxa de energia

Na prática, podem existir vários locais na fronteira através dos quais a massa entra ou sai. Isso pode ser levado em conta colocando-se somatórios como no balanço de massa. Desse modo, o balanço da taxa de energia é

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4.15)$$

Ao se escrever a Eq. 4.15 admitiu-se o modelo de escoamento unidimensional, no qual massa entra e sai do volume de controle.

A Eq. 4.15 é um balanço *contábil* para a energia no volume de controle. Ela enuncia que o aumento ou decréscimo da taxa de energia no interior do volume de controle é igual à diferença entre as taxas de transferência de energia entrando ou saindo ao longo da fronteira. Os mecanismos para a transferência de energia são calor e trabalho, como no caso de sistemas fechados, e a energia que acompanha a massa entrando ou saindo.

TOME NOTA...

A Eq. 4.15 é a forma mais geral do princípio da conservação de energia para volumes de controle utilizada neste livro. Ela serve como ponto de partida para a aplicação do princípio da conservação de energia para volumes de controle na solução de problemas.

4.4.4 Formulação Integral do Balanço da Taxa de Energia para um Volume de Controle

Como no caso do balanço da taxa de massa, o balanço da taxa de energia pode ser expresso em termos de propriedades locais para se obter formulações que são aplicáveis de um modo mais abrangente. Assim, o termo $E_{vc}(t)$, que representa a energia total associada ao volume de controle em um instante t , pode ser escrito como uma integral volumétrica

$$E_{vc}(t) = \int_V \rho e dV = \int_V \rho \left(u + \frac{V^2}{2} + gz \right) dV \quad (4.16)$$

De maneira similar, os termos que levam em conta as transferências de energia pelo fluxo de massa e pelo trabalho de escoamento nas entradas e nas saídas podem ser expressos como mostrado na seguinte formulação do balanço da taxa de energia:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho e dV = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \left[\int_A \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho V_n dA \right]_e \\ - \sum_s \left[\int_A \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \rho V_n dA \right]_s \end{aligned} \quad (4.17)$$

Formas adicionais do balanço de energia podem ser obtidas ao se expressar a transferência de calor \dot{Q}_{vc} como uma integral do *fluxo de calor*, ao longo da fronteira do volume de controle, e o trabalho \dot{W}_{vc} em termos das tensões normal e cisalhante nas partes móveis da fronteira.

Em princípio, a variação de energia em um volume de controle ao longo de um período de tempo pode ser obtida pela integração da equação da energia em relação ao tempo. Tal integração exigiria alguma informação sobre a dependência temporal das taxas de transferência de trabalho e calor, as várias vazões mássicas e os estados nos quais a massa entra e sai do volume de controle. Exemplos desse tipo de análise são apresentados na Seção 4.12.

4.5 Análise de Volumes de Controle em Regime Permanente

Nesta seção serão consideradas formulações em regime permanente para os balanços das taxas de massa e de energia, e posteriormente elas serão aplicadas a uma variedade de casos de interesse em Engenharia nas Seções 4.6 a 4.11. As formulações em regime permanente aqui obtidas não se aplicam às operações transientes de acionamento ou desligamento desses dispositivos, mas sim aos períodos de operação em regime permanente. Esta situação é comumente encontrada em engenharia.

Tipos_de_Sistemas

A.1 – Aba e



4.5.1 Formulações em Regime Permanente dos Balanços das Taxas de Massa e de Energia

Para um volume de controle em regime permanente, a situação da massa em seu interior e em suas fronteiras não se altera com o tempo. As vazões mássicas e as taxas de transferência de energia por calor e trabalho também são constantes com o tempo. Não pode existir acúmulo algum de massa no interior do volume de controle, assim $dm_{vc}/dt = 0$ e o balanço da taxa de massa, Eq. 4.2, toma a forma

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (4.6)$$

(taxa de entrada de massa) (taxa de saída de massa)

Além disso, no regime permanente $dE_{vc}/dt = 0$; assim, a Eq. 4.15 pode ser escrita como

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4.18)$$

Alternativamente

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \dot{W}_{vc} + \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (4.19)$$

(taxa de entrada de energia) (taxa de saída de energia)

A Eq. 4.6 afirma que no regime permanente a taxa total pela qual a massa entra no volume de controle é igual à taxa total pela qual a massa sai. De maneira similar, a Eq. 4.19 afirma que a taxa total pela qual a energia é transferida para o volume de controle é igual à taxa total pela qual a energia é transferida para fora.

Muitas aplicações importantes envolvem volumes de controle em regime permanente com uma entrada e uma saída. É interessante aplicar os balanços das taxas de massa e de energia para esse caso especial. O balanço de massa reduz-se simplesmente a $\dot{m}^1 = \dot{m}^2$. Isto é, a vazão mássica na saída, 2, deve ser a mesma da entrada, 1. Essa vazão mássica em comum é designada simplesmente por \dot{m} . Em seguida, aplicando o balanço de energia e fatorando a vazão mássica, tem-se

Bal_da_Taxa_de_Energia_VC

A.16 – Aba c

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right] \quad (4.20a)$$

Ou, dividindo-se pela vazão mássica,

$$0 = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (4.20b)$$

Os termos de entalpia, energia cinética e energia potencial aparecem todos nas Eqs. 4.20 como *diferenças* entre os seus valores na entrada e na saída. Isso mostra que os dados utilizados para se atribuir valores à entalpia específica, velocidade e altura se cancelam. Na Eq. 4.20b, as razões \dot{Q}_{vc}/\dot{m} e \dot{W}_{vc}/\dot{m} são as taxas de transferência de energia *por unidade de massa que se encontra escoando ao longo do volume de controle*.

As formulações anteriores do balanço de energia em regime permanente relacionam apenas grandezas associadas à transferência de energia avaliadas na *fronteira* do volume de controle. Nessas equações, nenhum detalhe sobre as propriedades no *interior* do volume de controle é necessário ou pode ser inferido. Quando se aplica o balanço de energia em qualquer de suas formulações é necessário usar as mesmas unidades para todos os termos da equação. Por exemplo, *todos* os termos na Eq. 4.20b devem ter uma unidade como kJ/kg ou Btu/lb. Nos exemplos que se seguem, as conversões de unidades adequadas são destacadas.

4.5.2 Considerações sobre a Modelagem de Volumes de Controle em Regime Permanente

Nesta seção fornecemos as bases para aplicações subseqüentes ao considerarmos uma modelagem para volumes de controle *em regime permanente*. Em particular, nas Seções 4.6 a 4.11 diversas aplicações são apresentadas mostrando o uso dos princípios de conservação de massa e energia juntamente com relações entre as propriedades para análise de volumes de controle em regime permanente. Esses exemplos foram extraídos de aplicações de interesse geral dos engenheiros e foram escolhidos para ilustrar pontos que são comuns a todas essas análises. Antes de estudá-los, é recomendável que você revise a metodologia de solução de problemas apresentada na Seção 1.9. À medida que os problemas se tornam mais complexos o uso de uma abordagem sistemática de sua solução se torna cada vez mais importante.

Quando os balanços das taxas de massa e de energia são aplicados a um volume de controle, normalmente algumas simplificações se fazem necessárias para que a análise fique mais fácil. Isto é, o volume de controle em estudo é *modelado* ao se fazerem hipóteses. A etapa de listar as hipóteses de uma maneira *cuidadosa* e *consciente* é necessária em toda análise de engenharia. Assim, uma parte importante desta seção se ocupa com considerações sobre as várias hipóteses que são comumente empregadas quando se aplicam os princípios de conservação para diferentes tipos de dispositivos. Quando você estudar os exemplos apresentados nas Seções 4.6 a 4.11, é muito importante entender o papel desempenhado por uma hipótese escolhida com cuidado para se chegar a uma solução. Para cada caso em análise, admite-se que a operação se dê em regime permanente. O escoamento é considerado unidimensional nos locais em que a massa entra e sai do volume de controle. Além disso, em cada um desses locais supõe-se que as relações de equilíbrio para propriedades se apliquem.



O Menor Pode Ser Melhor

Engenheiros estão desenvolvendo sistemas em miniatura para uso em que o peso, a portabilidade e/ou o fato de ser compacto são criticamente importantes. Algumas dessas aplicações envolvem *microssistemas* de tamanhos minúsculos, com dimensões no âmbito do micrômetro até o milímetro. Outros sistemas de *escalas intermediárias* um pouco maiores podem medir até alguns centímetros.

Os *sistemas microeletromecânicos (MEMS)* combinando características elétricas e mecânicas são largamente utilizados hoje em dia em processos de aquisição de dados e controle. Aplicações médicas dos MEMS incluem sensores de pressão que monitoram a pressão em um balão inserido em um vaso sanguíneo durante a angioplastia. Bolsas de ar são colocadas em funcionamento quando há uma batida de automóvel pela aceleração de minúsculos sensores. Os MEMS são também encontrados em discos rígidos de computadores e impressoras.

Versões de miniaturas de outras tecnologias estão sendo investigadas. Um estudo aponta para o desenvolvimento de uma instalação de potência com turbina a gás inteira, do tamanho de um botão de camisa. Uma outra envolve micromotores com eixos com o diâmetro de um cabelo humano. Profissionais que atuam em situações de emergência usando roupas de proteção química, biológica ou contra o fogo poderão, no futuro, ser mantidos em uma temperatura agradável por meio de minúsculas bombas de calor embutidas no material da roupa.

À medida que os projetos apontam para menores tamanhos, os efeitos de atrito e as transferências de calor impõem desafios especiais. A fabricação de sistemas em miniatura é também exigente. Levar um projeto da fase conceitual até a produção em alto volume pode ser tanto caro quanto arriscado, dizem representantes da indústria.

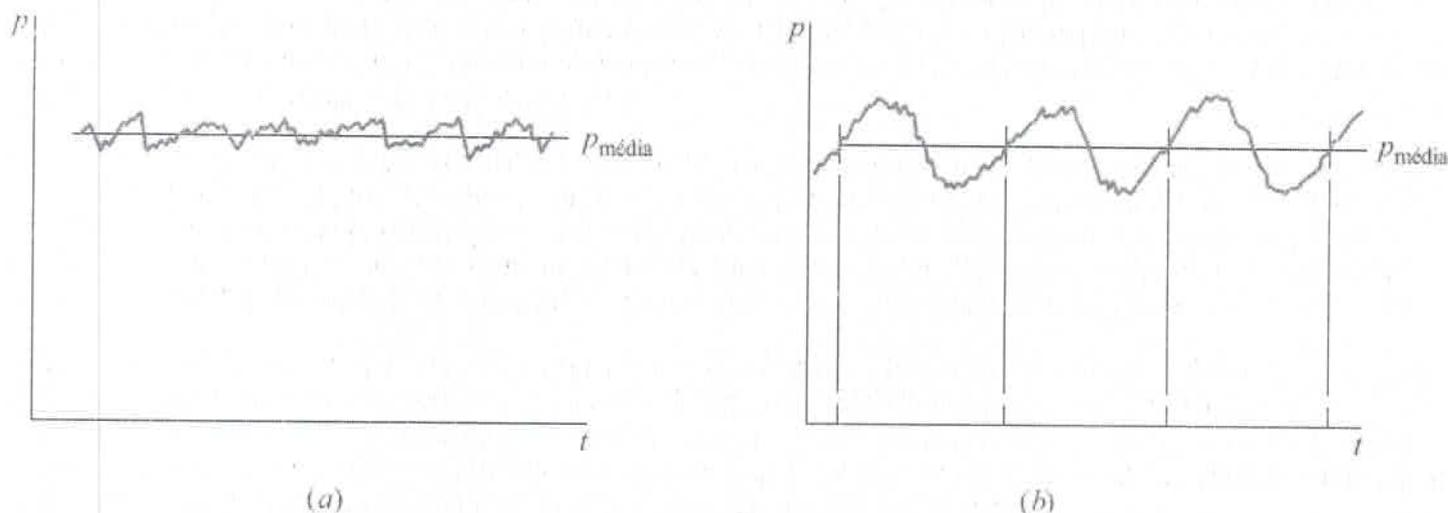


Fig. 4.6 Variações de pressão sobre uma média. (a) Flutuação. (b) Variação periódica.

Em muitos dos exemplos que se seguem, o termo Q'_{vc} da transferência de calor no balanço de energia é anulado porque ele é pequeno quando comparado com outras transferências de energia ao longo da fronteira. Isso pode ser o resultado de um ou mais dos seguintes fatores:

- ▶ A superfície exterior do volume de controle é perfeitamente isolada.
- ▶ A área da superfície exterior é muito pequena para que haja uma transferência de calor apreciável.
- ▶ A diferença de temperatura entre o volume de controle e sua vizinhança é tão pequena que a transferência de calor pode ser ignorada.
- ▶ O gás ou líquido escoam pelo volume de controle tão rapidamente que não existe tempo suficiente para que ocorra uma transferência de calor significativa.

O termo de trabalho \dot{W}_{vc} desaparece do balanço de energia quando não existem eixos girantes, deslocamentos da fronteira, efeitos elétricos ou outros mecanismos de trabalho associados ao volume de controle em análise. As energias cinética e potencial da matéria que entra e sai do volume de controle são abandonadas quando são pequenas, se comparadas a outras transferências de energia.

Na prática, as propriedades dos volumes de controle admitidas em regime permanente de fato variam com o tempo. No entanto, a hipótese de regime permanente é aplicável quando as propriedades flutuarem apenas um pouco em relação às suas médias, como no caso da pressão na Fig. 4.6a. Pode-se supor também o regime permanente quando variações periódicas no tempo forem observadas, como na Fig. 4.6b. Por exemplo, em máquinas alternativas e em compressores os fluxos de entrada e de saída pulsam conforme as válvulas são abertas ou fechadas. Outros parâmetros também podem apresentar variações com o tempo. No entanto, a hipótese de regime permanente pode ser aplicável a volumes de controle que circundam esses dispositivos se as seguintes premissas forem razoáveis para cada período sucessivo de operação: (1) não há variação líquida alguma na energia total e na massa total no interior do volume de controle; (2) as médias temporais das vazões mássicas, das taxas de transferência de calor, das potências e das propriedades das substâncias que cruzam a superfície de controle permanecem todas constantes.

A seguir iremos apresentar breves discussões e exemplos ilustrando a análise de vários dispositivos de interesse em engenharia, incluindo bocais e difusores, turbinas, compressores e bombas, trocadores de calor e dispositivos de estrangulamento. As discussões enfatizam algumas aplicações comuns de cada dispositivo e a modelagem tipicamente utilizada na análise termodinâmica.

4.6 Bocais e Difusores

bocal difusor

Um bocal é um duto com área de seção reta variável na qual a velocidade de um gás ou líquido aumenta na direção do escoamento. Em um difusor o líquido ou gás se desacelera na direção do escoamento. A Fig. 4.7 mostra um bocal em que a área de seção reta decresce na direção do escoamento e um difusor no qual as paredes da passagem do escoamento divergem. Observe que, conforme a velocidade aumenta, a pressão diminui, e o oposto também é válido.

Para muitos leitores, a aplicação mais familiar de um bocal ocorre quando este é acoplado a uma mangueira de jardim. Porém, bocais e difusores têm aplicações muito importantes na engenharia. Na Fig. 4.8 um bocal e um difusor se combinam em um túnel de vento de teste. Dutos com passagens convergentes e divergentes são normalmente utilizados na distribuição de ar frio e ar quente nos sistemas de ar condicionados residenciais. Bocais e difusores também são componentes fundamentais para os motores turbojatos (Cap. 9).

4.6.1 Considerações sobre a Modelagem de Bocais e Difusores

Para um volume de controle que engloba um bocal ou difusor, o único trabalho é o *trabalho de escoamento* nos locais onde a massa entra e sai do volume de controle; assim, o termo \dot{W}_{vc} desaparece da equação da energia para esses dispositivos. A variação da energia potencial entre a entrada e a saída é pequena em muitas situações. Assim, os termos sublinhados na Eq. 4.20a (repetida a seguir) desaparecem, ficando então os termos relacionados à entalpia, à energia cinética e à transferência de calor, como mostra a Eq. (a)

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + \underline{g(z_1 - z_2)} \right] \quad (a)$$

$$0 = \dot{Q}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \right]$$

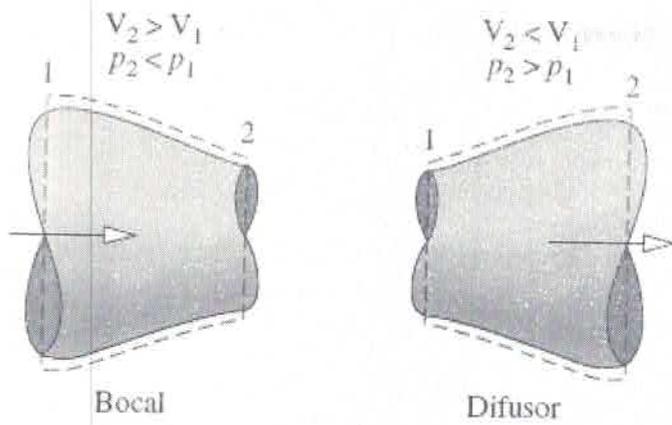


Fig. 4.7 Ilustração de um bocal e um difusor.

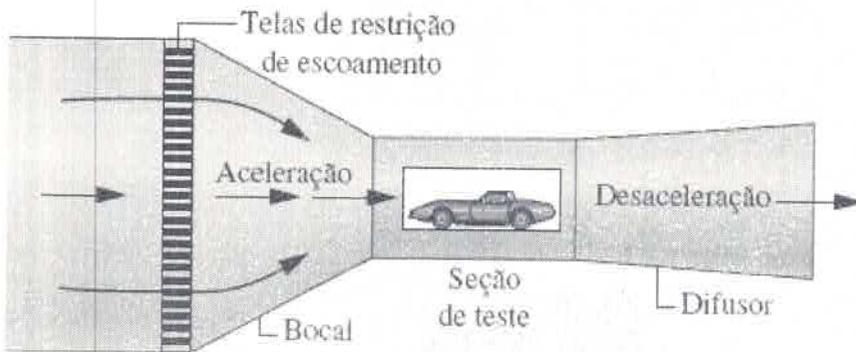


Fig. 4.8 Dispositivo de teste em túnel de vento.

Bocal
A.17 – Abas a, b e c



Difusor
A.18 – Abas a, b e c

em que \dot{m} é a vazão mássica. O termo Q_{vc} que representa a transferência de calor com a vizinhança normalmente seria a transferência de calor inevitável (ou perda), e é quase sempre pequeno o suficiente quando comparado às variações de entalpia e de energia cinética, de modo que pode ser abandonado, obtendo-se simplesmente

$$0 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) \quad (4.21)$$

4.6.2 Aplicação para um Bocal de Vapor

A modelagem apresentada na Seção 4.6.1 é ilustrada no exemplo a seguir, que envolve um bocal de vapor. Observe, em particular, o uso dos fatores de conversão de unidades nessa aplicação.

EXEMPLO 4.3 ▶

Calculando a Área de Saída de um Bocal de Vapor

Vapor d'água entra em um bocal convergente-divergente que opera em regime permanente com $p_1 = 40 \text{ bar}$, $T_1 =$

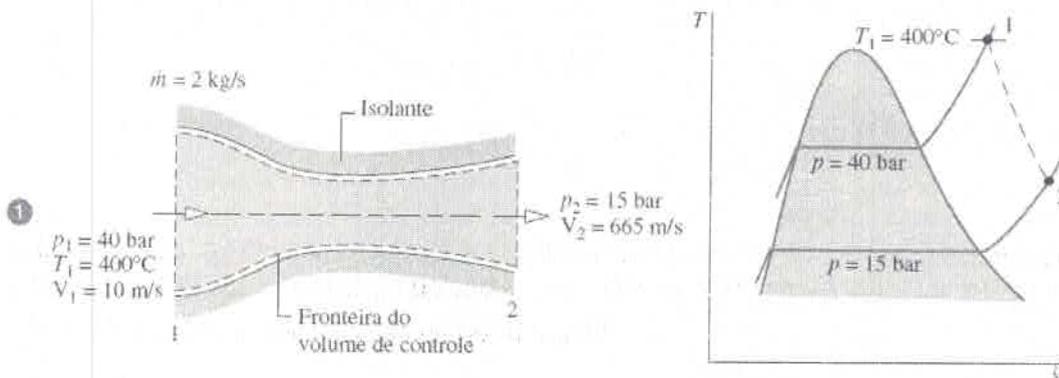
400°C e a uma velocidade de 10 m/s. O vapor escoa através do bocal sem transferência de calor e sem nenhuma variação significativa da energia potencial. Na saída, $p_2 = 15$ bar e a velocidade é de 665 m/s. A vazão mássica é de 2 kg/s. Determine a área de saída do bocal em m^2 .

SOLUÇÃO

Dado: vapor d'água escoa em regime permanente através de um bocal com propriedades conhecidas na entrada e na saída, com uma vazão mássica conhecida e com efeitos desprezíveis de transferência de calor e de energia potencial.

Pede-se: determine a área de saída.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle mostrado na figura correspondente encontra-se em regime permanente.
2. A transferência de calor é desprezível, e $\dot{W}_{vc} = 0$.
3. A variação da energia potencial entre a entrada e a saída pode ser abandonada.

Fig. E4.3

Análise: a área de saída pode ser determinada pela vazão mássica e pela Eq. 4.4b, que pode ser rearrumada para fornecer

$$A_2 = \frac{\dot{m}v_2}{V_2}$$

De maneira a calcular A_2 dessa equação, necessita-se do volume específico v_2 na saída, e isso significa que o estado na saída deve ser determinado.

O estado na saída é determinado pelo valor de duas propriedades intensivas independentes. Uma é a pressão p_2 , que é conhecida. A outra é a entalpia específica h_2 , determinada a partir do balanço de energia em regime permanente, Eq. 4.20a, como a seguir

$$0 = \dot{Q}_{vc}^0 - \dot{W}_{vc}^0 + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

Os termos \dot{Q}_{vc}^0 são abandonados pela hipótese 2. A variação da energia potencial específica é desprezada de acordo com a hipótese 3, e \dot{m} se cancela, obtendo-se

$$0 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right)$$

Resolvendo para h_2

$$h_2 = h_1 + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right)$$

Da Tabela A-4, $h_1 = 3213,6$ kJ/kg. As velocidades V_1 e V_2 são fornecidas. Inserindo os valores e convertendo as unidades dos termos da energia cinética para kJ/kg, tem-se

$$\begin{aligned} h_2 &= 3213,6 \text{ kJ/kg} + \left[\frac{(10)^2 - (665)^2}{2} \right] \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= 3213,6 - 221,1 = 2992,5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Finalmente, referindo-se à Tabela A-4 para $p_2 = 15$ bar e com $h_2 = 2992,5$ kJ/kg, o volume específico na saída é $v_2 = 0,1627$ m³/kg. A área de saída é, então,

$$A_2 = \frac{(2 \text{ kg/s})(0,1627 \text{ m}^3/\text{kg})}{665 \text{ m/s}} = 4,89 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar o balanço da taxa de energia para regime permanente a um volume de controle.

aplicar a expressão da vazão mássica, Eq. 4.4b.

desenvolver um modelo de engenharia.

obter dados de propriedades da água.

① Embora as relações de equilíbrio para propriedades apliquem-se na entrada e na saída do volume de controle, os estados intermediários do vapor não são necessariamente estados de equilíbrio. Como consequência, a expansão ao longo do bocal é representada no diagrama $T-v$ por uma linha tracejada.

② Deve-se tomar cuidado na conversão de unidades da energia cinética específica para kJ/kg.

Teste-Relâmpago

Determine a área na entrada do bocal em m². **Resposta:** $1,47 \cdot 10^{-2}$ m².

4.7 Turbinas

turbina

Uma turbina é um dispositivo que desenvolve potência em função da passagem de um gás ou líquido escoando através de uma série de pás colocadas em um eixo que se encontra livre para girar. Um esquema de uma turbina a vapor ou a gás de fluxo axial é mostrado na Fig. 4.9. Essas turbinas são amplamente empregadas para a geração de potência em instalações de potência a vapor, em instalações de potência com turbinas a gás e em motores de avião

(Caps. 8 e 9). Nessas aplicações o vapor d'água superaquecido ou um gás entra na turbina e se expande até uma pressão inferior conforme a potência é gerada.

Uma turbina *hidráulica* acoplada a um gerador e instalada em um dique é mostrada na Fig. 4.10. Conforme a água flui da maior para a menor altura através da turbina, a turbina fornece potência de eixo para o gerador. O gerador converte a energia mecânica do eixo em eletricidade. Este tipo de geração é produzida a partir da força motriz da água, como as hidrelétricas. Hoje, a energia hídrica é um meio *renovável* importante de produção de eletricidade, sendo uma das maneiras mais baratas de fazê-lo. A eletricidade também pode ser produzida a partir de um escoamento de água utilizando turbinas para explorar as correntes presentes nos oceanos e rios.

As turbinas também são componentes chaves nas usinas eólicas, que como as usinas hidrelétricas são meios renováveis de geração de eletricidade.

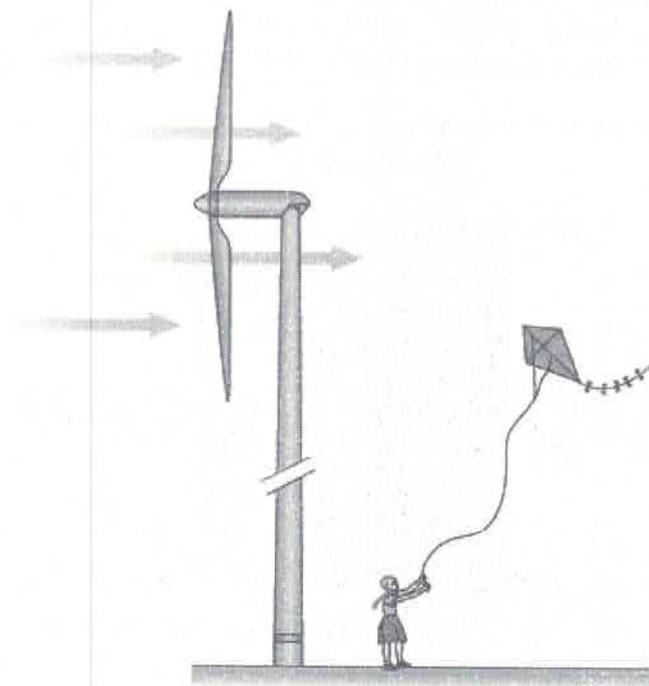
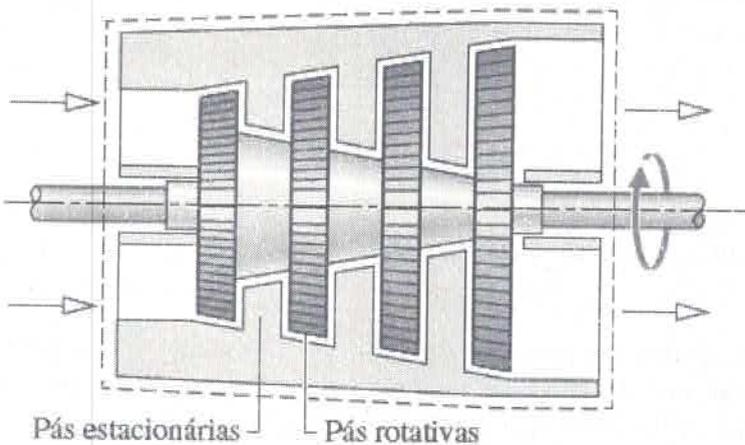


Fig. 4.9 Esquema de uma turbina a vapor ou a gás de fluxo axial.

4.7.1 Considerações sobre a Modelagem de Turbinas a Vapor e a Gás

Por meio de uma seleção apropriada da fronteira do volume de controle que envolve uma turbina a vapor ou a gás, a energia cinética líquida da matéria escoando através da fronteira é usualmente pequena o suficiente para ser

abandonada. A energia potencial líquida da matéria em escoamento normalmente é desprezível. Assim, os termos sublinhados na Eq. 4.20a (repetida a seguir) desaparecem, ficando então os termos relacionados à potência à entalpia e à transferência de calor, como mostra a Eq. (a)

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + \underline{g(z_1 - z_2)} \right] \quad (a)$$

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}(h_1 - h_2)$$

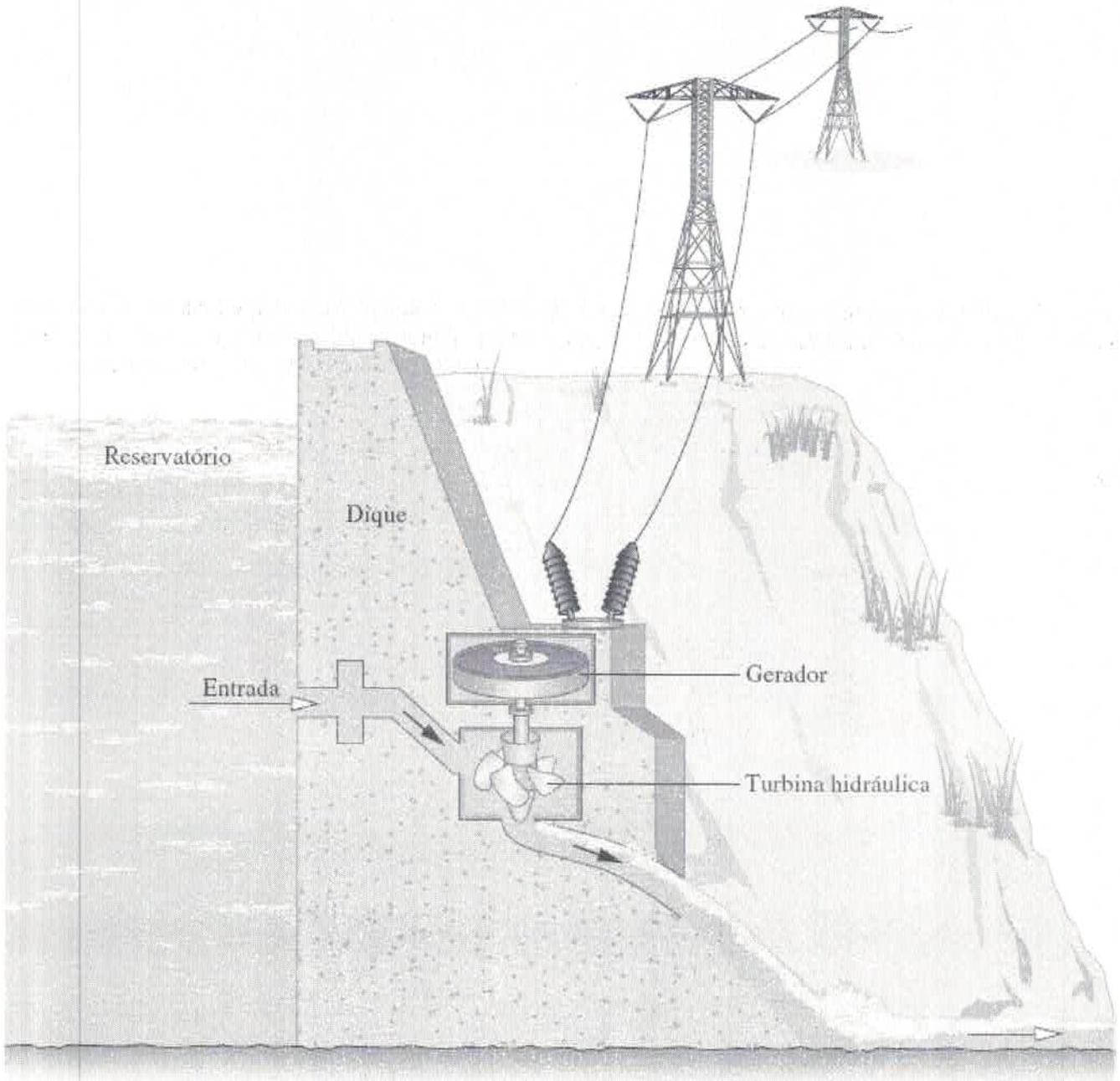


Fig. 4.10 Turbina hidráulica instalada em um dique.



Turbinas eólicas em escala industrial podem ser tão altas quanto um prédio de 30 andares, e produzir eletricidade a uma taxa que satisfaria as necessidades de centenas de casas típicas dos Estados Unidos. O rotor de três pás dessas turbinas eólicas apresenta um diâmetro de aproximadamente o comprimento de um campo de futebol e pode operar em ventos de até 55 milhas por hora. Elas realizam o controle de todas as funções por meio de microprocessadores, que asseguram que cada pá é colocada no ângulo correto para as condições correntes de vento. Os *parques eólicos*, compostos por várias dessas turbinas, marcam a paisagem ao longo do globo.

Parques eólicos localizados em áreas favoráveis de vários estados na região das Grandes Planícies dos Estados Unidos podem, sozinhos, suprir a maioria da eletricidade necessária ao país, desde que a rede elétrica seja atualizada e expandida (veja Novos Horizontes no Cap. 8). Parques eólicos situados ao longo do litoral americano também podem contribuir significativamente para satisfazer as necessidades nacionais. Especialistas dizem que a variação do vento pode ser gerenciada para produzir o máximo de energia quando os ventos são fortes e armazenar parte ou toda energia por diversos meios, incluindo armazenamento por meio de *bombagem hídrica* e por meio de *ar comprimido*, para distribuição quando a demanda dos consumidores for mais elevada e a eletricidade tiver o seu maior valor econômico (veja o box na Seção 4.8.3).

Atualmente, a energia eólica pode produzir eletricidade a custos competitivos com todos os meios alternativos e dentro de poucos anos espera-se que ela esteja entre as formas menos dispendiosas de produção de eletricidade. Instalações de energia eólica levam menos tempo para serem construídas do que as instalações convencionais e são modulares, permitindo que unidades adicionais sejam acrescentadas conforme o necessário. Ao gerar eletricidade, as usinas de turbinas eólicas não produzem gases de efeito estufa ou outras emissões.

As turbinas eólicas em escala industrial consideradas até agora não são as únicas disponíveis. Pequenas empresas fabricam turbinas eólicas relativamente baratas que podem gerar eletricidade com energia eólica a velocidades tão baixas como 3 ou 4 quilômetros por hora. Estas turbinas de *baixa velocidade* de vento são adequadas para pequenas empresas, fazendas, grupos de moradores, ou usuários individuais.

Turbina

A.19 – Abas a, b e c



em que \dot{m} é a vazão mássica. A única transferência de calor entre a turbina e a vizinhança seria a transferência de calor inevitável (ou perda), quantidade usualmente pequena quando comparada aos termos relacionados à potência e à entalpia, de modo que pode ser também abandonada, obtendo-se simplesmente

$$\dot{W}_{ve} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (b)$$

4.7.2 Aplicação para uma Turbina a Vapor

Nesta seção, considerações sobre a modelagem de turbinas são apresentadas por meio da aplicação de um caso de importância prática envolvendo uma turbina a vapor. Dentre os objetivos desse exemplo está a avaliação do significado dos termos de transferência de calor e de energia cinética do balanço de energia, e a ilustração do uso apropriado dos fatores de conversão de unidades.

EXEMPLO 4.4 ▶

Calculando a Transferência de Calor em uma Turbina a Vapor

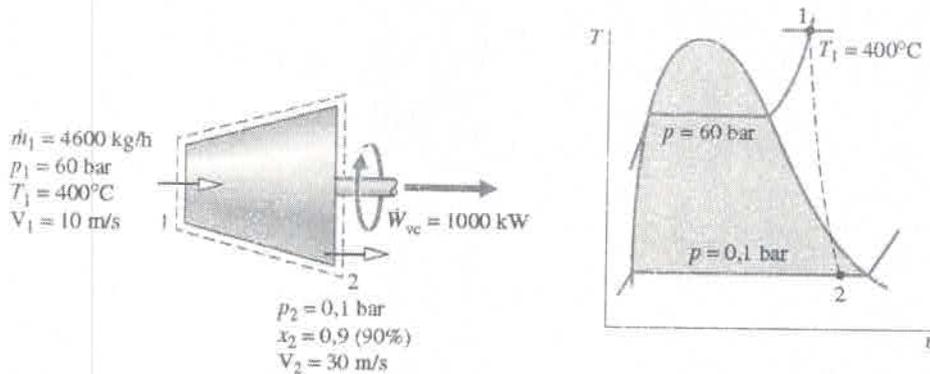
O vapor d'água entra em uma turbina operando em regime permanente com uma vazão mássica de 4600 kg/h. A turbina desenvolve uma potência de 1000 kW. Na entrada, a pressão é 60 bar, a temperatura é 400°C e a velocidade é 10 m/s. Na saída, a pressão é 0,1 bar, o título é 0,9 (90%) e a velocidade é 30 m/s. Calcule a taxa de transferência de calor entre a turbina e a vizinhança em kW.

SOLUÇÃO

Dado: uma turbina a vapor opera em regime permanente. A vazão mássica, a potência de saída e os estados do vapor d'água na entrada e na saída são conhecidos.

Pede-se: calcule a taxa de transferência de calor.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle mostrado na figura correspondente encontra-se em regime permanente.
2. A variação da energia potencial entre a entrada e a saída pode ser desprezada.

Fig. E4.4

Análise: para calcular a taxa de transferência de calor, inicie com a formulação de uma entrada e uma saída do balanço de energia para um volume de controle em regime permanente, Eq. 4.20a. Assim

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

em que \dot{m} é a vazão mássica. Resolvendo para \dot{Q}_{vc} e abandonando a variação da energia potencial entre a entrada e a saída

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) \right]$$

Para comparar as ordens de grandeza dos tempos de entalpia e energia cinética e para enfatizar as conversões de unidades necessárias, cada um desses termos será avaliado separadamente.

Primeiro, a variação da entalpia específica $h_2 - h_1$ é determinada. Usando a Tabela A-4, $h_1 = 3177,2$ kJ/kg. O estado 2 é uma mistura bifásica líquido-vapor; assim, com os dados da Tabela A-3 e com o título fornecido

$$\begin{aligned} h_2 &= h_{f2} + x_2(h_{g2} - h_{f2}) \\ &= 191,83 + (0,9)(2392,8) = 2345,4 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Então,

$$h_2 - h_1 = 2345,4 - 3177,2 = -831,8 \text{ kJ/kg}$$

Considere em seguida a variação da energia cinética específica. Usando os valores fornecidos para as velocidades

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) &= \left[\frac{(30)^2 - (10)^2}{2} \right] \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= 0,4 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Calculando \dot{Q}_{vc} da Eq. (a)

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad \dot{Q}_{vc} &= (1000 \text{ kW}) + \left(4600 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) (-831,8 + 0,4) \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left| \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right| \left| \frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right| \\ &= -62,3 \text{ kW} \end{aligned}$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar o balanço da taxa de energia para regime permanente a um volume de controle.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades da água.

1 A ordem de grandeza da variação da energia cinética específica entre a entrada e a saída é muito menor do que a variação da entalpia específica. Observe o uso dos fatores de conversão de unidades nesse caso e no cálculo de \dot{Q}_{vc} logo em seguida.

2 O valor negativo de \dot{Q}_{vc} significa que existe uma transferência de calor da turbina para sua vizinhança, como seria esperado. A ordem de grandeza de \dot{Q}_{vc} é pequena quando comparada à potência desenvolvida.

Teste-Relâmpago

Considerando que a variação da energia cinética entre a entrada e a saída pode ser desprezada, calcule a taxa de transferência de calor, em kW, mantendo todos os outros dados constantes. Comente. **Resposta:** -62,9 kW.

4.8 Compressores e Bombas

compressores bombas

Compressores e bombas são dispositivos nos quais o trabalho é realizado sobre a substância em escoamento ao longo dos mesmos, de modo a mudar o estado da substância, normalmente aumentar a pressão e/ou a elevação. O termo *compressor* é usado quando a substância é um gás (vapor) e o termo *bomba* é usado quando a substância é um líquido. Quatro tipos de compressores estão ilustrados na Fig. 4.11. O compressor alternativo da Fig. 4.11a é caracterizado por seu movimento alternativo enquanto os outros têm movimento rotativo.

O compressor de fluxo axial da Fig. 4.11b é um componente essencial dos motores de avião (Cap. 9). Os compressores também são componentes essenciais de sistemas de refrigeração e de bombas de calor (Cap. 10). No estudo do Cap. 8 verifica-se que as bombas são importantes nos sistemas de potência a vapor. As bombas também são normalmente usadas no processo de enchimento de torres de água, na remoção de água de porões inundados e

em numerosas outras aplicações domésticas e industriais.

4.8.1 Considerações sobre a Modelagem de Compressores e Bombas

Para um volume de controle que engloba um compressor, os balanços de massa e de energia para regime permanente se simplificam, como para os casos das turbinas considerados na Seção 4.7.1. Assim, a Eq. 4.20a se reduz a

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (a)$$

A transferência de calor com a vizinhança é frequentemente um efeito secundário que pode ser desprezado, obtendo-se, como para as turbinas

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (b)$$

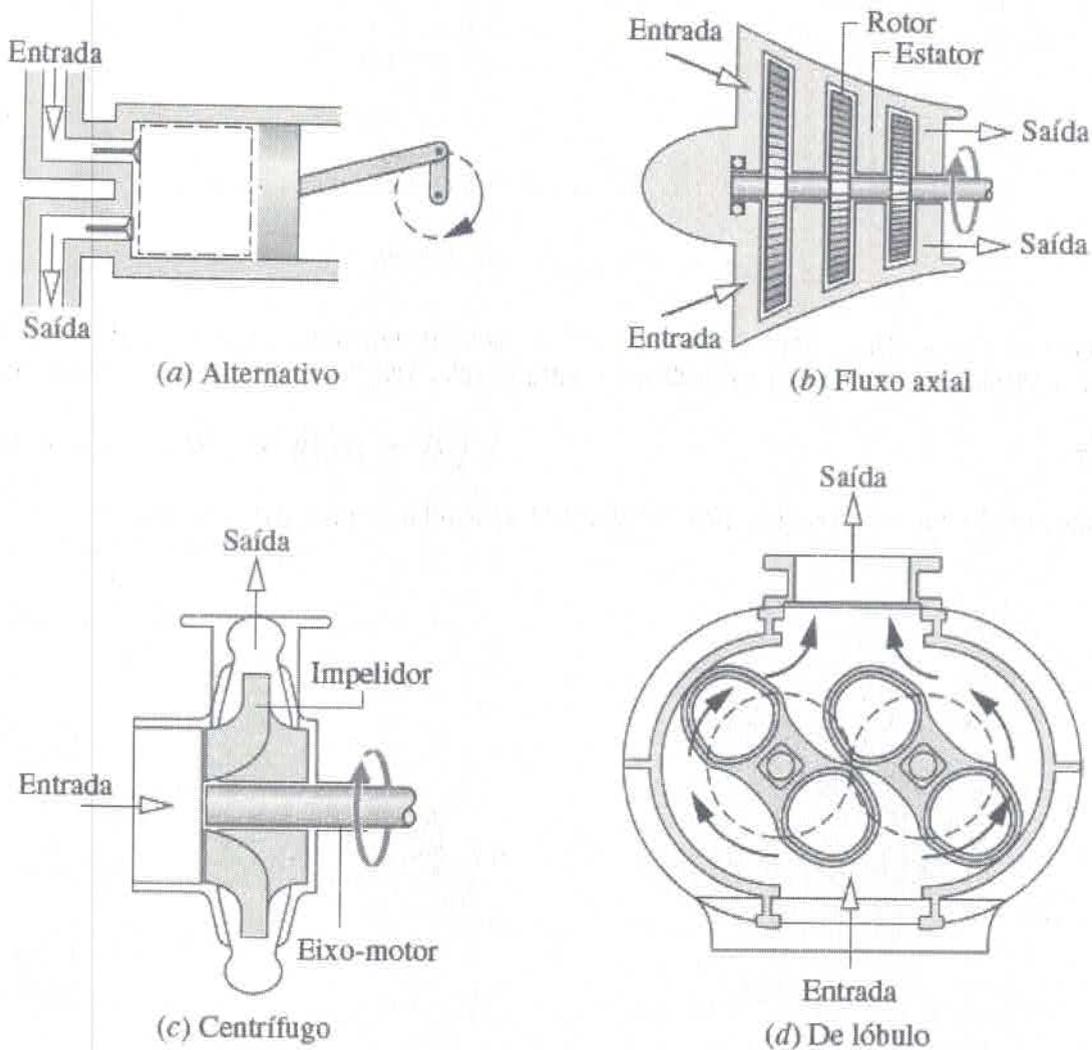


Fig. 4.11 Tipos de compressores.

Para as bombas, a transferência de calor é geralmente um efeito secundário, mas os termos relacionados às energias cinética e potencial da Eq. 4.20a podem ser significativos, dependendo da aplicação. Observe que para compressores e bombas o valor de \dot{W}_{vc} é *negativo* porque uma potência de *entrada* é necessária.

4.8.2 Aplicações para um Compressor de Ar e um Sistema de Bombeamento

Nesta seção, considerações sobre a modelagem de compressores e bombas são apresentadas nos Exemplos 4.5 e 4.6, respectivamente. Na Seção 4.8.3 são apresentadas aplicações de compressores e bombas em sistemas de armazenamento de energia.

Dentre os objetivos do Exemplo 4.5 está a avaliação do significado dos termos de transferência de calor e de energia cinética do balanço de energia e a ilustração do uso apropriado dos fatores de conversão de unidades.

EXEMPLO 4.5 ▶

Calculando a Potência de um Compressor

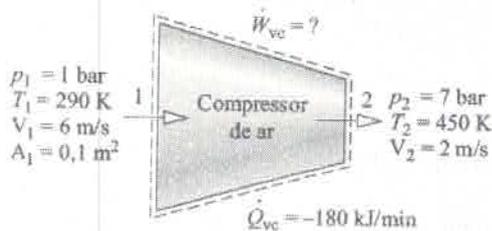
Ar é admitido em um compressor que opera em regime permanente com uma pressão de 1 bar, temperatura igual a 290 K e a uma velocidade de 6 m/s por uma entrada cuja área é de 0,1 m². Na saída a pressão é de 7 bar, a temperatura é 450 K e a velocidade é 2 m/s. A transferência de calor do compressor para sua vizinhança ocorre a uma taxa de 180 kJ/min. Empregando o modelo de gás ideal, calcule a potência de entrada do compressor em kW.

SOLUÇÃO

Dado: um compressor de ar opera em regime permanente com estados conhecidos na entrada e na saída e com uma taxa de transferência de calor conhecida.

Pede-se: calcule a potência requerida pelo compressor.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle mostrado na figura correspondente encontra-se em regime permanente.
2. A variação da energia potencial entre a entrada e a saída pode ser abandonada.
3. O modelo de gás ideal se aplica para o ar.

Fig. E4.5

Análise: para calcular a potência de entrada do compressor, inicie com o balanço da taxa de energia para o volume de controle em regime permanente com uma entrada e uma saída, Eq. 4.20a. Assim,

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

Resolvendo

$$\dot{W}_{vc} = \dot{Q}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) \right]$$

A variação da energia potencial entre a entrada e a saída desaparece pela hipótese 2.

O fluxo de massa \dot{m} pode ser avaliado pelos dados fornecidos na entrada e pela equação de estado de gás ideal.

$$\dot{m} = \frac{A_1 V_1}{v_1} = \frac{A_1 V_1 p_1}{(\bar{R}/M) T_1} = \frac{(0,1 \text{ m}^2)(6 \text{ m/s})(10^5 \text{ N/m}^2)}{\left(\frac{8314 \text{ N} \cdot \text{m}}{28,97 \text{ kg} \cdot \text{K}}\right)(290 \text{ K})} = 0,72 \text{ kg/s}$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar o balanço da taxa de energia para regime permanente a um volume de controle.
- aplicar a expressão da vazão mássica, Eq. 4.4b.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades do ar modelado com um gás ideal.

As entalpias específicas h_1 e h_2 podem ser encontradas na Tabela A-22. Para 290 K, $h_1 = 290,16 \text{ kJ/kg}$. Para 450 K, $h_2 = 451,8 \text{ kJ/kg}$. Substituindo os valores na expressão para \dot{W}_{vc} e aplicando os fatores de conversão de unidades apropriados, obtemos

$$\begin{aligned} \dot{W}_{vc} &= \left(-180 \frac{\text{kJ}}{\text{min}}\right) \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| + 0,72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[(290,16 - 451,8) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{(6)^2 - (2)^2}{2} \right) \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \right] \\ &= -3 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 0,72 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (-161,64 + 0,02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= -119,4 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left| \frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right| = -119,4 \text{ kW} \end{aligned}$$

- 1 A aplicabilidade do modelo de gás ideal pode ser verificada consultando-se o diagrama de compressibilidade generalizado.
- 2 Neste exemplo Q'_{vc} e \dot{W}_{vc} apresentam valores negativos, indicando que o sentido da transferência de calor se dá a partir do compressor e que o trabalho é realizado sobre o ar que passa pelo compressor. O valor da potência de entrada do compressor é 119,4 kW. A variação na energia cinética não contribui de maneira significativa.

Teste-Relâmpago

Considerando que a variação da energia cinética entre a entrada e a saída pode ser desprezada, calcule a potência do compressor, em kW, mantendo todos os outros dados constantes. Comente. **Resposta:** -119,4 kW.

Compressor
A.20 – Abas a, b e c



Bomba
A.21 – Abas a, b e c

No Exemplo 4.6, uma bomba é um componente de um sistema global que descarrega uma corrente de água a alta velocidade em uma posição com uma altura maior do que a da entrada. Observe as considerações do modelo, neste caso, em particular os papéis das energias cinética e potencial, e o uso apropriado dos fatores de conversão de unidades.

EXEMPLO 4.5

Analisando um Sistema de Bombeamento

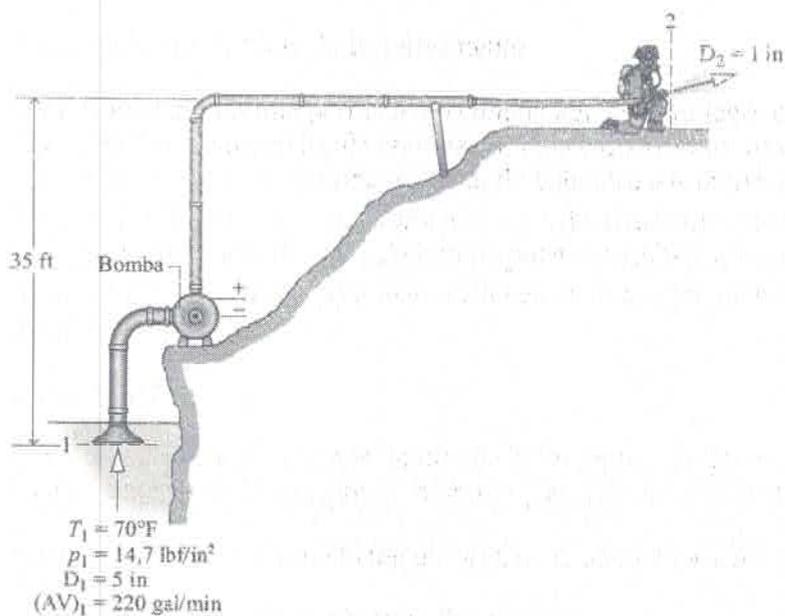
Uma bomba em regime permanente conduz água de um lago, com uma vazão volumétrica de 220 gal/min, por de um tubo com 5 in de diâmetro de entrada. A água é distribuída através de uma mangueira acoplada a um bocal convergente. O bocal de saída tem 1 in de diâmetro e está localizado a 35 ft acima da entrada do tubo. A água entra a 70°F e 14,7 lbf/in², e sai sem variações significativas com relação à temperatura ou pressão. A ordem de grandeza da taxa de transferência de calor da bomba para a vizinhança é 5% da potência de entrada. A aceleração da gravidade é de 32,2 ft/s². Determine (a) a velocidade da água na entrada e na saída, ambas em ft/s, e (b) a potência requerida pela bomba em hp.

SOLUÇÃO

Dado: um sistema de bombeamento opera em regime permanente com condições de entrada e saída conhecidas. A taxa de transferência de calor da bomba é especificada como uma porcentagem da potência de entrada.

Pede-se: determine a velocidade da água na entrada e na saída do sistema de bombeamento e a potência necessária.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle engloba a bomba, a entrada do tubo e a mangueira de distribuição.
2. O volume de controle encontra-se em regime permanente.
3. A magnitude da transferência de calor do volume de controle é 5% da potência de entrada.
4. Não há variações significativas na temperatura ou pressão.
5. Para água líquida, $v \approx v_f(T)$ (Eq. 3.11) e a Eq. 3.13 é usada para calcular a entalpia específica.
6. $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$.

Fig. E4.6

Análise:

(a) O balanço da taxa de massa se reduz, em regime permanente, a $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$. A vazão mássica na entrada e na saída, \dot{m} , pode ser determinada utilizando-se a Eq. 4.4b juntamente com $v \approx v_f(70^\circ\text{F}) = 0,01605 \text{ ft}^3/\text{lb}$ da Tabela A-2E.

Então,

$$\dot{m} = \frac{AV}{v} = \left(\frac{220 \text{ gal/min}}{0,01605 \text{ ft}^3/\text{lb}} \right) \left| \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right| \left| \frac{0,13368 \text{ ft}^3}{1 \text{ gal}} \right|$$
$$= 30,54 \text{ lb/s}$$

Assim, as velocidades na entrada e na saída são, respectivamente,

$$\textcircled{1} \quad V_1 = \frac{\dot{m}v}{A_1} = \frac{(30,54 \text{ lb/s})(0,01605 \text{ ft}^3/\text{lb})}{\pi(5 \text{ in})^2/4} \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| = 3,59 \text{ ft/s}$$

$$V_2 = \frac{\dot{m}v}{A_2} = \frac{(30,54 \text{ lb/s})(0,01605 \text{ ft}^3/\text{lb})}{\pi(1 \text{ in})^2/4} \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| = 89,87 \text{ ft/s}$$

(b) Para calcular a potência de entrada inicie com o balanço da taxa de energia para o volume de controle em regime permanente com uma entrada e uma saída, Eq. 4.20a. Ou seja

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) + g(z_1 - z_2) \right]$$

2 Introdzindo $\dot{Q}_{vc} = (0,05) \dot{W}_{vc}$ e resolvendo para \dot{W}_{vc}

$$\dot{W}_{vc} = \frac{\dot{m}}{0,95} \left[(h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) + g(z_1 - z_2) \right] \quad (\text{a})$$

Usando a Eq. 3.13, o termo relacionado com a entalpia é expresso como

$$h_1 - h_2 = [h_f(T_1) + v_f(T_1)[p_1 - p_{\text{sat}}(T_1)]]$$
$$- [h_f(T_2) + v_f(T_2)[p_2 - p_{\text{sat}}(T_2)]] \quad (\text{b})$$

Como não há variação significativa na temperatura, a Eq. (b) se reduz a

$$h_1 - h_2 = v_f(T)(p_1 - p_2)$$

Como também não há variação significativa na pressão, o termo relacionado com a entalpia é desprezado na presente análise. Em seguida, é avaliado o termo da energia cinética

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \frac{[(3,59)^2 - (89,87)^2] \left(\frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)^2}{2} \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lb}} \right| \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,174 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| = -0,1614 \text{ Btu/lb}$$

Finalmente, o termo da energia potencial é

$$g(z_1 - z_2) = (32,2 \text{ ft/s}^2)(0 - 35) \text{ ft} \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lb}} \right| \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,174 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| = -0,0450 \text{ Btu/lb}$$

Inserindo valores na Eq. (a)

$$\dot{W}_{cv} = \left(\frac{30,54 \text{ lb/s}}{0,95} \right) [0 - 0,1614 - 0,0450] \left(\frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right)$$

$$= -6,64 \text{ Btu/s}$$

Convertendo para hp:

$$\dot{W}_{cv} = \left(-6,64 \frac{\text{Btu}}{\text{s}} \right) \left| \frac{1 \text{ hp}}{2545 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}} \right| \left| \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right| = -9,4 \text{ hp}$$

em que o sinal negativo indica que a potência é fornecida à bomba.

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar o balanço da taxa de energia para regime permanente a um volume de controle.
 - aplicar a expressão da vazão mássica, Eq. 4.4b.
 - desenvolver um modelo de engenharia.
 - obter dados de propriedades da água líquida.
- 1 Alternativamente, V_1 pode ser determinado da vazão volumétrica em 1. Isso é deixado como exercício.
 - 2 Já que uma potência deve ser fornecida para a operação da bomba, \dot{W}_{vc} é negativo de acordo com nossa convenção de sinais. A energia transferida por calor ocorre do volume de controle para a vizinhança e, assim, \dot{Q}_{vc} também é negativo. Usando o valor de \dot{W}_{vc} determinado na parte (b), $\dot{Q}_{vc} = (0,05) \dot{W}_{vc} = -0,332 \text{ Btu/s}$ (-047 hp).

Teste-Relâmpago

Considerando que o bocal é removido e a água sai diretamente da mangueira, cujo diâmetro é de 2 in, determine a velocidade na saída em ft/s e a potência necessária, em hp, mantendo todos os outros dados constantes. **Resposta:** 22,47 ft/s, -2,5 hp.

TOME NOTA...

Custo refere-se à quantia paga para produzir um bem ou um serviço. Preço refere-se ao que os consumidores pagam para adquirir esta mercadoria ou serviço.

4.8.3 Sistemas de Armazenamento de Energia por meio de Bombagem Hídrica e Ar Comprimido

Em virtude da lei da oferta e da procura e de outros fatores econômicos, o valor da eletricidade varia com o tempo. O custo para gerar eletricidade e o aumento do preço pago pelos consumidores dependem se a demanda ocorre nos *horários de pico* ou *fora deles*. O período de pico tipicamente compreende os dias da semana – por exemplo, das 8h

às 20h, enquanto o período fora do horário de pico compreende o horário noturno, os fins de semana e os feriados principais. Os consumidores podem esperar pagar mais pela eletricidade nos horários de pico. Os métodos de armazenamento de energia que tiram proveito das taxas variáveis de eletricidade incluem o armazenamento térmico (veja o boxe na Seção 3.8) e o armazenamento por meio de bombagem hídrica e de ar comprimido apresentados no boxe adiante.

Aspectos Econômicos do Armazenamento de Energia por Bombagem Hídrica e por Ar Comprimido

Apesar dos custos significativos de propriedade e operação dos sistemas de armazenamento de energia em grande escala, várias estratégias econômicas, que inclusive aproveitam as diferenças entre os horários de pico e os horários fora de pico de demandas de energia elétrica, podem fazer do armazenamento de energia por meio da bombagem hídrica e do ar comprimido boas opções para geração de energia. Nesta discussão, vamos nos concentrar no papel das tarifas variáveis de energia elétrica.

No armazenamento por bombagem hídrica, a água é bombeada a partir de um reservatório inferior para um reservatório superior, armazenando assim energia sob a forma de energia potencial gravitacional. (Para simplificar, pense na usina hidrelétrica da Fig. 4.10 operando no sentido inverso.) A eletricidade nos horários fora de pico é usada para acionar as bombas que fornecem água para o reservatório superior. Mais tarde, durante o período de pico, a água armazenada é liberada a partir do reservatório superior para gerar eletricidade conforme a água flui através das turbinas para o reservatório inferior. Por exemplo, no verão, água é liberada do reservatório superior para gerar energia para atender uma alta demanda durante o dia em virtude de ar condicionado; enquanto durante a noite, quando a demanda é baixa, a água é bombeada de volta para o reservatório superior para uso no dia seguinte. Em virtude do atrito e de outros fatores não ideais, uma perda global de eletricidade da entrada para a saída ocorre no armazenamento por bombagem hídrica e isso aumenta os custos operacionais. Ainda assim, as diferenças entre as tarifas de eletricidade diurnas e noturnas ajudam a tornar esta tecnologia viável.

No armazenamento de energia por meio de ar comprimido, compressores acionados com eletricidade fora dos horários de pico preenchem locais com formações geológicas subterrâneas adequadas, como uma caverna de sal subterrânea, minas com rochedos de alta qualidade ou aquíferos, com ar pressurizado retirado da atmosfera. Veja a Fig. 4.12. Quando há demanda de energia elétrica nos horários de pico, ar comprimido a alta pressão é liberado para a superfície, aquecido por gás natural em câmaras de combustão, e expandido em uma turbina, gerando energia elétrica para distribuição nos horários de pico.

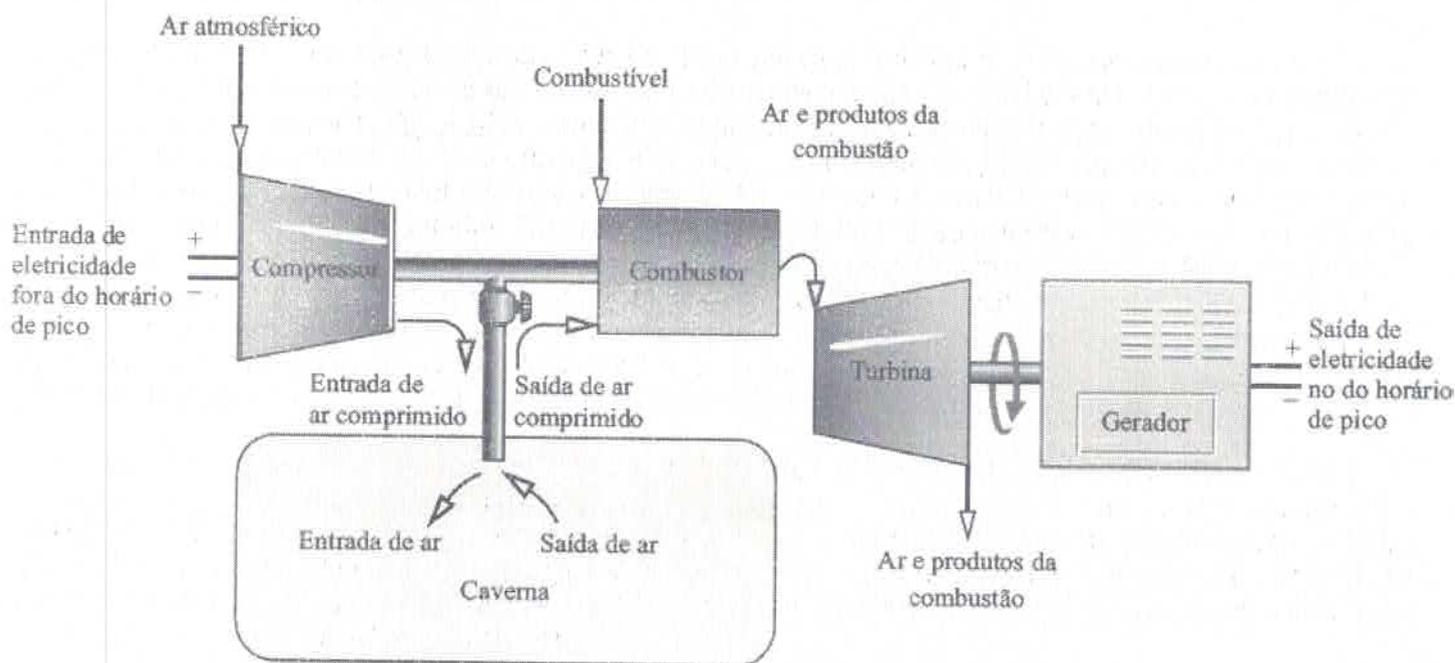


Fig. 4.12 Armazenamento de ar comprimido.

4.9 Trocadores de Calor

trocadores de calor

Os trocadores de calor têm inúmeras aplicações domésticas e industriais, incluindo o uso em aquecimento doméstico e sistemas de resfriamento, em sistemas automotivos, na geração de potência elétrica e em processos químicos. De fato, quase todas as áreas de aplicação listadas na Tabela 1.1 envolvem trocadores de calor.

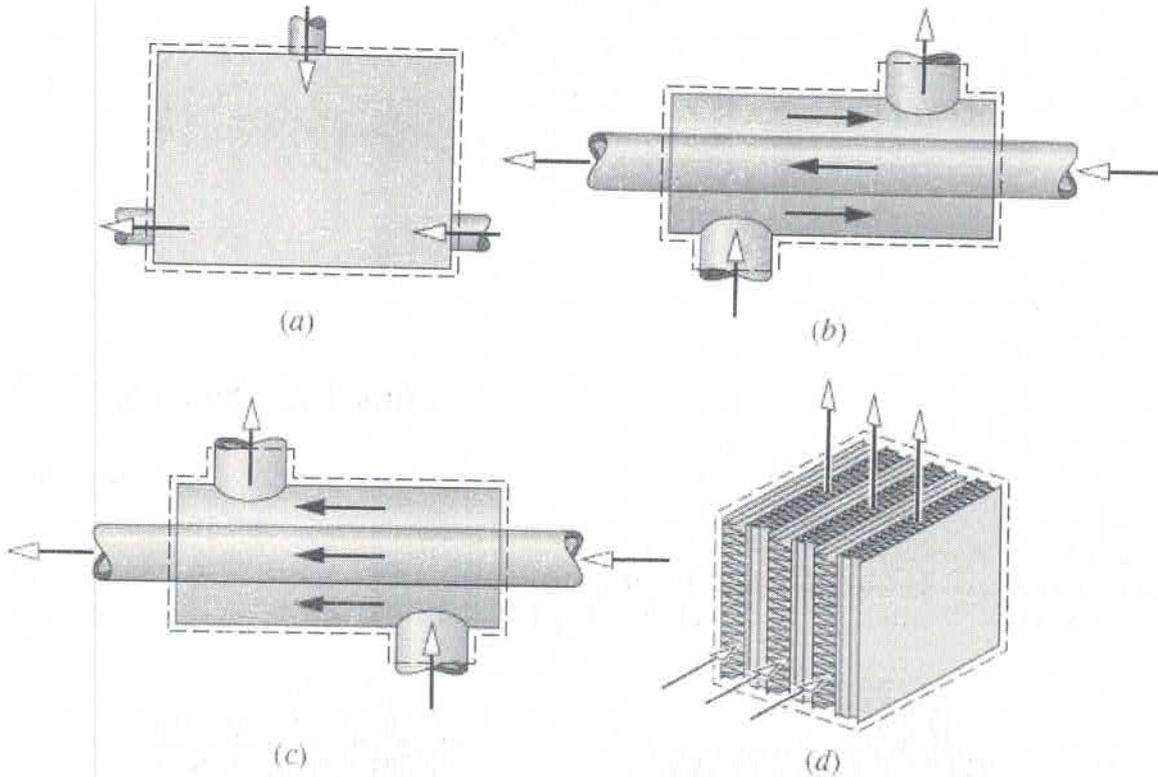


Fig. 4.13 Tipos usuais de trocadores de calor. (a) Trocador de calor de contato direto. (b) Trocador de calor duplo tubo contracorrente. (c) Trocador de calor duplo tubo em escoamento paralelo. (d) Trocador de calor de fluxo cruzado.

Um tipo comum de trocador de calor é um reservatório no qual duas correntes quente e fria se misturam diretamente, como ilustrado na [Fig. 4.13a](#). Um aquecedor de água de alimentação aberto é um componente de sistemas de potência a vapor considerados no Cap. 8, e é um exemplo desse tipo de dispositivo.

Outro tipo comum de trocador de calor é aquele no qual um gás ou líquido é *separado* de um outro gás ou líquido por uma parede através da qual a energia é conduzida. Esses trocadores de calor, conhecidos como recuperadores, apresentam as mais diversas formas. Nas [Figs. 4.13b](#) e [4.13c](#) são mostradas, respectivamente, configurações do tipo tubo duplo em escoamento contracorrente e em escoamento paralelo. Outras configurações incluem escoamentos cruzados, como nos radiadores de automóveis, e condensadores e evaporadores de múltiplos passes, do tipo casco e tubo. A [Fig. 4.13d](#) ilustra um trocador de calor de escoamento cruzado.



BIOCONEXÕES

Mantas térmicas como a ilustrada na [Fig. 4.14](#) são usadas para evitar que a temperatura do corpo de um paciente caia abaixo da temperatura normal (hipotermia) durante e depois de uma cirurgia. Tipicamente, um aquecedor e um soprador direcionam um fluxo de ar quente no interior da manta. Ar sai da manta pelas perfurações em sua

superfície. As mantas térmicas têm sido utilizadas de maneira segura e sem incidentes em milhões de procedimentos cirúrgicos. Apesar disso, há riscos óbvios para os pacientes se o controle de temperatura falhar e ocorrer um aquecimento excessivo. Esses riscos podem ser previstos e minimizados com boas práticas de engenharia.

O aquecimento de pacientes nem sempre é a questão em hospitais; por vezes a questão é o resfriamento, como em casos de parada cardíaca, acidente vascular cerebral, ataque cardíaco e superaquecimento do corpo (hipertermia). A parada cardíaca, por exemplo, priva o músculo cardíaco de oxigênio e de sangue, causando a morte de parte dele. Isso muitas vezes induz a danos cerebrais entre os sobreviventes, incluindo deficiência cognitiva irreversível. Estudos mostram que, quando a temperatura corporal de pacientes cardíacos é reduzida para 33°C (91°F), o dano é limitado porque os órgãos vitais funcionam mais lentamente e exigem menos oxigênio. Para alcançar bons resultados, os médicos especialistas dizem que o resfriamento deve ser feito por 20 minutos ou menos. Um sistema aprovado para o resfriamento de vítimas de parada cardíaca inclui um traje corporal plástico descartável, uma bomba, e um *chiller*. A bomba fornece um rápido escoamento de água fria em torno do corpo, em contato direto com a pele do paciente usando o traje, em seguida recicla refrigerante para o *chiller* e de volta para o paciente.

Essas aplicações biomédicas fornecem exemplos de como os engenheiros atentos aos princípios da termodinâmica podem trazer para o processo de projeto seus conhecimentos sobre os trocadores de calor, a aquisição e o controle de temperatura e os requisitos de segurança e confiabilidade.

4.9.1 Considerações sobre a Modelagem de Trocadores de Calor

Conforme ilustrado na Fig. 4.13, os trocadores de calor podem envolver múltiplas entradas e saídas. Para um volume de controle englobando um trocador de calor o único trabalho é o de escoamento nos locais onde a matéria entra e sai, assim o termo \dot{W}_{vc} desaparece do balanço da taxa de energia. Além disso, as energias cinética e potencial das correntes de escoamento normalmente podem ser ignoradas nas entradas e saídas. Assim, os termos sublinhados da Eq. 4.18 (repetida a seguir) podem ser anulados, ficando os termos relacionados à entalpia e à transferência de calor, como ilustrado pela Eq. (a). Isto é,

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(\underline{h_e} + \underline{\frac{V_e^2}{2} + gz_e} \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(\underline{h_s} + \underline{\frac{V_s^2}{2} + gz_s} \right)$$

$$0 = \dot{Q}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e h_e - \sum_s \dot{m}_s h_s \quad (a)$$

Trocador_de_Calor
A.22 – Abas a, b e c



Embora ocorram altas taxas de transferência de energia no trocador de calor, a transferência de calor com a vizinhança é usualmente pequena o suficiente para ser abandonada. Assim, o termo \dot{Q} da Eq. (a) desapareceria, ficando apenas os termos relacionados à entalpia. A forma final do balanço da taxa de energia deve ser resolvida junto com uma expressão apropriada para o balanço da taxa de massa, identificando o número e o tipo de entradas e saídas para o caso em questão.

4.9.2 Aplicações para um Condensador de uma Instalação de Potência e o Resfriamento de um Computador

O próximo exemplo ilustra como os balanços de massa e energia podem ser aplicados a um condensador em regime permanente. Os condensadores são usualmente encontrados em instalações de potência e em sistemas de refrigeração.

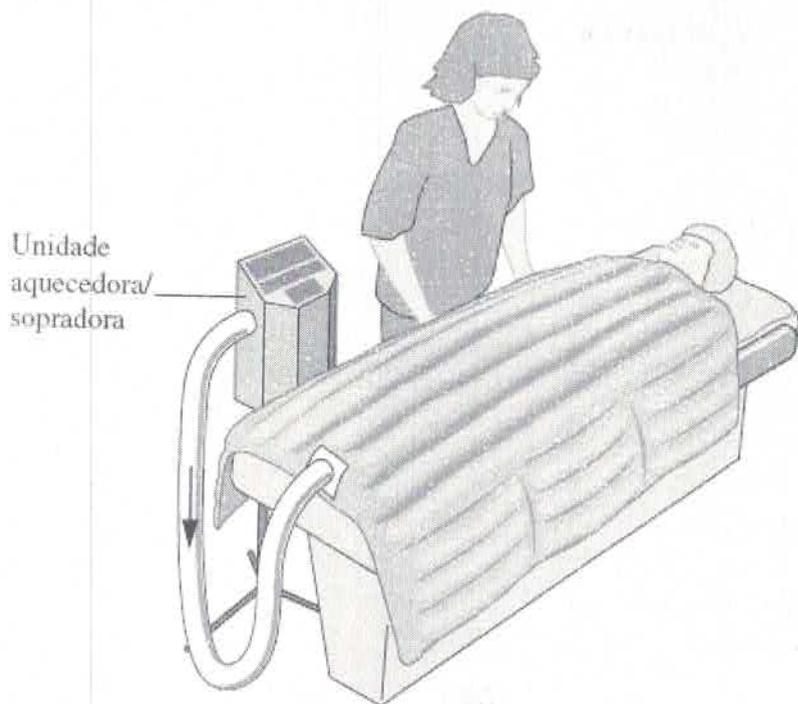


Fig. 4.14 Manta térmica inflável.

▶ ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 4.7 ▶

Avaliando o Desempenho de um Condensador de uma Instalação de Potência

O vapor d'água entra no condensador de uma instalação de potência a vapor a 0,1 bar e com um título de 0,95, e o condensado sai a 0,1 bar e 45°C. A água de resfriamento entra no condensador como um outro fluxo na forma líquida a 20°C e sai como líquido a 35°C sem nenhuma variação de pressão. A transferência de calor no exterior do condensador e as variações das energias cinética e potencial dos fluxos podem ser ignoradas. Para uma operação em regime permanente, determine

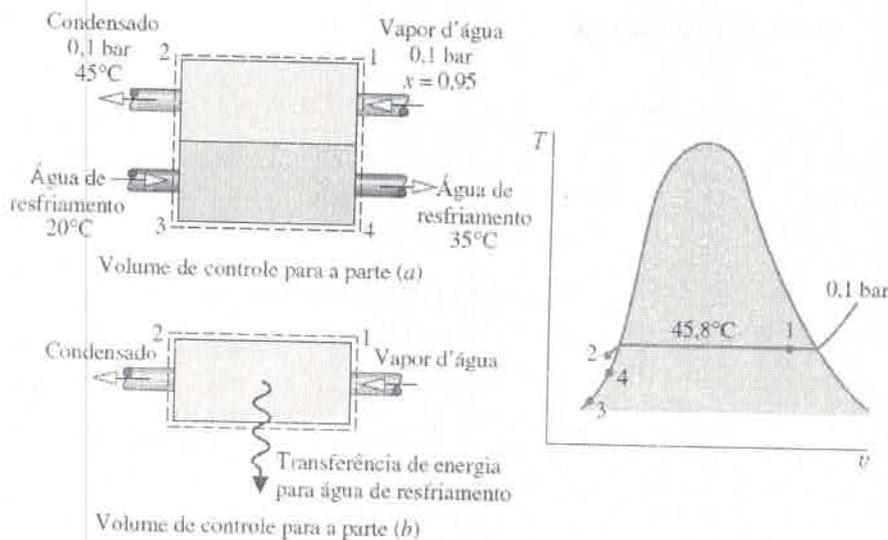
- (a) a razão entre a vazão mássica da água de resfriamento pela vazão mássica do vapor d'água que se condensa.
- (b) a taxa de transferência de energia do vapor d'água que se condensa para a água de resfriamento em kJ por kg de vapor que escoar através do condensador.

SOLUÇÃO

Dado: o vapor d'água se condensa em regime permanente através da interação com um outro fluxo de água líquida.

Pede-se: determine a razão entre a vazão mássica da água de resfriamento e a vazão mássica de vapor d'água, juntamente com a taxa de transferência de energia do vapor para a água de resfriamento.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. Cada um dos dois volumes de controle mostrados nesse esboço encontra-se em regime permanente.
2. Não existe uma transferência de calor significativa entre o condensador como um todo e a sua vizinhança. $\dot{W}_{vc} = 0$.
3. As variações das energias cinética e potencial dos fluxos entre a entrada e a saída podem ser ignoradas.
4. Nos estados 2, 3 e 4, $h \approx h_f(T)$ (veja a Eq. 3.14).

Fig. E4.7

Análise: os fluxos de vapor d'água e da água de resfriamento não se misturam. Assim, o balanço da taxa de massa para cada um dos dois fluxos reduz-se, no caso de regime permanente, a

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad \text{e} \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

(a) A razão entre a vazão mássica da água de resfriamento e a do vapor que se condensa, \dot{m}_3/\dot{m}_1 , pode ser determinada através da formulação em regime permanente do balanço de energia, Eq. 4.18, aplicado ao condensador como um todo, conforme se segue:

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{m}_3 \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{m}_4 \left(h_4 + \frac{V_4^2}{2} + gz_4 \right)$$

Os termos sublinhados se anulam pelas hipóteses 2 e 3. Com essas simplificações, juntamente com as relações entre as vazões mássicas citadas, o balanço da taxa de energia torna-se simplesmente

$$0 = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_3 - h_4)$$

Resolvendo, temos

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_4 - h_3}$$

A entalpia específica h_1 pode ser determinada usando o título fornecido e os dados da Tabela A-3. Da Tabela A-3 para 0,1 bar, $h_f = 191,83$ kJ/kg e $h_g = 2584,7$ kJ/kg, assim

$$h_1 = 191,83 + 0,95(2584,7 - 191,83) = 2465,1 \text{ kJ/kg}$$

① Usando a hipótese 4, a entalpia específica em 2 é dada por $h_2 \approx h_f(T_2) = 188,45$ kJ/kg. De maneira similar, $h_3 \approx h_f(T_3)$ e $h_4 \approx h_f(T_4)$, obtendo então $h_4 - h_3 = 62,7$ kJ/kg. Assim,

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} = \frac{2465,1 - 188,45}{62,7} = 36,3$$

(b) Para um volume de controle englobando apenas o lado vapor do condensador, inicie com a formulação em regime permanente do balanço da taxa de energia, Eq. 4.20a.

2

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_1 \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

Os termos sublinhados se anulam pelas hipóteses 2 e 3. A seguinte expressão corresponde à taxa de transferência de energia entre o vapor que se condensa e a água de resfriamento:

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1)$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar os balanços das taxas de massa e energia para regime permanente a um volume de controle.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades da água.

Dividindo pela vazão mássica do vapor, \dot{m}_1 , e inserindo valores

$$\frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}_1} = h_2 - h_1 = 188,45 - 2465,1 = -2276,7 \text{ kJ/kg}$$

em que o sinal negativo mostra que a energia é transferida *do* vapor que se condensa *para* a água de resfriamento.

- 1 Alternativamente, $(h_4 - h_3)$ pode ser avaliado usando o modelo de líquido incompressível através da Eq. 3.20b.
- 2 Dependendo da localização da fronteira do volume de controle, duas formulações distintas da equação da energia são obtidas. Na parte (a), ambos os fluxos encontram-se incluídos no volume de controle. A transferência de energia entre eles ocorre internamente e não ao longo da fronteira do volume de controle, assim o termo \dot{Q} se anula na equação do balanço de energia. No entanto, com o volume de controle da parte (b) o termo \dot{Q} deve ser incluído.

Teste-Relâmpago

Considerando que a vazão mássica do vapor que se condensa é 125 kg/s, determine a vazão mássica da água de resfriamento em kg/s. **Resposta:** 4538 kg/s.

Evita-se a ocorrência de temperaturas altas em componentes eletrônicos fornecendo-se um resfriamento adequado. No próximo exemplo é analisado o resfriamento de componentes de computador, ilustrando o uso da formulação do balanço de energia para volume de controle juntamente com os dados das propriedades do ar.

▶ ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 4.8 ▶

Resfriando Componentes de Computadores

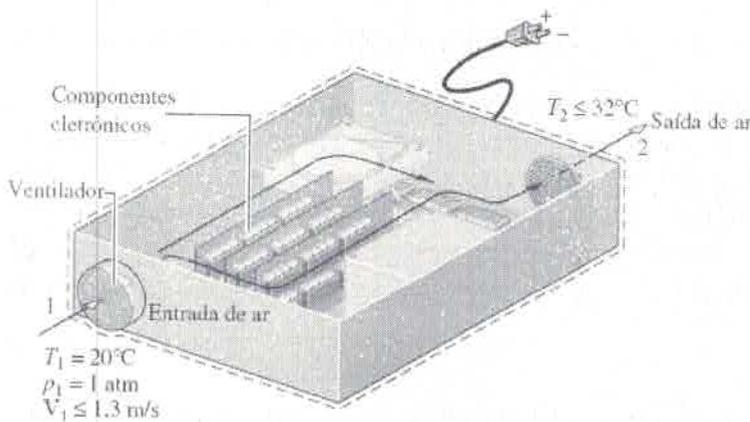
Os componentes eletrônicos de um computador são resfriados pelo escoamento de ar através de um ventilador montado na entrada do gabinete. Em regime permanente, o ar entra a 20°C e 1 atm. Para o controle de ruídos, a velocidade do ar que entra não pode ser superior a 1,3 m/s. Para um controle de temperatura, a temperatura do ar na saída não pode ser superior a 32°C. Os componentes eletrônicos e o ventilador são alimentados com uma potência de 80 W e 18 W, respectivamente. Determine a menor área de entrada para o ventilador, em cm², para a qual os limites de velocidade de entrada do ar e temperatura de saída são atingidos.

SOLUÇÃO

Dado: os componentes eletrônicos de um computador são resfriados pelo escoamento de ar através de um ventilador montado na entrada do gabinete. As condições para o ar na entrada e na saída são especificadas. A potência necessária para os componentes eletrônicos e para o ventilador também é especificada.

Pede-se: determine a menor área para o ventilador para a qual os limites especificados são atingidos.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle mostrado na figura correspondente encontra-se em regime permanente.
2. A transferência de calor da superfície externa do gabinete para a vizinhança é desprezível. Assim, $\dot{Q}_{vc} = 0$.
3. As variações das energias cinética e potencial podem ser ignoradas.
4. O ar é considerado como um gás ideal, com $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

Fig. E4.8

Análise: a área de entrada A_1 pode ser determinada pela vazão mássica e pela Eq.4.4b, que pode ser rearrumada para fornecer

$$A_1 = \frac{\dot{m}v_1}{V_1} \tag{a}$$

Por sua vez, a vazão mássica pode ser avaliada pelo balanço da taxa de energia em regime permanente, Eq. 4.20a.

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) + g(z_1 - z_2) \right]$$

Os termos sublinhados se anulam pelas hipóteses 2 e 3, fornecendo

$$0 = -\dot{W}_{vc} + \dot{m}(h_1 - h_2)$$

em que \dot{W}_{vc} leva em conta a potência *total* fornecida aos componentes eletrônicos e ao ventilador: $\dot{W}_{vc} = (-80 \text{ W}) +$

$(-18 \text{ W}) = -98 \text{ W}$. Resolvendo para \dot{m} e usando a hipótese 4 com a Eq. 3.51 para avaliar $(h_1 - h_2)$

$$\dot{m} = \frac{(-\dot{W}_{ve})}{c_p(T_2 - T_1)}$$

Introduzindo esta relação na expressão para A_1 , Eq. (a), e usando o modelo de gás ideal para avaliar o volume específico v_1

$$A_1 = \frac{1}{V_1} \left[\frac{(-\dot{W}_{ve})}{c_p(T_2 - T_1)} \right] \left(\frac{RT_1}{p_1} \right)$$

Dessa expressão podemos perceber que A_1 aumenta quando V_1 e/ou T_2 decresce. Conseqüentemente, já que $V_1 \leq 1,3 \text{ m/s}$ e $T_2 \leq 305 \text{ K}$ (32°C), a área de entrada deve satisfazer

$$A_1 \geq \frac{1}{1,3 \text{ m/s}} \left[\frac{98 \text{ W}}{\left(1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (305 - 293) \text{ K}} \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ J}} \right| \left| \frac{1 \text{ J/s}}{1 \text{ W}} \right| \right] \left(\frac{\left(\frac{8314 \text{ N} \cdot \text{m}}{28,97 \text{ kg} \cdot \text{K}} \right) 293 \text{ K}}{1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2} \right) \left| \frac{10^4 \text{ cm}^2}{1 \text{ m}^2} \right|$$
$$\geq 52 \text{ cm}^2$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar o balanço da taxa de energia para regime permanente a um volume de controle.
- aplicar a expressão da vazão mássica, Eq. 4.4b.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades do ar modelado como um gás ideal.

Para as condições especificadas, a menor área do ventilador é 52 cm^2 .

1 Normalmente o ar de resfriamento entra e sai do gabinete em velocidades baixas, e assim os efeitos da energia cinética são insignificantes.

2 A aplicabilidade do modelo de gás ideal pode ser verificada através do diagrama de compressibilidade generalizada. Já que a temperatura do gás aumenta em menos de 12°C , o calor específico c_p é aproximadamente constante (Tabela A-20).

Teste-Relâmpago

Considerando que a transferência de calor ocorre a uma taxa de 11 W da superfície externa do computador para a vizinhança, determine a menor área de entrada para o ventilador para a qual os limites de velocidade de entrada do ar e temperatura de saída são atingidos se a potência de entrada permanecer a 98 W . **Resposta:** 46 cm^2 .

4.10 Dispositivos de Estrangulamento

Uma redução apreciável de pressão pode ser obtida pela simples introdução de uma restrição na linha pela qual um gás ou líquido escoam. Isso é rotineiramente realizado através de uma válvula parcialmente aberta ou por um tampão poroso. Esses dispositivos de *estrangulamento* estão ilustrados na Fig. 4.15.

calorímetro de estrangulamento

Uma aplicação do processo de estrangulamento ocorre em sistemas de refrigeração por compressão de vapor, em que uma válvula é utilizada para reduzir a pressão do refrigerante do seu valor na saída do *condensador* à pressão mais baixa existente no *evaporador*. Consideraremos melhor esse processo no Cap. 10. O processo de estrangulamento também tem um papel na expansão de *Joule-Thomson* estudada no Cap. 11. Uma outra aplicação do processo de estrangulamento envolve o calorímetro de estrangulamento, que é um dispositivo para a determinação do título de uma mistura bifásica líquido-vapor. O calorímetro de estrangulamento será estudado no Exemplo 4.9.

4.10.1 Considerações sobre a Modelagem de Dispositivos de Estrangulamento

Para um volume de controle englobando um dispositivo de estrangulamento, o único trabalho é o de escoamento nos locais onde a massa entra e sai do volume de controle; assim, o termo \dot{W}_{vc} desaparece da equação da energia. De um modo geral, não existe nenhuma troca de calor significativa com a vizinhança, e a variação da energia potencial entre a entrada e a saída é desprezível. Assim, os termos sublinhados na Eq. 4.20a (repetida a seguir) desaparecem, ficando então os termos relacionados à entalpia e à energia cinética, como mostra a Eq. (a). Isto é,

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right] \quad (a)$$

$$0 = (h_1 - h_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

disp_de_estrangulamento

A.23 – Abas a, b e c



Embora as velocidades possam ser relativamente altas nas imediações da restrição imposta pelo dispositivo de estrangulamento sobre o fluxo, medições realizadas a montante e a jusante da área de redução do escoamento mostram que em muitas situações as variações da energia cinética específica da substância em escoamento entre esses locais podem ser desprezadas. Com essa simplificação adicional, a Eq. (a) reduz-se a

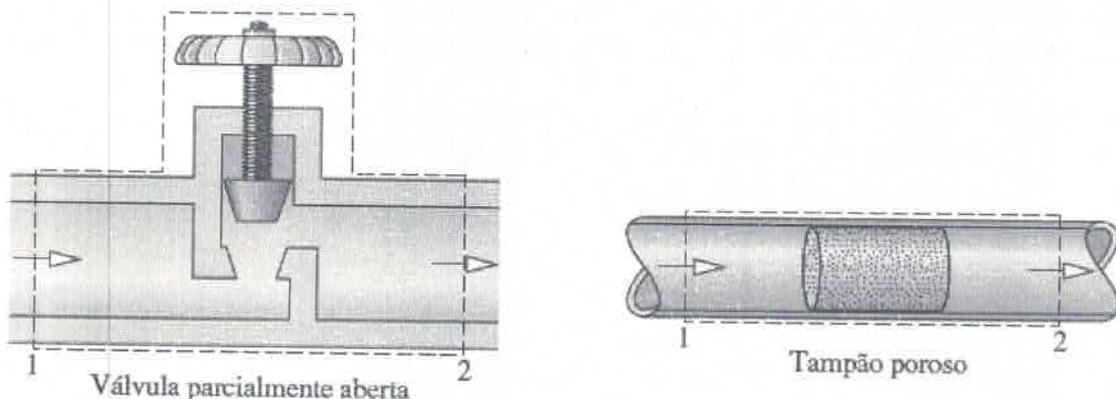


Fig. 4.15 Exemplos de dispositivos de estrangulamento.

$$h_2 = h_1 \quad (p_2 < p_1) \quad (4.22)$$

processo de estrangulamento

Quando o escoamento através de uma válvula ou em outra restrição é idealizado dessa maneira, o processo é chamado de processo de estrangulamento.

4.10.2 Usando um Calorímetro de Estrangulamento para Determinar o Título

O exemplo a seguir ilustra o uso do calorímetro de estrangulamento para determinar o título do vapor d'água.

▶ ▶ ▶ EXEMPLO 4.9 ▶

Medindo o Título de Vapor

Uma linha de alimentação carrega vapor d'água em uma mistura bifásica líquido-vapor a 300 lbf/in^2 (2,1 MPa). Uma pequena fração do escoamento na linha é desviada para um calorímetro de estrangulamento e descarregada para a atmosfera a $14,7 \text{ lbf/in}^2$ (101,3 kPa). A temperatura do vapor de exaustão é medida como sendo 250°F ($121,1^\circ\text{C}$). Determine o título do vapor d'água na linha de alimentação.

SOLUÇÃO

Dado: o vapor d'água é desviado de uma linha de alimentação para um calorímetro de estrangulamento e descarregado para a atmosfera.

Pede-se: determine o título do vapor na linha de alimentação.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

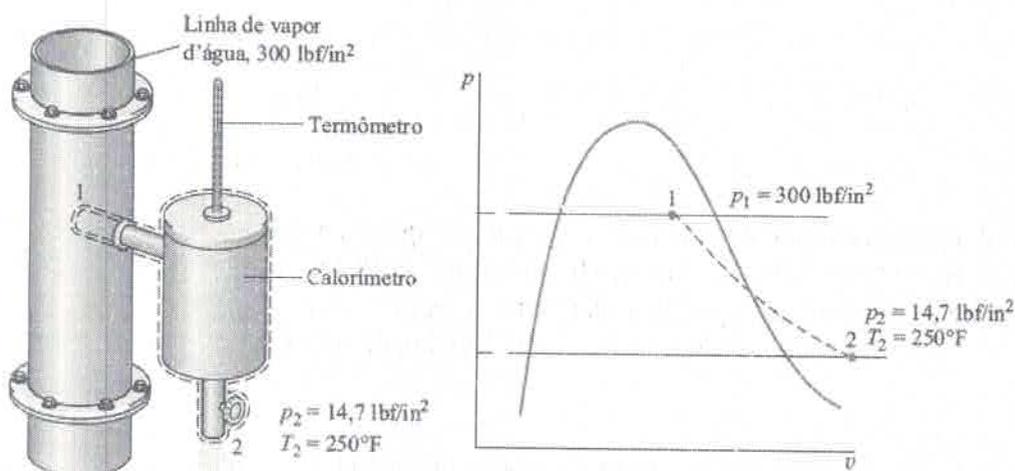


Fig. E4.9

Análise: para um processo de estrangulamento os balanços de massa e de energia se reduzem para fornecer $h_2 = h_1$, o que está de acordo com a Eq. 4.22. Então, com o estado 2 determinado, a entalpia específica na linha de alimentação é conhecida e o estado 1 é determinado pelos valores conhecidos de p_1 e h_1 .

1 Conforme mostrado no diagrama p - v , o estado 1 encontra-se na região bifásica líquido-vapor e o estado 2

Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle ilustrado na figura correspondente encontra-se em regime permanente.
2. O vapor desviado sofre um processo de estrangulamento.

encontra-se na região de vapor superaquecido. Assim,

$$h_2 = h_1 = h_{f1} + x_1(h_{g1} - h_{f1})$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar a Eq. 4.22 a um processo de estrangulamento.

obter dados de propriedades da água.

Resolvendo para x_1 ,

$$x_1 = \frac{h_2 - h_{f1}}{h_{g1} - h_{f1}}$$

Da Tabela A-3E para 300 lbf/in², $h_{f1} = 394,1$ Btu/lb e $h_{g1} = 1203,9$ Btu/lb. Da Tabela A-4E para 14,7 lbf/in² e 250°F, $h_2 = 1168,8$ Btu/lb. Inserindo esses valores na expressão anterior, o título do vapor na linha é $x_1 = 0,957$ (95,7%).

① Para os calorímetros de estrangulamento que descarregam na atmosfera, o título de vapor na linha deve ser maior do que 94% para garantir que o vapor que abandona o calorímetro seja superaquecido.

Teste-Relâmpago

Considerando que a linha de alimentação carrega vapor saturado a 300 lbf/in², determine a temperatura na saída do calorímetro em °F para a mesma pressão de saída, 14,7 lbf/in². **Resposta:** 324°F.

4.11 Integração de Sistemas

integração de sistemas

Até agora estudamos vários tipos de componentes que foram selecionados dentre aqueles frequentemente vistos na prática. Em geral, esses componentes são encontrados combinados, e não isolados. Muitas vezes, os engenheiros devem combinar os componentes de um modo criativo para atingirem um objetivo global que se encontra sujeito a restrições, como custo geral mínimo. Esta importante atividade de engenharia é chamada de integração de sistemas.

Na prática de engenharia e no cotidiano os sistemas integrados são regularmente encontrados. Muitos leitores já devem estar familiarizados com um tipo de integração de sistemas já consagrado: a instalação de potência básica mostrada na Fig. 4.16. Esse sistema consiste em quatro componentes em série: a turbina acoplada a um gerador, o condensador, a bomba e a caldeira. Consideraremos essas instalações de potência em detalhes nas seções subsequentes deste livro.

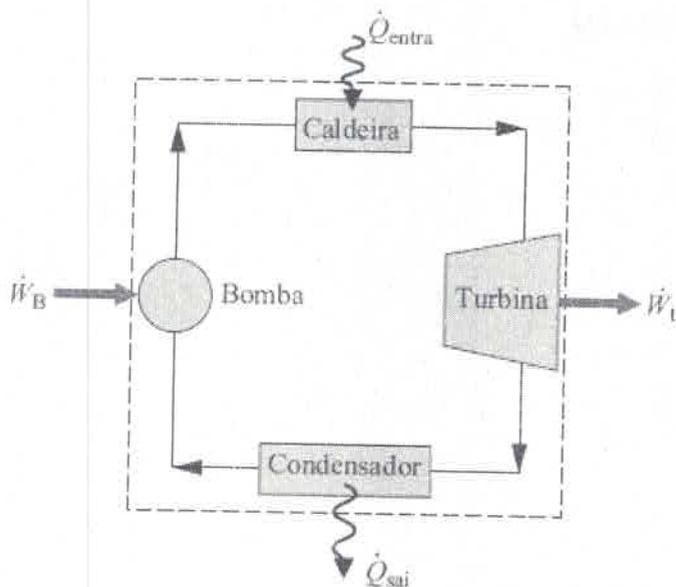


Fig. 4.16 Instalação de potência a vapor simples.



BIOCONEXÕES

Organismos vivos também podem ser considerados sistemas integrados. A Fig. 4.17 apresenta um volume de controle englobando uma árvore que recebe radiação solar. Conforme indicado na figura, uma porção da radiação incidente é refletida para a vizinhança. Vinte e um por cento da energia solar líquida recebida pela árvore retorna para a vizinhança por transferência de calor, basicamente por convecção. O gerenciamento da água é responsável pela maior parte da contribuição solar remanescente.

Árvores *suam* como as pessoas; isso é chamado *evapotranspiração*. Conforme ilustrado na Fig. 4.17, 78% da energia solar líquida recebida pela árvore são usados para bombear água líquida da vizinhança, primariamente do solo, convertê-la em vapor e descarregá-la para a vizinhança através de minúsculos poros (chamados *estômatos*) nas folhas. Quase toda a água absorvida é perdida dessa maneira, e apenas uma pequena fração é usada no interior da árvore. Aplicando um balanço de energia ao volume de controle que engloba a árvore, apenas 1% da energia solar líquida recebida pela árvore é deixado para o uso na produção de biomassa (madeira e folhas). A evapotranspiração beneficia as árvores, mas também contribui significativamente para a perda de água das bacias hidrográficas, mostrando que na natureza, como na engenharia, ocorrem processos de *troca*.

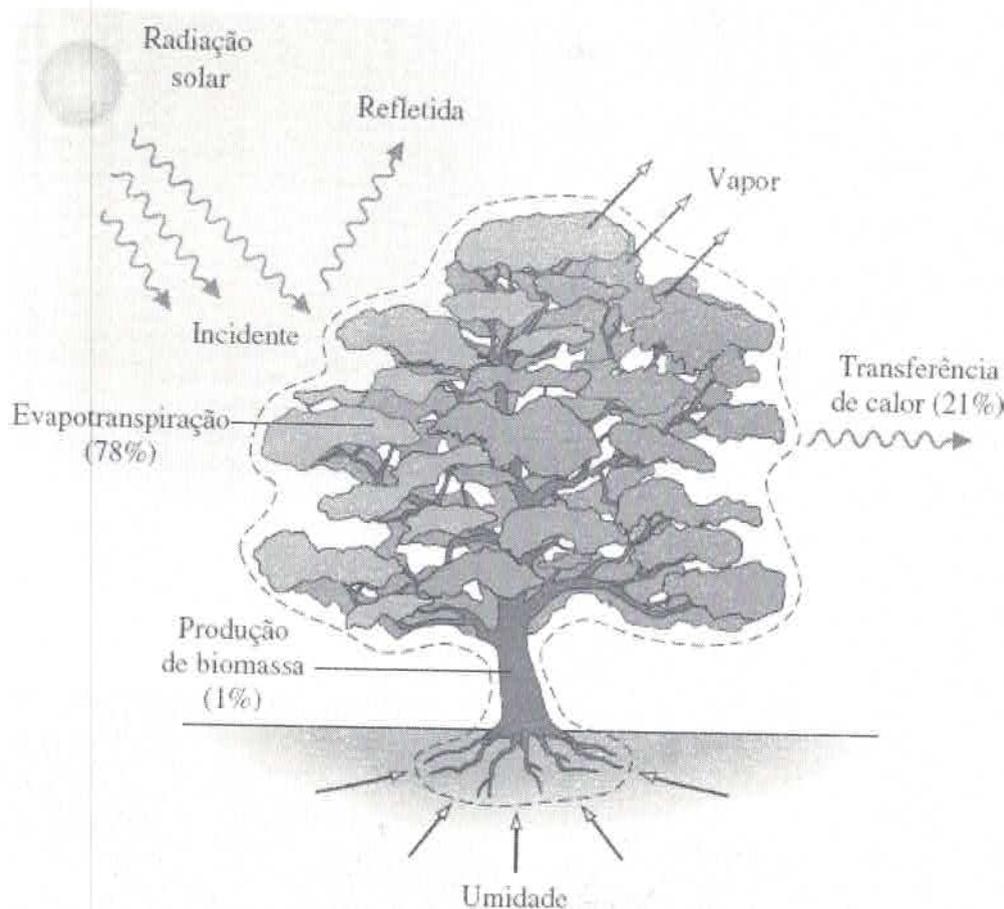


Fig. 4.17 Volume de controle englobando uma árvore.

O Exemplo 4.10 a seguir fornece uma outra ilustração de um sistema integrado. Esse caso envolve um sistema de recuperação de calor perdido.

▶▶▶ EXEMPLO 4.10 ▶

Avaliando o Desempenho de um Sistema de Recuperação de Calor Perdido

Um processo industrial descarrega $2 \times 10^5 \text{ ft}^3/\text{min}$ ($94,4 \text{ m}^3/\text{s}$) de produtos de combustão gasosos a 400°F ($204,4^\circ\text{C}$) e 1 atm. Conforme ilustrado na Fig. E4.10, propõe-se um sistema que combina um gerador de vapor junto com uma turbina para a recuperação do calor dos produtos de combustão. Em regime permanente, os produtos de combustão saem do gerador de vapor a 260°F ($126,7^\circ\text{C}$) e 1 atm, e um fluxo de água distinto entra a $40 \text{ lbf}/\text{in}^2$ ($275,8 \text{ kPa}$) e 102°F ($38,9^\circ\text{C}$), com uma vazão mássica de $275 \text{ lb}/\text{min}$ ($2,1 \text{ kg}/\text{s}$). Na saída da turbina, a pressão é $1 \text{ lbf}/\text{in}^2$ ($6,9 \text{ kPa}$) e o título é 93%. A transferência de calor das superfícies externas do gerador de vapor e da turbina pode ser ignorada junto com as variações das energias cinética e potencial das correntes em escoamento. Não existe uma perda de carga significativa da água que escoar no gerador de vapor. Os produtos de combustão podem ser modelados como ar em comportamento de gás ideal.

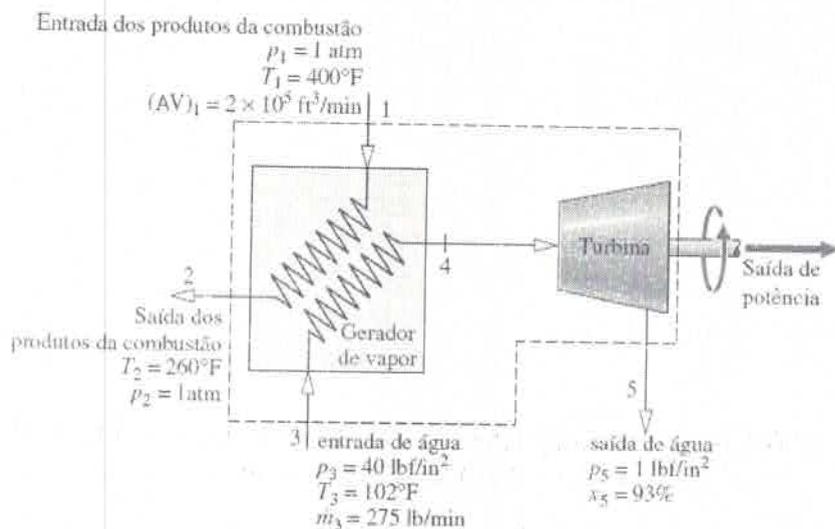
- Determine a potência desenvolvida pela turbina em Btu/min.
- Determine a temperatura de entrada na turbina em °F.
- Determine o ganho, em \$/ano, para uma operação anual de 8000 horas, tomando como base um custo típico de eletricidade da ordem de \$0,115 por kW · h.

SOLUÇÃO

Dado: informações sobre a operação em regime permanente são fornecidas para um sistema que consiste em um gerador de vapor que recupera calor e uma turbina.

Pede-se: a potência desenvolvida pela turbina e a temperatura de entrada. Avalie o ganho anual da potência desenvolvida.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle mostrado na figura correspondente encontra-se em regime permanente.
2. A transferência de calor é desprezível, e as variações das energias cinética e potencial podem ser ignoradas.
3. Não existe perda de carga para a água que escoou no gerador de vapor.
4. Os produtos da combustão podem ser modelados como ar na situação de gás ideal.

Fig. E4.10

Análise:

(a) A potência desenvolvida pela turbina é determinada por um volume de controle englobando simultaneamente o gerador de vapor e a turbina. Já que as correntes de gás e água não se misturam, os balanços das taxas de massa para cada uma dessas correntes se reduzem, respectivamente, a

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2, \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_5$$

Para esse volume de controle, a formulação apropriada para o balanço de energia considerando regime permanente é dada pela Eq. 4.18, que fornece

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}_1 \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{m}_3 \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right) - \dot{m}_2 \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{m}_5 \left(h_5 + \frac{V_5^2}{2} + gz_5 \right)$$

Os termos sublinhados se anulam pela hipótese 2. Com essas simplificações, juntamente com as relações das vazões mássicas citadas, o balanço da taxa de energia torna-se

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_3 - h_5)$$

O fluxo de massa \dot{m}_1 pode ser avaliado com os dados fornecidos na entrada 1 e a equação de estado de gás ideal

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \frac{(AV)_1}{v_1} = \frac{(AV)_1 p_1}{(R/M)T_1} = \frac{(2 \times 10^5 \text{ ft}^3/\text{min})(14,7 \text{ lbf/in}^2) \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right|}{\left(\frac{1545 \text{ ft} \cdot \text{lbf}}{28,97 \text{ lb} \cdot \text{°R}} \right) (860 \text{ °R})} \\ &= 9230,6 \text{ lb/min} \end{aligned}$$

As entalpias específicas h_1 e h_2 podem ser determinadas da Tabela A-22E: para 860 °R , $h_1 = 206,46 \text{ Btu/lb}$ e para 720 °R , $h_2 = 172,39 \text{ Btu/lb}$. No estado 3 tem-se água líquida. Usando a Eq. 3.14 e os dados de líquido saturado da Tabela A-2E, $h_3 \approx h_f(T_3) = 70 \text{ Btu/lb}$. O estado 5 é uma mistura bifásica líquido-vapor. Com os dados da Tabela A-3E e o título fornecido

$$\begin{aligned} h_5 &= h_{f5} + x_5(h_{g5} - h_{f5}) \\ &= 69,74 + 0,93(1036,0) = 1033,2 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

Substituindo os valores na expressão para \dot{W}_{vc}

$$\begin{aligned} \dot{W}_{vc} &= \left(9230,6 \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right) (206,46 - 172,39) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &\quad + \left(275 \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right) (70 - 1033,2) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &= 49610 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \end{aligned}$$

(b) Para a determinação de T_4 , é necessário fixar um estado em 4. Isto requer o valor de duas propriedades independentes. Com a hipótese 3, uma dessas propriedades é a pressão, $p_4 = 40 \text{ lbf/in}^2$. A outra é a entalpia específica h_4 , que pode ser determinada a partir de um balanço de energia para um volume de controle que engloba apenas o gerador de vapor. Os balanços de massa para cada uma das correntes fornecem $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ e $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$. Com a hipótese 2 e essas relações para as vazões mássicas, a formulação em regime permanente para o balanço de energia reduz-se a

$$0 = \dot{m}_1(h_1 - h_2) + \dot{m}_3(h_3 - h_4)$$

Resolvendo para h_4

$$\begin{aligned} h_4 &= h_3 + \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3}(h_1 - h_2) \\ &= 70 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + \left(\frac{9230,6 \text{ lb/min}}{275 \text{ lb/min}} \right) (206,46 - 172,39) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &= 1213,6 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \end{aligned}$$

Interpolando na Tabela A-4E para $p_4 = 40 \text{ lbf/in}^2$ com o valor de h_4 , tem-se $T_4 = 354 \text{ °F}$.

(c) Usando o resultado da parte (a), juntamente com os dados de economia fornecidos e com os fatores de conversão apropriados, o ganho para 8000 horas de operação anual é

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar os balanços das taxas de massa e energia para regime permanente a um volume de controle.
- aplicar a expressão da vazão mássica, Eq. 4.4b.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades da água e do ar modelado como um gás ideal.
- conduzir uma análise econômica elementar.

$$\begin{aligned} \text{valor anual} &= \left(49610 \frac{\text{Btu}}{\text{min}} \left| \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right| \left| \frac{1 \text{ kW}}{3413 \text{ Btu/h}} \right| \right) \left(8000 \frac{\text{h}}{\text{ano}} \right) \left(0,115 \frac{\$}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) \\ &= 802.000 \frac{\$}{\text{ano}} \end{aligned}$$

- 1 Alternativamente, a determinação de h_4 também pode ser realizada por um volume de controle englobando apenas a turbina.
- 2 A decisão sobre a implementação dessa solução para o problema de se utilizar os gases quentes de combustão oriundos de um processo industrial deve necessariamente levar em conta uma avaliação econômica mais detalhada, incluindo os custos de aquisição e de operação do gerador de vapor, da turbina e dos equipamentos auxiliares.

Teste-Relâmpago

Admitindo que o volume de controle envolve apenas a turbina, determine a temperatura de entrada da turbina em °F.
Resposta: 354°F.

4.12 Análise Transiente

transiente

Muitos dispositivos passam por períodos de operação transiente, nos quais o estado varia com o tempo. Nos exemplos estão incluídos o acionamento ou desligamento de turbinas, compressores e motores. Conforme considerado no Exemplo 4.2 e na discussão da Fig. 1.5, reservatórios em enchimento ou em descarga constituem-se em exemplos adicionais.



Tipos_de_Sistemas
A.1 – Aba d

A hipótese de regime permanente não se aplica à análise desses casos, já que os valores das propriedades, as taxas de

transferência de calor e de trabalho e vazões mássicas podem variar com o tempo durante as operações transientes. Um cuidado adicional deve ser tomado ao se aplicarem os balanços de massa e de energia, conforme discutido a seguir.

4.12.1 Balanço de Massa na Análise Transiente

Primeiramente, escreveremos o balanço de massa para um volume de controle em uma forma adequada para uma análise transiente. Começamos com a integração do balanço da taxa de massa, Eq. 4.2, de um tempo 0 até um tempo final t . Ou seja

$$\int_0^t \left(\frac{dm_{vc}}{dt} \right) dt = \int_0^t \left(\sum_i \dot{m}_i \right) dt - \int_0^t \left(\sum_e \dot{m}_e \right) dt$$

A equação anterior toma a forma

$$m_{vc}(t) - m_{vc}(0) = \sum_i \left(\int_0^t \dot{m}_i dt \right) - \sum_e \left(\int_0^t \dot{m}_e dt \right)$$

Introduzindo os seguintes símbolos para os termos sublinhados

$$m_e = \int_0^t \dot{m}_e dt \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{quantidade de massa} \\ \text{entrando no volume de} \\ \text{controle através da entrada } e, \\ \text{do tempo 0 até } t \end{array} \right.$$

$$m_s = \int_0^t \dot{m}_s dt \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{quantidade de massa saindo} \\ \text{do volume de controle} \\ \text{através da entrada } s, \\ \text{do tempo 0 até } t \end{array} \right.$$

o balanço de massa torna-se

$$m_{vc}(t) - m_{vc}(0) = \sum_e m_e - \sum_s m_s \quad (4.23)$$

A Eq. 4.23 enuncia que a variação na quantidade de massa contida no volume de controle é igual à diferença entre as quantidades totais de massa que entram e saem.

4.12.2 Balanço de Energia na Análise Transiente

Em seguida integraremos o balanço de energia, Eq. 4.15, desprezando os efeitos das energias cinética e potencial. O resultado é

$$U_{vc}(t) - U_{vc}(0) = Q_{vc} - W_{vc} + \sum_e \left(\int_0^t \dot{m}_e h_e dt \right) - \sum_s \left(\int_0^t \dot{m}_s h_s dt \right) \quad (4.24)$$

em que Q_{vc} leva em conta a quantidade líquida de energia transferida por calor no volume de controle e W_{vc} leva em conta a quantidade líquida transferida por trabalho, executando-se o trabalho de escoamento. As integrais sublinhadas da Eq. 4.24 levam em conta a energia transportada nas entradas e nas saídas.

Para o *caso especial* em que os estados nas entradas e nas saídas são *constantes com o tempo*, as entalpias específicas h_e e h_s seriam constantes e os termos sublinhados da Eq. 4.24 se tornariam

$$\int_0^t \dot{m}_e h_e dt = h_e \int_0^t \dot{m}_e dt = h_e m_e$$

$$\int_0^t \dot{m}_s h_s dt = h_s \int_0^t \dot{m}_s dt = h_s m_s$$

Então, a Eq. 4.24 toma a seguinte forma *especial*

$$U_{vc}(t) - U_{vc}(0) = Q_{vc} - W_{vc} + \sum_e m_e h_e - \sum_s m_s h_s \quad (4.25)$$

em que m_e e m_s representam, respectivamente, a *quantidade* de massa que entra no volume de controle através da entrada e e através da saída s , ambas do tempo 0 até t .

Quer em sua forma geral, Eq. 4.24, quer na sua formulação específica, Eq. 4.25, essas equações levam em conta a variação na quantidade de energia contida no interior do volume de controle como a diferença entre as quantidades totais de entrada e de saída de energia.

Outra *formulação especial* surge quando as propriedades intensivas no interior do volume de controle são *uniformes com relação à posição* em um determinado tempo t . Consequentemente, o volume específico e a energia interna específica são uniformes no todo e podem apenas depender do tempo, ou seja, $v(t)$ e $u(t)$, respectivamente. Assim,

$$m_{vc}(t) = V_{vc}(t)/v(t) \quad (4.26)$$

$$U_{vc}(t) = m_{vc}(t)u(t) \quad (4.27)$$

Se o volume de controle for composto por várias fases em um tempo t , supõe-se que o estado de cada fase seja uniforme em todo o volume de controle.

As Eqs. 4.23 e 4.25-4.27 são aplicáveis a uma vasta gama de casos transientes nos quais os estados de entrada e saída são constantes com o tempo e as propriedades intensivas no interior do volume de controle são uniformes com as posições inicial e final.

► **POR EXEMPLO** nos casos que envolvem o enchimento de recipientes com uma única entrada e uma única saída, as Eqs. 4.23, 4.25 e 4.27 combinadas fornecem

$$m_{vc}(t)u(t) - m_{vc}(0)u(0) = Q_{vc} - W_{vc} + h_i(m_{vc}(t) - m_{vc}(0)) \quad (4.28)$$

Os detalhes são deixados como exercício. Veja os Exemplos 4.12 e 4.13 para este tipo de aplicação transiente.

4.12.3 Aplicações da Análise Transiente

Os seguintes exemplos apresentam a análise transiente de volumes de controle usando os princípios de conservação de massa e de energia. Para cada caso considerado, para enfatizar os fundamentos, começamos com as formulações gerais dos balanços de massa e de energia que são reduzidas, quando necessário, para formas adequadas para o caso em estudo através de idealizações discutidas nesta seção.

O primeiro exemplo considera um reservatório que se esvazia parcialmente à medida que a massa escoava através de uma válvula.

▶▶▶ EXEMPLO 4.11 ▶

Avaliando a Transferência de Calor de um Tanque Parcialmente Vazio

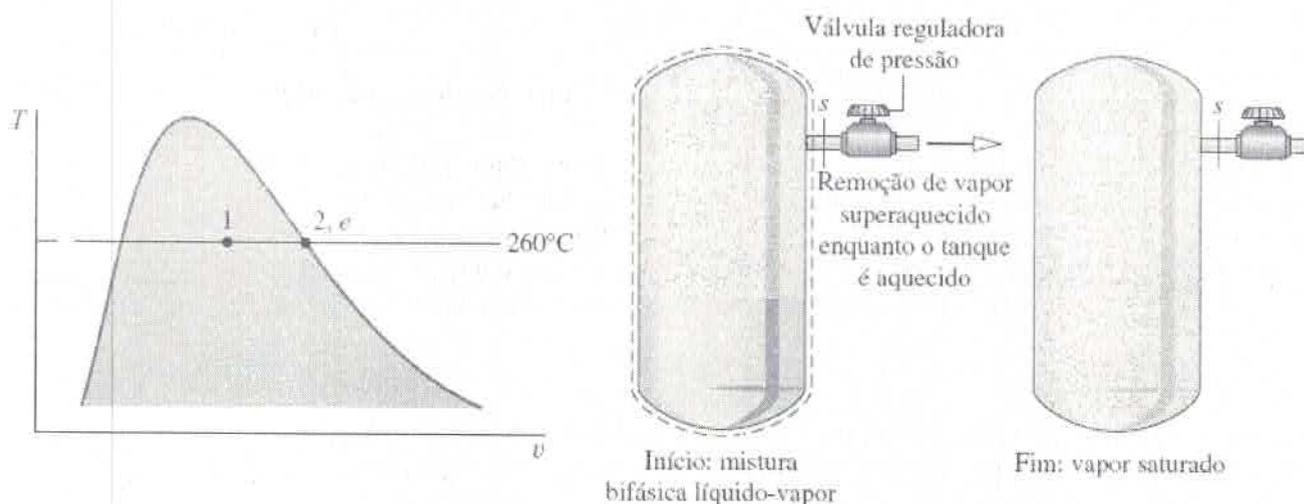
Um tanque, com $0,85 \text{ m}^3$ de volume, inicialmente contém água em uma mistura bifásica líquido-vapor a 260°C e com um título de $0,7$. O vapor d'água saturado a 260°C é lentamente retirado através de uma válvula reguladora de pressão no topo do tanque à medida que a energia é transferida por meio de calor para manter a pressão constante no tanque. Esse processo continua até que o tanque esteja cheio de vapor saturado a 260°C . Determine a quantidade de calor transferida em kJ. Despreze todos os efeitos das energias cinética e potencial.

SOLUÇÃO

Dado: um tanque inicialmente com uma mistura bifásica líquido-vapor é aquecido enquanto o vapor d'água saturado é lentamente removido. Esse processo se dá a pressão constante até que o tanque esteja cheio somente de vapor saturado.

Pede-se: a quantidade de calor transferido.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle é definido pela linha pontilhada no diagrama.
2. Para o volume de controle, $\dot{W}_{vc} = 0$, e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser abandonados.
3. O estado permanece constante na saída.
4. Os estados inicial e final da massa no interior do reservatório são estados de equilíbrio.

Fig. E4.11

Análise: como existe apenas uma saída e nenhuma entrada, o balanço da taxa de massa (Eq. 4.2) toma a seguinte

forma:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = -\dot{m}_s$$

Pela hipótese 2, o balanço da taxa de energia (Eq. 4.15) reduz-se a

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{m}_s h_s$$

Combinando os balanços de massa e de energia, tem-se

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} + h_s \frac{dm_{vc}}{dt}$$

Pela hipótese 3, a entalpia específica na saída é constante. Assim sendo, a integração da última equação fornece

$$\Delta U_{vc} = Q_{vc} + h_s \Delta m_{vc}$$

Resolvendo para o calor transferido \dot{Q}_{vc}

$$Q_{vc} = \Delta U_{vc} - h_s \Delta m_{vc}$$

ou

2

$$Q_{vc} = (m_2 u_2 - m_1 u_1) - h_s (m_2 - m_1)$$

em que m_1 e m_2 denotam, respectivamente, as quantidades inicial e final de massa no tanque.

Os termos u_1 e m_1 da equação anterior podem ser avaliados como valores de propriedades para 260°C e com o valor do título fornecido pela Tabela A-2. Assim,

$$\begin{aligned} u_1 &= u_f + x_1(u_g - u_f) \\ &= 1128,4 + (0,7)(2599,0 - 1128,4) = 2157,8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Além disso,

$$\begin{aligned} v_1 &= v_f + x_1(v_g - v_f) \\ &= 1,2755 \times 10^{-3} + (0,7)(0,04221 - 1,2755 \times 10^{-3}) = 29,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

Usando o volume específico v_1 , a massa inicialmente contida no tanque é

$$m_1 = \frac{V}{v_1} = \frac{0,85 \text{ m}^3}{(29,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})} = 28,4 \text{ kg}$$

O estado final da massa no tanque é vapor saturado a 260°C, assim a Tabela A-2 fornece

$$u_2 = u_g(260^\circ\text{C}) = 2599,0 \text{ kJ/kg}, v_2 = v_g(260^\circ\text{C}) = 42,21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

A massa contida no interior do tanque ao final do processo é

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{0,85 \text{ m}^3}{(42,21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})} = 20,14 \text{ kg}$$

A Tabela A-2 também fornece $h_s = h_g(260^\circ\text{C}) = 2796,6 \text{ kJ/kg}$.

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar os balanços das taxas de massa e energia para regime transiente a um volume de controle.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades da água.

Substituindo os valores na expressão para o calor transferido, tem-se

$$\begin{aligned} Q_{vc} &= (20,14)(2599,0) - (28,4)(2157,8) - 2796,6(20,14 - 28,4) \\ &= 14.162 \text{ kJ} \end{aligned}$$

- 1 Neste caso são feitas idealizações sobre o estado do vapor na saída e sobre os estados inicial e final da massa contida no interior do tanque.
- 2 Essa expressão para Q_{vc} poderia ser obtida aplicando-se as Eqs. 4.23, 4.25 e 4.27. Os detalhes são deixados como exercício.

Teste-Relâmpago

Admitindo que o título inicial é de 90%, determine a transferência de calor em kJ, mantendo todos os outros dados inalterados. **Resposta:** 3707 kJ.

Nos próximos dois exemplos serão considerados casos em que os tanques se encontram em enchimento. No Exemplo 4.12, um tanque inicialmente evacuado é alimentado com vapor d'água à medida que se desenvolve potência. No Exemplo 4.13, um compressor é utilizado para armazenar ar em um tanque.

▶ ▶ ▶ EXEMPLO 4.12 ▶

Usando Vapor para a Geração Emergencial de Potência

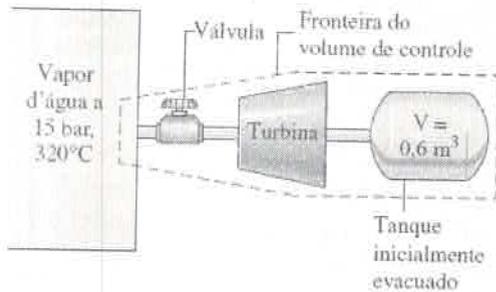
Um grande reservatório contém vapor d'água a uma pressão de 15 bar e temperatura de 320°C . Uma turbina encontra-se conectada a esse reservatório através de uma válvula e, em sequência, encontra-se um tanque inicialmente evacuado com um volume de $0,6 \text{ m}^3$. Quando uma potência de emergência é necessária a válvula se abre e o vapor d'água preenche o tanque até que a pressão seja de 15 bar. A temperatura no tanque é então de 400°C . O processo de enchimento se dá de uma forma adiabática, e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine a quantidade de trabalho desenvolvida pela turbina, em kJ.

SOLUÇÃO

Dado: o vapor d'água contido em um grande reservatório em um estado conhecido escoou para um pequeno tanque de volume conhecido através de uma turbina, até que uma condição final especificada seja atingida no tanque.

Pede-se: determine o trabalho desenvolvido pela turbina.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle é definido pela linha tracejada no diagrama.
2. Para o volume de controle, $\dot{Q}_{vc} = 0$, e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.
3. O estado do vapor no interior do reservatório grande permanece constante. O estado final do vapor no tanque menor é um estado de equilíbrio.
4. A quantidade de massa armazenada no interior da turbina e na tubulação ao final do processo de enchimento é desprezível.

Fig. E4.12

Análise: como o volume de controle tem uma única entrada e nenhuma saída, o balanço da taxa de massa (Eq. 4.2) simplifica-se para

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e$$

Pela hipótese 2, o balanço da taxa de energia, dado pela Eq. 4.15, se reduz a

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = -\dot{W}_{vc} + \dot{m}_e h_e$$

Combinando os balanços de massa e de energia, encontra-se

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = -\dot{W}_{vc} + h_e \frac{dm_{vc}}{dt}$$

Integrando

$$\Delta U_{vc} = -W_{vc} + h_e \Delta m_{vc}$$

De acordo com a hipótese 3, a entalpia específica do vapor que entra no volume de controle é constante para o valor correspondente ao estado no reservatório maior.

Resolvendo para W_{vc}

$$W_{vc} = h_e \Delta m_{vc} - \Delta U_{vc}$$

ΔU_{vc} e Δm_{vc} significam, respectivamente, as variações na energia interna e na massa do volume de controle. Com a hipótese 4, esses termos podem ser identificados apenas no tanque menor.

Como o tanque se encontra inicialmente evacuado, os termos ΔU_{vc} e Δm_{vc} simplificam-se para a energia interna e a massa no interior do tanque ao final do processo. Isto é

$$\Delta U_{vc} = (m_2 u_2) - (m_1 u_1)^0, \quad \Delta m_{vc} = m_2 - m_1^0$$

em que 1 e 2 denotam, respectivamente, os estados inicial e final no interior do tanque.

Juntando os resultados, tem-se

$$\textcircled{2} \textcircled{3} \quad W_{vc} = m_2(h_e - u_2) \quad (a)$$

A massa no interior do tanque, ao final do processo, pode ser avaliada pela Tabela A-4 em razão do volume fornecido e do volume específico do vapor para 15 bar e 400°C

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{0,6 \text{ m}^3}{(0,203 \text{ m}^3/\text{kg})} = 2,96 \text{ kg}$$

Da Tabela A-4, a energia interna específica do vapor para 15 bar e 400°C vale 2951,3 kJ/kg. Além disso, para 15 bar e 320°C, $h_1 = 3081,9 \text{ kJ/kg}$.

Substituindo os valores na Eq. (a)

$$W_{vc} = 2,96 \text{ kg} (3081,9 - 2951,3) \text{ kJ/kg} = 386,6 \text{ kJ}$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

aplicar os balanços das taxas de massa e energia para regime transiente a um volume de controle.

desenvolver um modelo de engenharia.

obter dados de propriedades da água.

① Neste caso são feitas idealizações sobre o estado do vapor na saída e sobre os estados inicial e final da massa contida no interior do tanque. Essas idealizações tornam a análise transiente manejável.

② Um aspecto significativo deste exemplo é a transferência de energia no volume de controle pelo trabalho de escoamento incorporado no termo py da entalpia específica na entrada.

③ Esse resultado também pode ser obtido simplificando-se a Eq. 4.28. Os detalhes são deixados como exercício.

Teste-Relâmpago

Se a turbina fosse removida e o vapor pudesse escoar adiabaticamente no tanque menor até que a pressão no tanque fosse de 15 bar, determine a temperatura final do vapor no tanque, em °C. **Resposta:** 477°C.

▶ ▶ ▶ EXEMPLO 4.13 ▶

Armazenando Ar Comprimido em um Tanque

Um compressor de ar preenche rapidamente, com ar extraído da atmosfera a 70°F (21,1°C) e 1 atm, um tanque de 10 ft³ (0,28 m³) que inicialmente contém ar a 70°F e 1 atm. Durante o processo de enchimento a relação entre a pressão

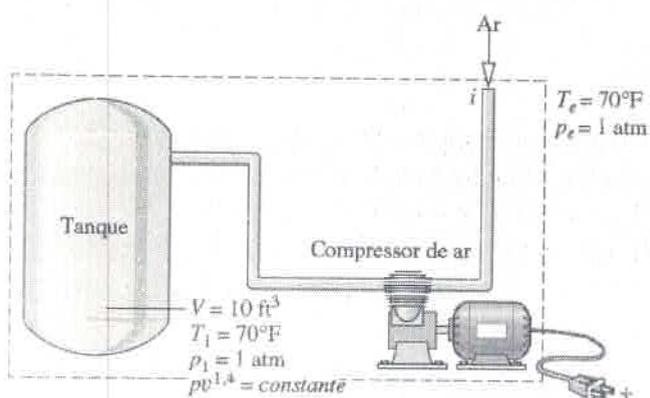
e o volume específico do ar no tanque é $pv^{1,4} = \text{constante}$. O modelo de gás ideal se aplica para o ar, e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Esboce em um gráfico a pressão em atm e a temperatura em °F do ar no interior do tanque, ambos *versus* a razão m/m_1 , em que m_1 é a massa inicial do tanque e m é a massa no tanque no instante $t > 0$. Esboce, também, a potência de acionamento do compressor em Btu *versus* m/m_1 . Considere que a razão m/m_1 varia entre 1 e 3.

SOLUÇÃO

Dado: um compressor de ar enche rapidamente um tanque de volume conhecido. O estado inicial do ar no tanque e o estado de admissão do ar são conhecidos.

Pede-se: esboce os gráficos da pressão e da temperatura do ar no interior do tanque e o gráfico da potência de acionamento do compressor. Todos *versus* m/m_1 , considerando uma variação de 1 a 3.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle é definido pela linha tracejada no diagrama.
2. \dot{Q}_{vc} pode ser abandonado devido à rapidez do processo de enchimento do tanque.
3. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.
4. O estado do ar que entra no volume de controle permanece constante.
5. O ar armazenado no interior do compressor e nas linhas de conexão pode ser ignorado.
6. A relação entre a pressão e o volume específico para o ar no tanque é $pv^{1,4} = \text{constante}$.
7. O modelo de gás ideal se aplica para o ar.

Fig. E4.13a

Análise: os gráficos desejados podem ser obtidos usando-se o *Interactive Thermodynamics: IT*, ou um programa similar. O programa *IT* se baseia na análise que se segue. A pressão p no tanque para um tempo $t > 0$ é determinada por

$$pv^{1,4} = p_1v_1^{1,4}$$

em que o volume específico correspondente v é obtido usando-se o volume V do tanque juntamente com a massa m no tanque nesse tempo. Isto é, $v = V/m$. O volume específico do ar no tanque na condição inicial, v_1 , é calculado pela equação de estado de gás ideal, com a temperatura inicial T_1 conhecida e com a pressão p_1 . Ou seja,

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{\left(\frac{1545 \text{ ft} \cdot \text{lbf}}{28,97 \text{ lb} \cdot \text{°R}}\right)(530 \text{ °R})}{(14,7 \text{ lbf/in}^2)} \left| \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} \right| = 13,35 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}$$

Uma vez determinada a pressão p , a temperatura T correspondente pode ser obtida pela equação de estado de gás ideal, $T = pv/R$.

Para a determinação do trabalho, parta da Eq. 4.2 do balanço da taxa de massa, que para um volume de controle de uma única entrada se reduz a

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e$$

Então, de acordo com as hipóteses 2 e 3, a Eq. 4.15 do balanço da taxa de energia simplifica-se para

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = -\dot{W}_{vc} + \dot{m}_i h_i$$

Combinando os balanços de massa e de energia e integrando utilizando a hipótese 4, tem-se

$$\Delta U_{vc} = -W_{vc} + h_i \Delta m_{vc}$$

Designando o trabalho *fornecido* ao compressor por $W_{entra} = -W_{vc}$ e usando a hipótese 5, tem-se

$$\textcircled{2} \quad W_{entra} = mu - m_1 u_1 - (m - m_1) h_i \quad (a)$$

em que m_1 é a massa inicial de ar no tanque, que é determinada por

$$m_1 = \frac{V}{v_1} = \frac{10 \text{ ft}^3}{13,35 \text{ ft}^3/\text{lb}} = 0,75 \text{ lb}$$

De modo a validar o programa *IT* através de um *caso-exemplo* a seguir, considere o caso de $m = 1,5 \text{ lb}$, que corresponde a $m/m_1 = 2$. O volume específico do ar no tanque nesse instante é

$$v = \frac{V}{m} = \frac{10 \text{ ft}^3}{1,5 \text{ lb}} = 6,67 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}}$$

A pressão correspondente do ar é

$$p = p_1 \left(\frac{v_1}{v} \right)^{1,4} = (1 \text{ atm}) \left(\frac{13,35 \text{ ft}^3/\text{lb}}{6,67 \text{ ft}^3/\text{lb}} \right)^{1,4} \\ = 2,64 \text{ atm}$$

e a temperatura correspondente do ar vale

$$T = \frac{pv}{R} = \left(\frac{(2,64 \text{ atm})(6,67 \text{ ft}^3/\text{lb})}{\left(\frac{1545 \text{ ft} \cdot \text{lbf}}{28,97 \text{ lb} \cdot \text{°R}} \right)} \right) \left| \frac{14,7 \text{ lbf}/\text{in}^2}{1 \text{ atm}} \right| \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| \\ = 699 \text{°R} (239 \text{°F})$$

Avaliando u_1 , u e h_e nas temperaturas apropriadas através da Tabela A-22E, $u_1 = 90,3 \text{ Btu}/\text{lb}$, $u = 119,4 \text{ Btu}/\text{lb}$ e $h_e = 126,7 \text{ Btu}/\text{lb}$. Usando a Eq. (a), o trabalho de acionamento requerido é

$$\begin{aligned}
 W_{\text{entra}} &= mu - m_1 u_1 - (m - m_1) h_e \\
 &= (1,5 \text{ lb}) \left(119,4 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) - (0,75 \text{ lb}) \left(90,3 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) - (0,75 \text{ lb}) \left(126,7 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \right) \\
 &= 16,4 \text{ Btu}
 \end{aligned}$$

Programa IT: Escolhendo “English Units” do menu **Units** e selecionando “Air” do menu **Properties**, o programa **IT** para resolver esse problema é

//Given Data

p1 = 1//atm

T1 = 70//F

Ti = 70//F

V = 10//ft³

n = 1.4

// Determine the pressure and temperature for t > 0

v1 = v_TP(“Air”, T1, p1)

v = V/m

p * v ^ n = p1 * v1 ^ n

v = v_TP(“Air”, T, p)

// Specify the mass and mass ratio r

v1 = V/m1

r = m/m1

r = 2

// Calculate the work using Eq. (a)

Win = m * u - m1 * u1 - hi * (m - m1)

u1 = u_T(“Air”, T1)

u = u_T(“Air”, T)

hi = h_T(“Air”, Ti)

Usando o botão **Solve**, obtenha uma solução para o caso-exemplo $r = m/m_1 = 2$ que foi considerado para validar o programa. Como pode ser verificado, uma boa concordância é obtida. Uma vez que o programa seja validado, use o botão **Explore** para variar a razão m/m_1 de 1 a 3 em passos de 0,01. Então, use o botão **Graph** para construir os gráficos desejados. Os resultados são:

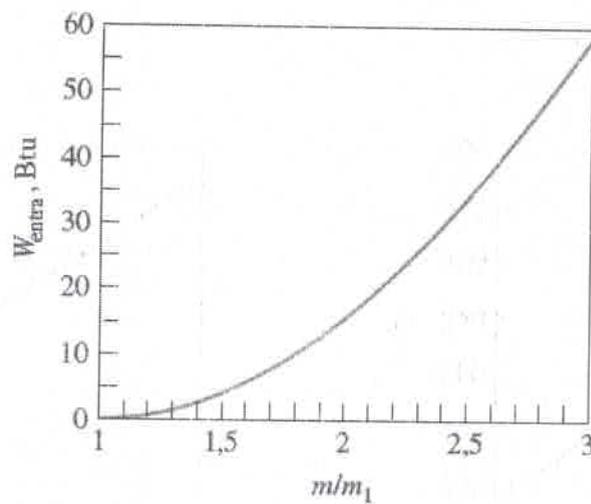
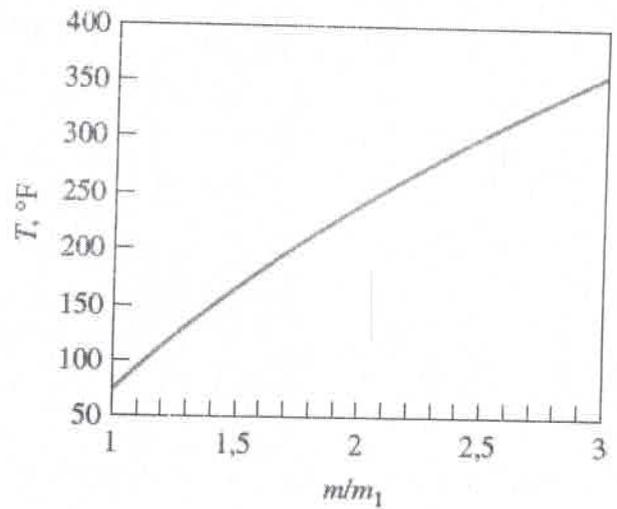
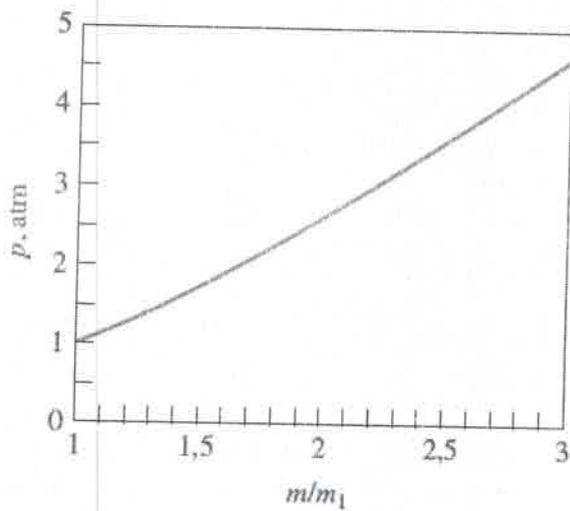


Fig. E4.13b

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar os balanços das taxas de massa e energia para regime transiente a um volume de controle.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- obter dados de propriedades do ar modelado como um gás ideal.
- resolver um problema de maneira iterativa e representar graficamente o resultado através de um programa computacional.

Dos primeiros dois gráficos conclui-se que a pressão e a temperatura aumentam à medida que o tanque enche. O trabalho necessário para encher o tanque também aumenta. Os resultados se apresentam conforme o esperado.

1 A relação pressão-volume específico encontra-se de acordo com o que seria medido. A relação também é

consistente com a idealização de estado uniforme, incorporada nas Eqs. 4.26 e 4.27.

2 Essa expressão também pode ser obtida simplificando-se a Eq. 4.28. Os detalhes são deixados como exercício.

Teste-Relâmpago

Como um *exercício* de cálculo, considere o caso $m = 2,25 \text{ lb}$ ($1,0 \text{ kg}$) e avalie p em atm. Compare com o valor lido do gráfico da Fig. E4.13b. **Resposta:** 4,67 atm.

O exemplo final de análise transiente é uma aplicação com um tanque *perfeitamente misturado*. Esse equipamento de processo é comumente empregado nas indústrias de processamento químico e alimentícias.

▶ ▶ ▶ EXEMPLO 4.14 ▶

Determinando a Variação da Temperatura com o Tempo de um Tanque Perfeitamente Misturado

Um tanque, contendo 45 kg de água líquida inicialmente a 45°C , tem uma entrada e uma saída que apresentam um escoamento com a mesma vazão volumétrica. Água líquida é admitida no tanque a 45°C e a uma vazão volumétrica de 270 kg/h. Uma serpentina de resfriamento imersa na água remove energia a uma taxa de 7,6 kW. Um agitador mistura perfeitamente a água, de maneira que sua temperatura seja uniforme ao longo do tanque. A potência de acionamento do agitador é 0,6 kW. As pressões na entrada e na saída são iguais, e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. Esboce em um gráfico a variação da temperatura da água ao longo do tempo.

SOLUÇÃO

Dado: água líquida escoo para dentro e para fora de um tanque com vazões iguais, ao mesmo tempo em que a água no interior do tanque é resfriada por uma serpentina de resfriamento.

Pede-se: esboce a variação da temperatura da água com o tempo.

Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

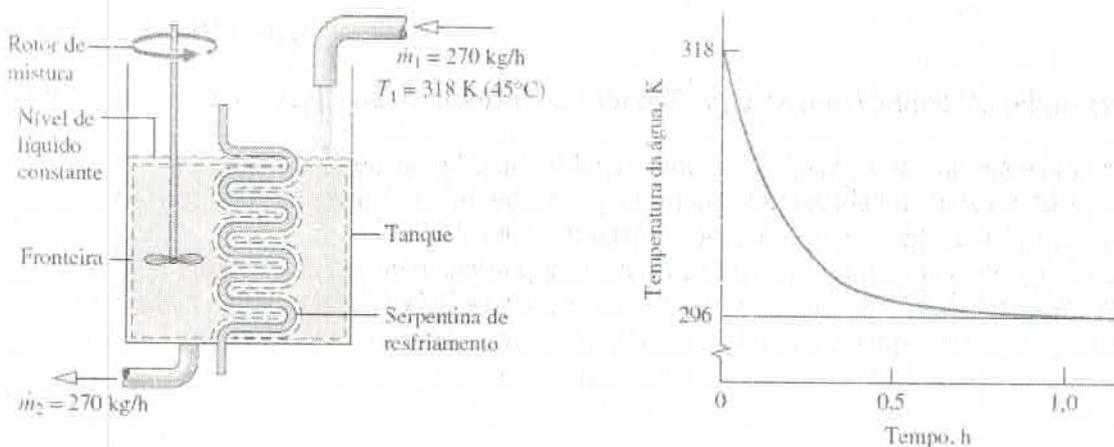


Fig. E4.14

Modelo de Engenharia:

1. O volume de controle é definido pela linha tracejada no diagrama.
2. Para o volume de controle, a única transferência de calor significativa está associada à serpentina de resfriamento. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados.
3. A temperatura da água é uniforme com a posição no tanque e varia apenas com o tempo: $T = T(t)$.
4. A água no tanque é incompressível e não existe variação de pressão entre a entrada e a saída.

Fig. E4.14

Análise: pela hipótese 2, o balanço da taxa de energia, Eq. 4.15, reduz-se a

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}(h_1 - h_2)$$

em que \dot{m} representa a vazão mássica.

A massa contida no interior do volume de controle permanece constante ao longo do tempo e, assim, o termo à esquerda do balanço de energia pode ser expresso como

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = \frac{d(m_{vc}u)}{dt} = m_{vc} \frac{du}{dt}$$

Já que a água é considerada incompressível, a energia interna específica depende apenas da temperatura. Então, a regra da cadeia pode ser utilizada para escrever

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{dT} \frac{dT}{dt} = c \frac{dT}{dt}$$

em que c é o calor específico. Juntando os resultados

$$\frac{dU_{vc}}{dt} = m_{vc}c \frac{dT}{dt}$$

Pela Eq. 3.20b, o termo da entalpia do balanço de energia pode ser expresso como

$$h_1 - h_2 = c(T_1 - T_2) + v(p_1 - p_2^0)$$

em que o termo de pressão se anula pela hipótese 4. Já que a água é bem misturada, a temperatura na saída é igual à temperatura da quantidade total de líquido no tanque, assim

$$h_1 - h_2 = c(T_1 - T)$$

em que T representa a temperatura uniforme da água no tempo t .

Com as considerações anteriores, o balanço da taxa de energia torna-se

$$m_{vc}c \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m}c(T_1 - T)$$

Como pode ser verificado por uma substituição direta, a solução desta equação diferencial ordinária é

$$T = C_1 \exp\left(-\frac{\dot{m}}{m_{vc}} t\right) + \left(\frac{\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}}{\dot{m}c}\right) + T_1$$

A constante C_1 é avaliada usando-se a condição inicial: para $t = 0$, $T = T_1$. Finalmente

$$T = T_1 + \left(\frac{\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc}}{\dot{m}c}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\dot{m}}{m_{vc}} t\right)\right]$$

Substituindo os valores numéricos fornecidos juntamente com o calor específico c para água líquida da Tabela A-19

$$T = 318 \text{ K} + \left[\frac{[-7,6 - (-0,6)] \text{ kJ/s}}{\left(\frac{270 \text{ kg}}{3600 \text{ s}}\right)\left(4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{270 \text{ kg/h}}{45 \text{ kg}} t\right) \right]$$

$$= 318 - 22[1 - \exp(-6t)]$$

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar os balanços das taxas de massa e energia para regime transiente a um volume de controle.
- desenvolver um modelo de engenharia.
- aplicar o modelo de substância incompressível para a água.
- resolver uma equação diferencial ordinária e representar graficamente a solução.

em que t é dado em horas. Usando esta expressão pode-se construir um gráfico mostrando a variação da temperatura com o tempo.

1 Neste caso foram feitas idealizações sobre o estado da massa contida no interior do sistema e sobre os estados do líquido na entrada e na saída. Essas idealizações tornaram a análise transiente tratável.

Teste-Relâmpago

Qual a temperatura da água, em °C, quando o *regime permanente* é atingido? **Resposta:** 23°C.

► RESUMO DO CAPÍTULO E GUIA DE ESTUDOS

Os princípios de conservação de massa e de energia para volumes de controle foram incorporados aos balanços de massa e de energia desenvolvidos neste capítulo. Embora a ênfase principal esteja nos casos em que se admite o escoamento unidimensional, os balanços de massa e de energia também foram apresentados nas suas formas integrais, o que fornece uma ligação para cursos de mecânica dos fluidos e de transferência de calor. Volumes de controle em regime permanente se destacam, mas discussões sobre casos transientes também foram fornecidas.

O uso dos balanços de massa e de energia para volumes de controle em regime permanente foi ilustrado para bocais e difusores, turbinas, compressores e bombas, trocadores de calor, dispositivos de estrangulamento e sistemas integrados. Um aspecto essencial de todas essas aplicações é a cuidadosa e explícita listagem de hipóteses apropriadas. Essas habilidades de determinação de modelos foram enfatizadas no capítulo.

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

- descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subsequentes.
- listar as hipóteses típicas para a modelagem de bocais e difusores, turbinas, compressores e bombas, trocadores de calor e dispositivos de estrangulamento.

► aplicar as Eqs. 4.6 a 4.18 e 4.20 para volumes de controle em regime permanente usando as hipóteses adequadas e dados de propriedades para o caso em estudo.

► aplicar os balanços de massa e de energia para a análise transiente de volumes de controle usando as hipóteses adequadas e dados de propriedades para o caso em estudo.

► CONCEITOS FUNDAMENTAIS NA ENGENHARIA

análise transiente

balanço da taxa de energia

balanço da taxa de massa

bocal

bomba

compressor

conservação de massa

difusor

escoamento unidimensional

integração de sistemas

processo de estrangulamento

regime permanente

trabalho de escoamento

trocador de calor

turbina

vazão volumétrica

vazões mássicas

► EQUAÇÕES PRINCIPAIS

$\dot{m} = \frac{AV}{v}$	(4.4b)	Vazão mássica para escoamento unidimensional (Veja Fig. 4.3).
$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s$	(4.2)	Balço da taxa de massa.
$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s$ (taxa de entrada de massa) (taxa de saída de massa)	(4.6)	Balço da taxa de massa em regime permanente.
$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$	(4.15)	Balço da taxa de energia.
$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_e \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right)$	(4.18)	Balço da taxa de energia em regime permanente.
$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} \left[(h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$	(4.20a)	Balço da taxa de energia para volumes de controle com uma entrada e uma saída em regime permanente.
$0 = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}_{vc}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} + g(z_1 - z_2)$	(4.20b)	
$h_2 = h_1 \quad (p_2 < p_1)$	(4.22)	Processo de estrangulamento (Veja Fig. 4.15).

► EXERCÍCIOS: PONTOS DE REFLEXÃO PARA OS ENGENHEIROS

- De que maneira o balanço da taxa de energia para um volume de controle leva em conta o trabalho quando um fluxo de massa atravessa a fronteira?
- Quando o interruptor de uma cafeteira comum é acionado na posição *ligar*, como a água fria no reservatório é convertida em água quente e enviada pelo sistema até o topo, para passar pelo pó de café no compartimento de filtragem?
- Quando uma fatia de pão é colocada em uma torradeira e esta é ativada, a torradeira está operando em regime permanente, transiente ou ambos?
- Conforme uma árvore cresce, sua massa aumenta. Isso viola o princípio da conservação de massa? Explique.
- Turbinas eólicas e hidráulicas desenvolvem potência mecânica a partir do movimento das correntes de ar e água, respectivamente. Em cada caso, que aspecto da corrente é utilizado para fornecer energia?
- A fim de selecionar uma bomba para remover água de uma área alagada, como se deve dimensionar a bomba para garantir que seja eficiente?
- De que maneira uma máquina coração-pulmão, também chamada de bomba de desvio cardiopulmonar, mantém a circulação sanguínea e o teor de oxigênio durante uma cirurgia?
- Onde você encontra sistemas *microeletromecânicos* no dia a dia?
- Onde os compressores podem ser encontrados nas residências familiares?
- Como o operador da bomba de um carro de bombeiros controla o fluxo de água para todas as mangueiras em uso?
- Para o escoamento de ar através de um canal convergente-divergente, esboce a variação da pressão do ar

conforme ele acelera na seção convergente e desacelera na seção divergente.

12. Em quais subsistemas automotivos são utilizadas bombas?

13. Quando a válvula de expansão de um refrigerador fica coberta de gelo, o modelo de processo de *estrangulamento* ainda se aplica? Explique.

14. Em um sistema de aquecimento ou resfriamento residencial, existente no lugar onde você mora, quais os tipos de trocadores de calor e fluidos são utilizados?

15. O que são bombas analgésicas de uso intra-articular, também conhecidas como bombas de infusão para controle da dor?

► VERIFICAÇÃO DE APRENDIZADO

Nos problemas de 1 a 5, correlacione as colunas.

- | | |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. _ Compressor | A. Um dispositivo no qual a potência é gerada como resultado da passagem de um gás ou líquido através de uma série de lâminas acopladas a um eixo com rotação livre. |
| 2. _ Difusor | B. Um dispositivo no qual o trabalho é realizado sobre um gás para aumentar sua pressão ou elevação. |
| 3. _ Bocal | C. Um dispositivo no qual o trabalho é realizado sobre um líquido para aumentar sua pressão ou elevação. |
| 4. _ Bomba | D. Uma passagem de fluxo com área de seção transversal variável na qual a velocidade de um gás ou líquido aumenta na direção do fluxo. |
| 5. _ Turbina | E. Uma passagem de fluxo com área de seção transversal variável na qual a velocidade de um gás ou líquido diminui na direção do fluxo. |

6. Um líquido flui em regime permanente a 2 lb/s (0,91 kg/s) por uma bomba, que funciona para aumentar a elevação do líquido em 100 ft (30,48 m) em relação ao ponto de entrada até a saída. A entalpia específica do líquido no ponto de entrada é 40,09 Btu/lb (93,249 kJ/kg) e no ponto de saída é 40,94 Btu/lb (95,226 kJ/kg). A bomba drena 3 Btu/s (3165,17 J/s) de potência durante a operação e, considerando desprezíveis os efeitos de energia cinética, com a aceleração da gravidade estabelecida a $32,174 \text{ ft/s}^2$ ($9,8066 \text{ m/s}^2$), a taxa de transferência de calor associada ao processo em regime estacionário é, aproximadamente:

- (a) 1,04 Btu/s (1,097 kJ/s) do líquido para as vizinhanças
- (b) 2,02 Btu/s (2,131 kJ/s) do líquido para as vizinhanças
- (c) 3,98 Btu/s (4,199 kJ/s) das vizinhanças para o líquido
- (d) 4,96 Btu/s (5,233 kJ/s) das vizinhanças para o líquido

7. Um fluxo idealizado como um processo de estrangulamento em um dispositivo apresenta:

(a) $h_2 > h_1$ e $p_2 > p_1$

(b) $h_2 = h_1$ e $p_2 > p_1$

(c) $h_2 > h_1$ e $p_2 < p_1$

(d) $h_2 = h_1$ e $p_2 < p_1$

8. _____ é o trabalho associado à variação de pressão do fluido à medida que massa é introduzida nos pontos de entrada e removida nos pontos de saída.

9. Dispositivos que operam sob fluxo constante e resultam em uma diminuição de pressão do fluido de trabalho da entrada até a saída são:

(a) Bocal, bomba, dispositivo de estrangulamento

(b) Difusor, turbina, dispositivo de estrangulamento

(c) Bocal, turbina, dispositivo de estrangulamento

(d) Difusor, bomba, dispositivo de estrangulamento

10. Vapor d'água entra em um tubo horizontal operando em regime estacionário com uma entalpia específica de 3000 kJ/kg e uma vazão mássica de 0,5 kg/s. No ponto de saída, a entalpia específica é 1700 kJ/kg. Se não há variação significativa na energia cinética entre a entrada e a saída, a taxa de transferência de calor entre o tubo e as vizinhanças é:

(a) 650 kW do tubo para as vizinhanças

(b) 650 kW das vizinhanças para o tubo

(c) 2600 kW do tubo para as vizinhanças

(d) 2600 kW das vizinhanças para o tubo

11. Um(a) _____ é um dispositivo que impõe uma restrição linear que reduz a pressão de um gás ou um líquido.

12. A taxa de variação temporal da energia em um sistema formado por um volume de controle com uma entrada e uma no tempo t é igual a:

(a) $\dot{Q}_{cv} + \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$

(b) $\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$

(c) $\dot{Q}_{cv} + \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$

(d) $\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$

13. A taxa de variação temporal do fluxo de massa por unidade de área é chamada:

- (a) Vazão mássica
- (b) Vazão volumétrica
- (c) Velocidade
- (d) Fluxo de massa

14. _____ significa que todas as propriedades permanecem constantes com o tempo.

15. O vapor d'água entra em uma turbina operando em regime permanente com uma entalpia específica de 1407,6 Btu/lb (3274,08 kJ/kg) e expande até a saída da turbina com uma entalpia específica de 1236,4 Btu/lb (2875,87 kJ/kg). A vazão mássica é 5 lb/s (2,27 kg/s). Durante esse processo, ocorre transferência de calor para as vizinhanças em uma taxa de 40 Btu/s (42,2 kJ/s). Desprezando efeitos de energia cinética e potencial, a potência desenvolvida pela turbina é:

- (a) 896 Btu/s (945,33 kJ/s)
- (b) 816 Btu/s (860,93 kJ/s)
- (c) 656 Btu/s (692,12 kJ/s)
- (d) 74,2 Btu/s (78,28 kJ/s)

16. Ar entra em um compressor operando em regime permanente a 1 atm com uma entalpia específica de 290 kJ/kg e sai com pressão mais alta e entalpia específica de 1023 kJ/kg. A vazão mássica é 0,1 kg/s. Efeitos de energia cinética e potencial podem ser desprezados e o ar pode ser modelado como um gás ideal. Se a potência de entrada no compressor é 77 kW, a taxa de transferência de calor entre o ar e as vizinhanças é:

- (a) 150,3 kW das vizinhanças para o ar
- (b) 150,3 kW do ar para as vizinhanças
- (c) 3,7 kW das vizinhanças para o ar
- (d) 3,7 kW do ar para as vizinhanças

17. _____ operação envolve variações de estado com o tempo.

18. Vapor d'água entra em um bocal isolado operando em regime permanente com uma velocidade de 100 m/s e uma entalpia específica de 3445,3 kJ/kg, saindo com uma entalpia específica de 3051,1 kJ/kg. A velocidade do vapor na saída é de:

- (a) 104 m/s
- (b) 636 m/s
- (c) 888 m/s
- (d) 894 m/s

19. Um difusor horizontal opera com uma velocidade de entrada de 250 m/s, entalpia específica de entrada de 270,11 kJ/kg e entalpia específica de saída de 297,31 kJ/kg. Considerando uma transferência de calor desprezível com as vizinhanças, a velocidade de saída é de:

- (a) 223 m/s

(b) 196 m/s

(c) 90 m/s

(d) 70 m/s

20. A vazão mássica modelada como um sistema unidimensional depende de um conjunto de parâmetros, exceto:

(a) Densidade do fluido

(b) Área da secção transversal através da qual se desloca o fluxo de massa

(c) Velocidade do fluido

(d) Volume total do fluido

21. À medida que a velocidade aumenta em um bocal, a pressão _____.

22. Explique a razão da velocidade *normal* (V_n) ao fluxo ser incluída nas Eqs. 4.3 e 4.8.

23. A vazão mássica de vapor d'água com uma pressão de 800 lbf/in² (5515,81 kPa), temperatura de 900°F (482,22°C) e 30 ft/s (9,144 m/s) de velocidade fluindo por um tubo de 6 in (5,08 cm) de diâmetro é:

(a) 5,68 lb/s (2,576 kg/s).

(b) 5,89 lb/s (2,672 kg/s).

(c) 6,11 lb/s (2,771 kg/s).

(d) 7,63 lb/s (3,461 kg/s).

24. Os mecanismos de transferência de energia em um volume de controle são _____ e _____.

Indique se as afirmações seguintes são verdadeiras ou falsas. Explique.

25. Para um fluxo unidimensional, a vazão mássica é o produto da densidade, área e velocidade.

26. Em regime permanente, o princípio de conservação de massa garante que a taxa total de energia transferida para um volume de controle seja igual à taxa de energia transferida para fora do sistema.

27. Em regime permanente, o princípio de conservação de energia garante que a taxa total de energia transferida para um volume de controle seja igual à taxa de energia transferida para fora do sistema.

28. Geração de potência hidrelétrica é uma forma não renovável de conversão de energia.

29. À medida que a velocidade diminui em um difusor, a pressão também diminui.

30. Dentre os tipos de compressor, alguns deles são: o recíproco, de fluxo axial, centrífugo e Roots.

31. Dentre os tipos de trocadores de calor, alguns deles são: o de contato direto, de contrafluxo, de fluxo paralelo e de fluxo cruzado.

32. Uma câmara de mistura é um trocador de calor de contato direto.

33. Um aumento significativo de pressão pode ser alcançado introduzindo uma restrição em uma linha através da qual haja fluxo de um gás ou líquido.
34. Fluxo volumétrico é expresso em m^3/s ou em ft^3/s .
35. Integração de sistemas é a prática de combinar componentes para alcançar um objetivo final.
36. Para um volume de controle em regime permanente, a massa pode acumular no interior da fronteira do volume de controle.
37. Fatores que permitem modelar um volume de controle com uma transferência de calor desprezível incluem (1) a superfície externa do volume de controle ser bem isolada, (2) a área superficial do volume de controle ser muito pequena para permitir uma transferência de calor efetiva, (3) a diferença de temperatura entre o volume de controle e as vizinhanças ser tão pequena que a transferência de calor pode ser desprezada e (4) o fluido passar pelo volume de controle tão rapidamente que não há tempo suficiente para a troca de calor acontecer.
38. Para um volume de controle com uma entrada e uma saída em regime permanente, as vazões mássicas na entrada e na saída são iguais, mas a vazão *volumétrica* pode não ser igual.
39. *Trabalho de escoamento* é o trabalho realizado sobre um fluxo por um pistão ou sistema de hélices.
40. Uma operação em regime *transiente* está associada a alterações de estado com o tempo.
41. Neste livro, o fluxo em um volume de controle, tanto nas entradas quanto nas saídas, é admitido como *unidimensional*.
42. Nos pontos em que a massa cruza um volume de controle, a transferência de energia associada é contabilizada somente para a energia interna.
43. Um *difusor* é uma passagem com área de secção transversal variável na qual a velocidade de um gás ou líquido aumenta na direção do fluxo.
44. O corpo humano é um exemplo de *sistema integrado*.
45. Quando uma substância passa por um *processo de estrangulamento* através de uma válvula, as entalpias específicas na entrada e na saída da válvula são iguais.
46. As correntes quentes e frias em trocadores de calor *cruzados* fluem na mesma direção.
47. O desempenho termodinâmico de um dispositivo como uma turbina através da qual haja fluxo de massa é mais bem analisado estudando-se o fluxo de massa isoladamente.
48. Para *todo e qualquer* volume de controle em regime permanente, a vazão mássica total de entrada é igual à vazão mássica total de saída.
49. Um *aquecedor aberto* de água de alimentação é um tipo especial de trocador de calor em contrafluxo.
50. Um passo chave na análise termodinâmica é a listagem cuidadosa dos pressupostos do modelo empregado.
51. Um radiador de automóvel é um exemplo de trocador de calor de fluxo cruzado.
52. Em regime permanente, ventiladores circulando ar à mesma temperatura em Nova York e Denver vão fornecer o mesmo fluxo volumétrico de ar.

► **PROBLEMAS: DESENVOLVENDO HABILIDADES PARA ENGENHARIA**

Aplicando a Vazão Mássica

- 4.1 Um *velocímetro laser Doppler* mede uma velocidade de um fluxo de água em 8 m/s em um canal aberto. O canal tem uma seção transversal de 0,5 m por 0,2 m na direção do fluxo. Se a densidade da água for constante em 998 kg/m^3 , determine a vazão mássica em kg/s.
- 4.2 Refrigerante 134a é expelido de um trocador de calor por uma tubulação de 0,75 in de diâmetro, com uma vazão mássica de 0,9 lb/s (0,41 kg/s). A temperatura e o título são, respectivamente, -15°F ($-9,45^\circ\text{C}$) e 0,05. Determine a velocidade do refrigerante, em m/s.
- 4.3 Vapor d'água entra em uma tubulação de 1,6 cm de diâmetro a 80 bar e 600°C com uma velocidade de 150 m/s. Determine a vazão mássica, em kg/s.
- 4.4 Ar, modelado como um gás ideal, entra em uma câmara de combustão sob 20 lbf/in^2 (137,9 kPa) e 70°F ($21,1^\circ\text{C}$) através de um duto retangular de 5 ft (1,524 m) por 4 ft (1,219 m). Se a vazão mássica do ar é 830.000 lb/h (376,48 t/h), determine a velocidade, em ft/s.
- 4.5 Ar é expelido de uma turbina a 200 kPa e 150°C com um fluxo volumétrico de 7000 L/s. Assumindo um comportamento de gás ideal para o ar, determine a vazão mássica, em kg/s.
- 4.6 Se a torneira de água de uma pia de cozinha vaza uma gota por segundo, quantos galões de água são desperdiçados anualmente? Qual a massa de água desperdiçada, em lb? Admita que existem 46.000 gotas por galão e que a massa específica da água é de $62,3 \text{ lb/ft}^3$ ($997,9 \text{ kg/m}^3$).

Aplicando a Conservação de Massa

- 4.7 A Fig. P4.7 fornece os dados da entrada e da saída da água de um tanque. Determine a vazão mássica na entrada e na saída do tanque, ambas em kg/s. Calcule também a taxa de variação de massa contida no tanque, em kg/s.
- 4.8 A Fig. P4.8 mostra um tanque de mistura contendo 2000 lb (907,2 kg) de água líquida. O tanque é equipado com dois tubos de entrada, um tubo para a distribuição de água quente a uma vazão mássica de 0,8 lb/s (0,36 kg/s) e um outro para a distribuição de água fria a uma vazão mássica de 1,2 lb/s (0,54 kg/s). A água sai através de um único tubo de saída a uma vazão mássica de 2,5 lb/s (1,1 kg/s). Determine a quantidade de água, em lb, no tanque após uma hora.
- 4.9 Um tanque de 380 litros contém vapor, inicialmente a 400°C e 3 bar. Uma válvula é aberta e vapor escoado do tanque com uma vazão mássica constante de 0,005 kg/s. Durante a remoção de vapor, um aquecedor mantém a temperatura no interior do tanque constante. Determine o tempo, em s, para o qual 75% da massa inicial permanece no tanque; determine também o volume específico, em m^3/kg , e a pressão, em bar, no tanque nesse instante.

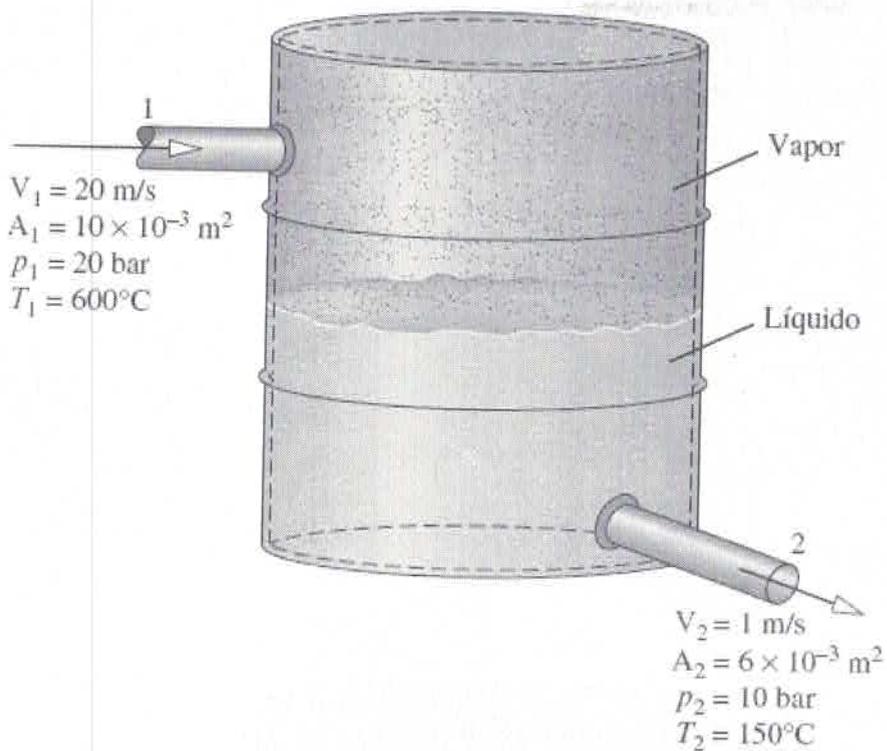


Fig. P4.7

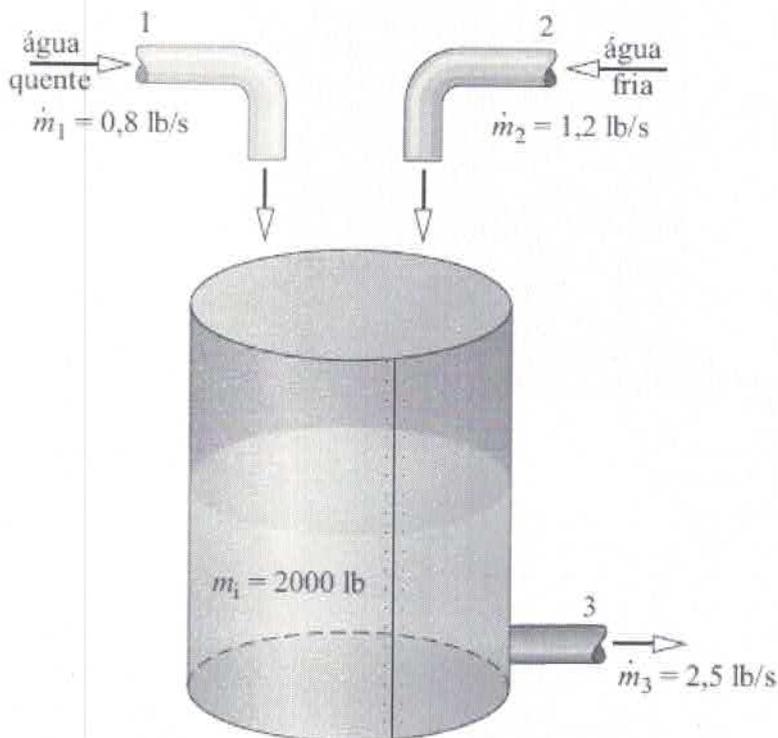


Fig. P4.8

4.10 A Fig. P4.10 ilustra os dados para um tanque de armazenamento de óleo bruto. O tanque inicialmente contém 1000 m^3 de óleo bruto. O óleo é bombeado para o tanque através de um tubo a uma taxa de $2 \text{ m}^3/\text{min}$ e sai do tanque a uma velocidade de $1,5 \text{ m/s}$ através de um outro tubo com diâmetro de $0,15 \text{ m}$. O óleo bruto apresenta um volume específico de $0,0015 \text{ m}^3/\text{kg}$. Determine

- (a) a massa de óleo no tanque, em kg, após 24 h, e
 (b) o volume de óleo no tanque, em m^3 , nesse instante.

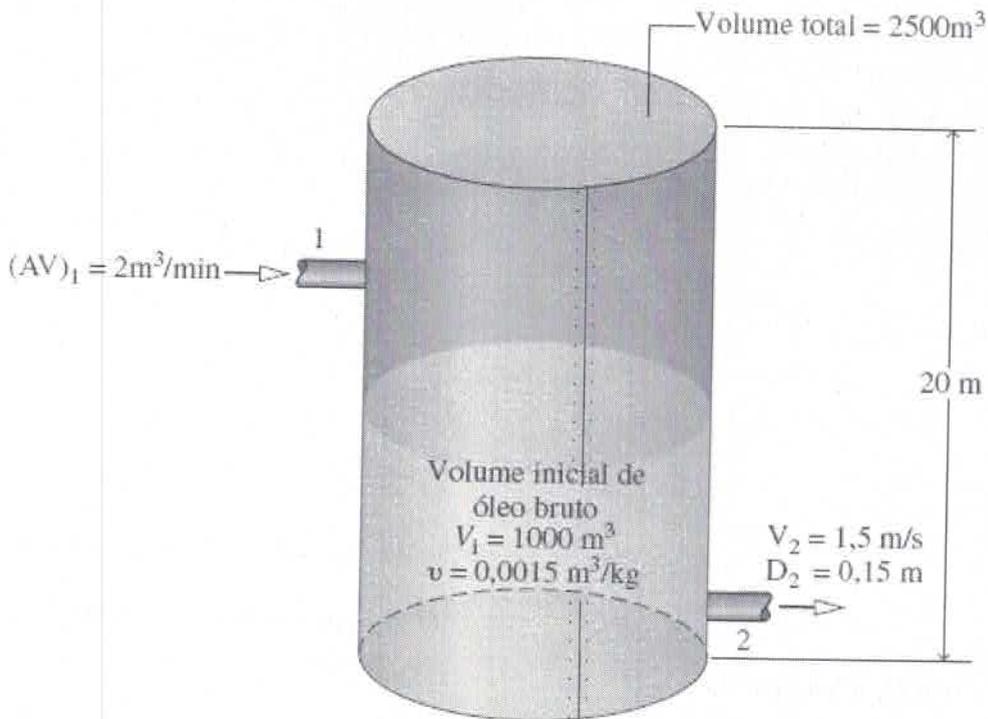


Fig. P4.10

- 4.11** Um tanque de $8 ft^3$ ($0,23 m^3$) contém ar na temperatura inicial de $80^\circ F$ ($26,7^\circ C$) e na pressão inicial de $100 lbf/in^2$ ($689,5 kPa$). O tanque desenvolve um pequeno orifício e vaza ar para a vizinhança com uma taxa constante de $0,03 lb/s$ ($0,01 kg/s$) por $90 s$ até que a pressão do ar restante no tanque seja de $30 lbf/in^2$ ($206,8 kPa$). Usando o modelo de gás ideal para o ar, determine a temperatura final, em $^\circ F$, do ar remanescente no tanque.
- 4.12** Propano líquido entra em um tanque de armazenamento cilíndrico inicialmente vazio com uma vazão mássica de $10 kg/s$. O escoamento continua até que o tanque esteja repleto de propano a $20^\circ C$ e $9 bar$. O tanque tem $25 m$ de comprimento e $4 m$ de diâmetro. Determine o tempo, em minutos, para encher o tanque.
- 4.13** Como representado na Fig. P4.13, a água de um rio é utilizada para irrigar um campo, com um sistema controlado por uma comporta levadiça. Quando a comporta é elevada, a água flui uniformemente com uma velocidade de $75 ft/s$ ($22,86 m/s$) através de uma abertura de $8 ft$ ($2,44 m$) por $3 ft$ ($0,91 m$). Se a comporta fica elevada durante $24 h$, determine o volume de água, em galões, fornecida à irrigação. Assuma a densidade da água do rio $62,3 lb/ft^3$ ($997,95 kg/m^3$).

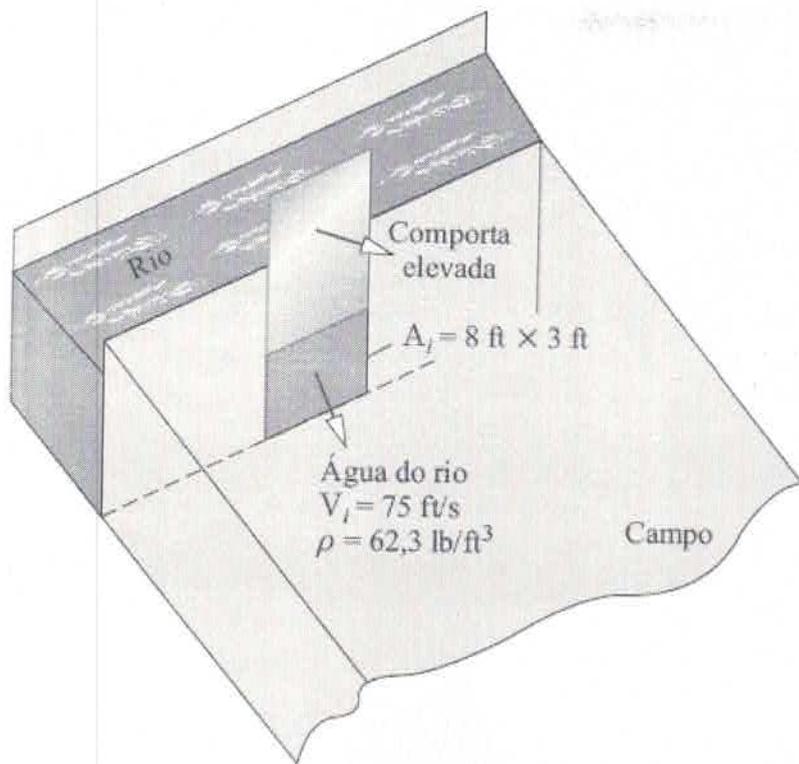


Fig. P4.13

4.14 A Fig. P4.14 mostra uma fonte de duas camadas operando com dois recipientes A e B, inicialmente vazios. Quando a fonte é acionada, a água flui com uma vazão mássica de 10 kg/s para o recipiente A. A água transborda do recipiente A para o B. Após esse transbordamento, é drenada do recipiente B a uma taxa de $5 L_B \text{ kg/s}$, em que L_B é a altura da água no recipiente B, em m. As dimensões dos componentes da fonte estão representadas na Fig. P4.14. Determine a variação da altura da água em cada recipiente em função do tempo. Considere a densidade da água constante 1000 kg/m^3 .

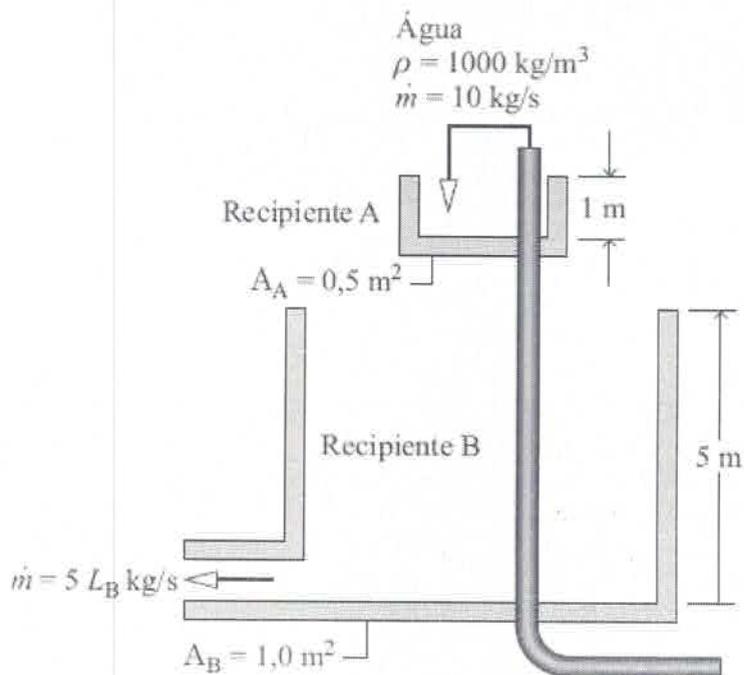


Fig. P4.14

4.15 Água líquida escoia isotermicamente a 20°C por meio de um duto com uma entrada e uma saída, operando em regime permanente. Os diâmetros de entrada e de saída do duto são, respectivamente, $0,02\text{ m}$ e $0,04\text{ m}$. Na entrada, a velocidade é de 40 m/s e a pressão é de 1 bar . Determine a vazão mássica na saída, em kg/s , e a velocidade, em m/s .

4.16 Ar entra em um volume de controle de uma entrada e uma saída a 6 bar , 500 K e 30 m/s através de uma área de 28 cm^2 . Na saída, a pressão é de 3 bar , a temperatura vale $456,5\text{ K}$ e a velocidade é de 300 m/s . O ar se comporta como um gás ideal. Para uma operação em regime permanente, determine

(a) a vazão mássica em kg/s .

(b) a área de saída em cm^2 .

4.17 Ar entra em uma unidade de tratamento de ar a 35°F ($1,7^{\circ}\text{C}$) e 1 atm , com uma vazão volumétrica de $15.000\text{ ft}^3/\text{min}$ ($7,1\text{ m}^3/\text{s}$). A unidade de tratamento de ar fornece ar a 80°F ($26,7^{\circ}\text{C}$) e 1 atm para um sistema de tubulação com três ramificações que consiste em dois dutos de 26 in ($0,66\text{ m}$) de diâmetro e outro de 50 in ($1,3\text{ m}$) de diâmetro. A velocidade nos dutos de 26 in é de 10 ft/s ($3,0\text{ m/s}$). Admitindo regime permanente e comportamento de gás ideal para o ar, determine

(a) a vazão mássica do ar que entra na unidade de tratamento de ar, em lb/s .

(b) a vazão volumétrica em cada um dos dutos de 26 in , em ft^3/min .

(c) a velocidade no duto de 50 in , em ft/s .

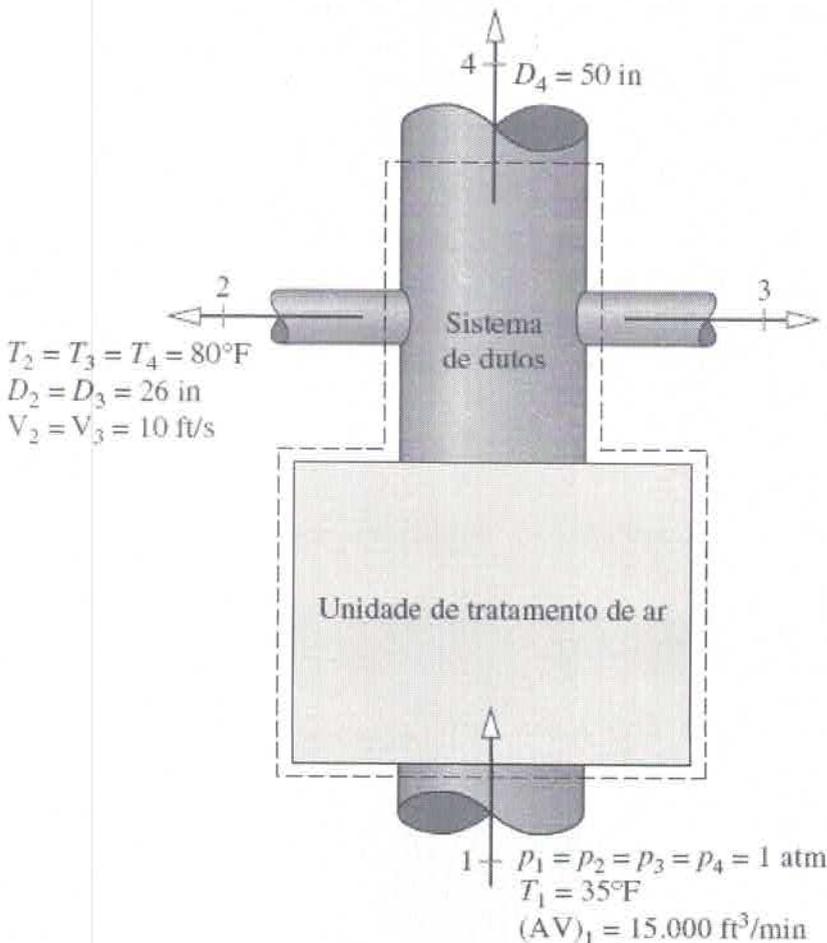


Fig. P4.17

4.18 Refrigerante 134a entra no evaporador de um sistema de refrigeração operando em regime permanente a -4°C e título de 20%, a uma velocidade de 7 m/s. Na saída, o refrigerante se encontra como vapor saturado a uma temperatura de -4°C . O canal de escoamento do evaporador tem diâmetro constante. A vazão mássica de entrada do refrigerante é 0,1 kg/s. Determine

- (a) o diâmetro do canal de escoamento do evaporador, em cm.
- (b) a velocidade na saída em m/s.

4.19 Conforme ilustrado na Fig. P4.19, vapor a 80 bar e 440°C entra em uma turbina operando em regime permanente com uma vazão volumétrica de $236\text{ m}^3/\text{min}$. Vinte por cento do escoamento sai através de um diâmetro de 0,25 m a 60 bar e 400°C . O restante sai por um diâmetro de 1,5 m, com uma pressão de 0,7 bar e título de 90%. Determine a velocidade, em m/s, de cada duto de saída.

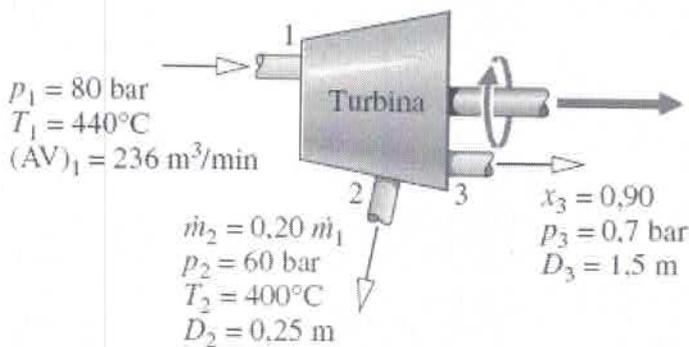


Fig. P4.19

4.20 A Fig. P4.20 fornece os dados para vapor d'água escoando em regime permanente por uma tubulação. As vazões volumétricas, as pressões e as temperaturas são iguais em ambas as saídas. Determine a vazão mássica na entrada e na saída, ambas em kg/s.

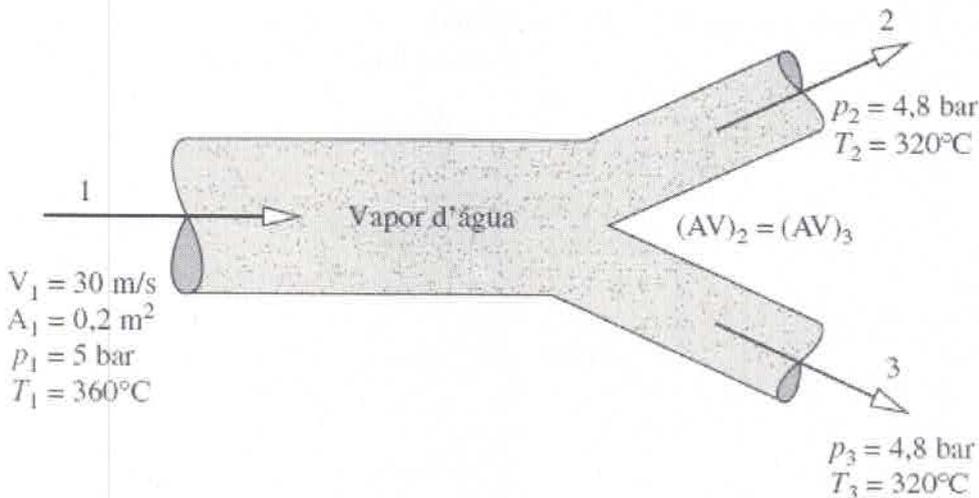


Fig. P4.20

4.21 Ar entra em um compressor que opera em regime permanente com uma pressão de $14,7\text{ lbf/in}^2$ ($101,3\text{ kPa}$) e com uma vazão volumétrica de $8\text{ ft}^3/\text{s}$ ($0,23\text{ m}^3/\text{s}$). A velocidade do ar na saída da tubulação é 225 ft/s ($68,6\text{ m/s}$) e a

pressão na saída vale 150 lbf/in^2 ($1,0 \text{ MPa}$). Se cada unidade de massa de ar que passa da entrada para a saída sofre um processo descrito por $pv^{1,3} = \text{constante}$, determine o diâmetro em polegadas na saída da tubulação.

4.22 Amônia entra em um volume de controle que opera em regime permanente a $p_1 = 16 \text{ bar}$ e $T_1 = 32^\circ\text{C}$, com uma vazão mássica de $1,5 \text{ kg/s}$. Vapor saturado a 6 bar passa através de uma das saídas, enquanto líquido saturado a 6 bar passa por uma segunda saída com uma vazão volumétrica de $0,10 \text{ m}^3/\text{min}$. Determine

(a) o diâmetro mínimo do tubo de entrada, em cm, de modo que a velocidade da amônia não exceda 18 m/s na entrada.

(b) a vazão volumétrica do vapor saturado na saída em m^3/min .

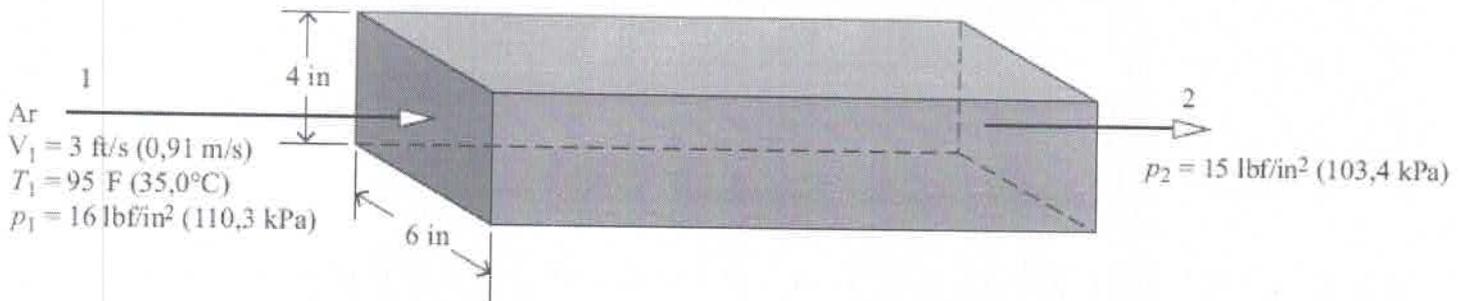


Fig. P4.23

4.23 A Fig. 4.23 fornece os dados para ar escoando em regime permanente por um duto retangular. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine a vazão volumétrica na entrada, em ft^3/s , e a vazão mássica na entrada, em lb/s . Determine a vazão volumétrica e a vazão mássica na saída, se possível. Caso contrário, explique o motivo.

Análise de Energia para Volumes de Controle em Regime Permanente

4.24 Refrigerante 134a entra em uma tubulação horizontal operando em regime permanente a 40°C , 300 kPa e uma velocidade de 40 m/s . Na saída, a temperatura é de 50°C e a pressão é de 240 kPa . O diâmetro do tubo é $0,04 \text{ m}$. Determine (a) a vazão mássica de refrigerante em kg/s , (b) a velocidade na saída em m/s e (c) a taxa de transferência de calor entre o tubo e sua vizinhança, em kW .

4.25 Conforme ilustrado na Fig. P4.25, ar entra em um tubo a 25°C e 100 kPa com uma vazão volumétrica de $23 \text{ m}^3/\text{h}$. Sobre a superfície externa do tubo está uma resistência elétrica coberta com isolamento. Com 120 V , a resistência é percorrida por uma corrente de 4 ampères . Admitindo o modelo de gás ideal com $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ para o ar e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine (a) a vazão mássica do ar em kg/h e (b) a temperatura do ar na saída, em $^\circ\text{C}$.

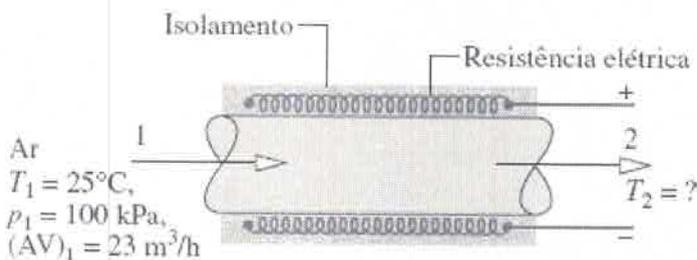


Fig. P4.25

4.26 Ar a 290 K e 1 bar é admitido em um duto horizontal de aquecimento com diâmetro constante, com uma vazão volumétrica de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ e sai a 325 K e $0,95 \text{ bar}$. O processo ocorre em regime permanente. A área de escoamento é

de $0,04 \text{ m}^2$. Admitindo o modelo de gás ideal com $k = 1,4$ para o ar, determine (a) a vazão mássica, em kg/s , (b) a velocidade na entrada e na saída, ambas em m/s , e (c) a taxa de transferência de calor, em kW .

4.27 Ar a 600 kPa e 330 K entra em um tubo horizontal e bem isolado com $1,2 \text{ cm}$ de diâmetro e sai a 120 kPa e 300 K . Aplicando o modelo de gás ideal para o ar, determine em regime permanente (a) as velocidades na entrada e na saída, ambas em m/s , e (b) a vazão mássica, em kg/s .

4.28 Ar em regime permanente 200 kPa , 325 K e uma vazão mássica de $0,5 \text{ kg/s}$ entra em um duto isolado com diferentes áreas de seção transversal de entrada e saída. A seção transversal de entrada é 6 cm^2 . Na saída do duto, a pressão do ar é de 100 kPa , a velocidade é de 250 m/s . Negligenciando os efeitos da energia potencial e modelando o ar como um gás ideal com a constante $c_p = 1,008 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, determine

(a) a vazão mássica do refrigerante, em kg/s .

(b) a velocidade da saída do refrigerante, em m/s .

(c) a taxa de transferência de calor, em kW , e a direção associada, em relação ao refrigerante

4.29 Refrigerante 134a flui em regime permanente através de um tubo horizontal com $0,05 \text{ m}$ de diâmetro interno. O refrigerante entra no tubo com um título $0,1$, temperatura de 36°C e velocidade de 10 m/s . O refrigerante sai do tubo a 9 bar como um líquido saturado. Determine:

(a) a vazão mássica do refrigerante, em kg/s .

(b) a velocidade do refrigerante na saída, em m/s .

(c) a taxa de transferência de calor, em kW , e a direção dessa transferência em relação ao refrigerante.

4.30 Conforme mostrado na Fig. P4.30, os componentes eletrônicos montados em uma superfície plana são resfriados por convecção com a vizinhança e por água líquida circulando em um tubo em U adicionado às placas. Em regime permanente, a água entra no tubo a 20°C e a uma velocidade de $0,4 \text{ m/s}$ e sai a 24°C com uma queda de pressão desprezível. Os componentes eletrônicos recebem $0,5 \text{ kW}$ de potência elétrica. A taxa de transferência de energia por convecção dos componentes é estimada em $0,08 \text{ kW}$. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. Determine o diâmetro do tubo, em cm .

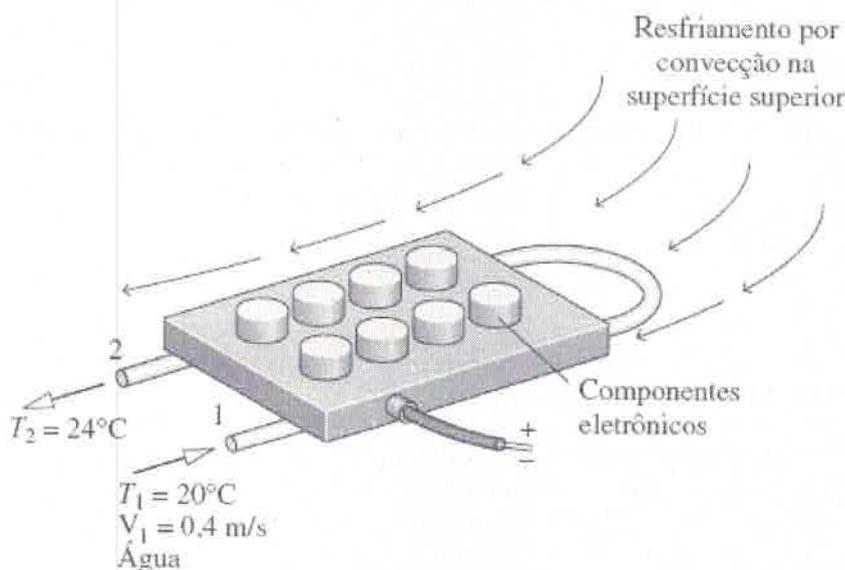


Fig. P4.30

4.31 Vapor entra em um bocal que opera em regime permanente a 20 bar, 280°C e a uma velocidade de 80 m/s. A pressão e a temperatura na saída são, respectivamente, 7 bar e 180°C. A vazão mássica é de 1,5 kg/s. Desprezando os efeitos de transferência de calor e energia potencial, determine

(a) a velocidade, em m/s, na saída.

(b) as áreas de entrada e de saída em cm^2 .

4.32 Refrigerante 134a entra em um bocal bem isolado a 200 lbf/in² (1,4 MPa), 220°F (104,4°C), com uma velocidade de 120 ft/s (36,6 m/s) e sai a 20 lbf/in² (137,9 kPa) a uma velocidade de 1500 ft/s (457,2 m/s). Para uma operação em regime permanente, desprezando os efeitos da energia potencial, determine a temperatura de saída em °F.

4.33 Ar entra em um bocal operando em regime permanente a 720°R (126,8°C) com uma velocidade desprezível e sai do bocal a 500°R (4,6°C) com uma velocidade de 1450 ft/s (442,0 m/s). Admitindo o comportamento de gás ideal e abandonando os efeitos da energia potencial, determine a transferência de calor do ar em escoamento, em Btu/lb.

4.34 Ar com uma vazão mássica de 2,3 kg/s entra em um bocal horizontal operando em regime permanente a 450 k, 350 kPa e uma velocidade de 3,0 m/s. Na saída, a temperatura é de 300 K e a velocidade é de 460 m/s. Usando o modelo de gás ideal para o ar, determine (a) a área na entrada, em m², e (b) a transferência de calor entre o bocal e sua vizinhança, em kW. Especifique se a transferência de calor ocorre para o ar ou do ar.

4.35 Gás hélio escoa em um bocal bem isolado em regime permanente. A temperatura e a velocidade na entrada são, respectivamente, 550°R (32,4°C) e 150 ft/s (45,7 m/s). Na saída, a temperatura é 400°R (-50,9°C) e a pressão vale 40 lbf/in² (275,8 kPa). A área na saída é de 0,0085 ft² (0,001 m²). Usando o modelo de gás ideal com $k = 1,67$ e desprezando os efeitos da energia potencial, determine a vazão mássica, em lb/s, através do bocal.

4.36 Nitrogênio, modelado com comportamento de gás ideal, flui a uma vazão de 3 kg/s através de um bocal horizontal isolado operando em regime permanente. O nitrogênio entra no bocal com uma velocidade de 20 m/s, temperatura de 340 K e 400 kPa de pressão, saindo do bocal sob 100 kPa. Para que o gás tenha uma velocidade de saída de 478,8 m/s, determine:

(a) a temperatura de saída, em K.

(b) a área de saída, em m².

4.37 Conforme ilustrado na Fig. P4.37, ar entra no difusor de um motor a jato, operando em regime permanente, a 18 kPa, 216 K e uma velocidade de 265 m/s, todos os dados correspondendo a um voo de alta altitude. O ar escoa adiabaticamente através do difusor e atinge a temperatura de 250 K na saída do difusor. Utilizando o modelo de gás ideal para o ar, determine a velocidade do ar na saída do difusor, em m/s.

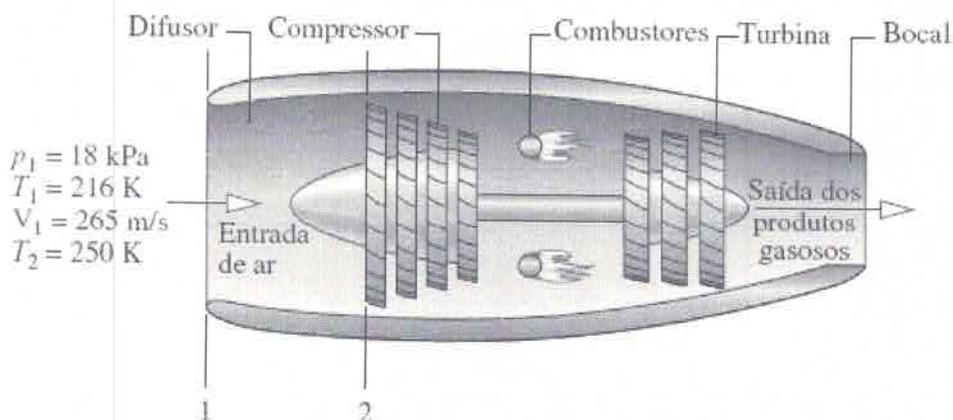


Fig. P4.37

- 4.38** Ar entra em um difusor operando em regime permanente, com uma pressão de 15 lbf/in^2 ($103,4 \text{ kPa}$), uma temperatura de 540°R ($26,8^\circ\text{C}$) e uma velocidade de 600 ft/s ($182,9 \text{ m/s}$), e sai com uma velocidade de 60 ft/s ($18,3 \text{ m/s}$). A razão entre a área de saída e a área de entrada vale 8. Utilizando o modelo de gás ideal para o ar e ignorando a transferência de calor, determine a temperatura, em $^\circ\text{R}$, e a pressão, em lbf/in^2 , na saída.
- 4.39** Refrigerante 134a entra em um difusor isolado como vapor saturado a 80°F ($26,7^\circ\text{C}$) com uma velocidade de $1453,4 \text{ ft/s}$ ($443,0 \text{ m/s}$). Na saída, a temperatura é de 280°F ($137,8^\circ\text{C}$) e a velocidade é desprezível. O difusor opera em regime permanente e os efeitos da energia potencial podem ser desprezados. Determine a pressão na saída, em lbf/in^2 .
- 4.40** Oxigênio gasoso entra em um difusor bem isolado a 30 lbf/in^2 ($206,8 \text{ kPa}$), 440°R ($-28,7^\circ\text{C}$), com uma velocidade de 950 ft/s ($289,6 \text{ m/s}$) através de uma área de $2,0 \text{ in}^2$ ($0,001 \text{ m}^2$). A área de saída é 15 vezes a de entrada, e a velocidade é 25 ft/s ($7,6 \text{ m/s}$). A variação da energia potencial entre a entrada e a saída é desprezível. Admitindo o modelo de gás ideal para o oxigênio e que a operação do bocal ocorre em regime permanente, determine a temperatura de saída em $^\circ\text{R}$, a pressão na saída em lbf/in^2 e a vazão mássica em lb/s .
- 4.41** Ar, modelado como um gás ideal, entra em um difusor isolado operando em regime permanente a 270 K com uma velocidade de 180 m/s , saindo com uma velocidade de $48,4 \text{ m/s}$. Considerando desprezíveis os efeitos da variação de energia potencial, determine a temperatura de saída, em K .
- 4.42** Vapor d'água entra em uma turbina isolada operando em regime permanente a 4 MPa com uma entalpia específica de $3015,4 \text{ kJ/kg}$ e uma velocidade de 10 m/s . O vapor se expande até a saída da turbina, onde sua pressão é $0,07 \text{ MPa}$, a entalpia específica é $2431,7 \text{ kJ/kg}$ e sua velocidade 90 m/s . A vazão mássica é $11,95 \text{ kg/s}$. Considerando desprezíveis os efeitos de energia potencial, determine a potência gerada pela turbina, em kW .
- 4.43** Ar se expande em uma turbina de 8 bar , 960 K até 1 bar e 450 K . A velocidade na entrada é pequena, comparada com a velocidade na saída, cujo valor é 90 m/s . A turbina opera em regime permanente e desenvolve uma potência de 2500 kW . A transferência de calor entre a turbina e sua vizinhança, juntamente com os efeitos da energia potencial, é desprezível. Admitindo o modelo de gás ideal, calcule a vazão mássica do ar, em kg/s , bem como a área na saída, em m^2 .
- 4.44** Ar se expande em uma turbina operando em regime permanente. Na entrada, $p_1 = 150 \text{ lbf/in}^2$ ($1,0 \text{ MPa}$), $T_1 = 1400^\circ\text{R}$ ($504,6^\circ\text{C}$) e, na saída, $p_2 = 14,8 \text{ lbf/in}^2$ ($102,0 \text{ kPa}$), $T_2 = 700^\circ\text{R}$ ($115,7^\circ\text{C}$). A vazão mássica do ar entrando na turbina é de 11 lb/s ($5,0 \text{ kg/s}$), e 65.000 Btu/h ($19,0 \text{ kW}$) de energia são rejeitados por transferência de calor. Abandonando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a potência desenvolvida em hp .
- 4.45** Vapor a 700°F ($115,7^\circ\text{C}$) e 450 lbf/in^2 ($3,1 \text{ MPa}$) entra em uma turbina operando em regime permanente e sai como vapor saturado a $1,2 \text{ lbf/in}^2$ ($8,3 \text{ kPa}$). A turbina desenvolve 12.000 hp ($8,9 \text{ MW}$), e a transferência de calor da turbina para sua vizinhança ocorre a uma taxa de $2 \times 10^6 \text{ Btu/h}$ ($586,1 \text{ kW}$). Desprezando as variações das energias cinética e potencial entre a entrada e a saída, determine a vazão volumétrica do vapor na entrada, em ft^3/h .
- 4.46** Uma turbina bem isolada operando em regime permanente desenvolve $28,75 \text{ MW}$ de potência a uma vazão mássica de vapor d'água de 50 kg/s . O vapor d'água entra a 25 bar com uma velocidade de 61 m/s e sai como vapor saturado a $0,06 \text{ bar}$ com uma velocidade de 130 m/s . Desprezando efeitos da energia potencial, determine a temperatura na entrada em $^\circ\text{C}$.
- 4.47** Vapor entra em uma turbina operando em regime permanente com uma vazão mássica de 10 kg/min , uma entalpia específica de 3100 kJ/kg e uma velocidade de 30 m/s . Na saída, a entalpia específica é 2300 kJ/kg e a velocidade é de 45 m/s . A entrada está situada 3 m mais elevada do que a saída. A transferência de calor da turbina para sua vizinhança ocorre a uma taxa de $1,1 \text{ kJ}$ por kg de vapor em escoamento. Admita $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Determine a

potência desenvolvida pela turbina em kW.

4.48 Vapor a 2 MPa e 360°C entra em uma turbina operando em regime permanente com uma velocidade de 100 m/s. Vapor saturado sai a 0,1 MPa e uma velocidade de 50 m/s. A entrada está situada 3 m mais elevada do que a saída. A vazão mássica do vapor é de 15 kg/s, e a potência desenvolvida é de 7 MW. Admita $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Determine (a) a área na entrada, em m^2 , e (b) a taxa de transferência de calor entre a turbina e sua vizinhança, em kW.

4.49 Vapor d'água entra em uma turbina operando em regime permanente a 500°C, 40 bar e com uma velocidade de 200 m/s, e se expande adiabaticamente até a saída da turbina, em que se encontra como vapor saturado a 0,8 bar, com uma velocidade de 150 m/s, e uma vazão volumétrica de 9,48 m^3/s . A potência desenvolvida pela turbina, em kW, é aproximadamente

- (a) 3500,
- (b) 3540,
- (c) 3580,
- (d) 7470.

4.50 Vapor entra no primeiro estágio da turbina ilustrada na Fig. P4.50 a 40 bar e 500°C com uma vazão volumétrica de 90 m^3/min . O vapor sai da turbina a 20 bar e 400°C. O vapor é então reaquecido à temperatura constante de 500°C antes de entrar no segundo estágio da turbina. O vapor deixa o segundo estágio como vapor saturado a 0,6 bar. Para uma operação em regime permanente e ignorando as perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial, determine

- (a) a vazão mássica do vapor em kg/h.
- (b) a potência total produzida pelos dois estágios da turbina em kW.
- (c) a taxa de transferência de calor para o vapor em escoamento ao longo do reaquecedor, em kW.

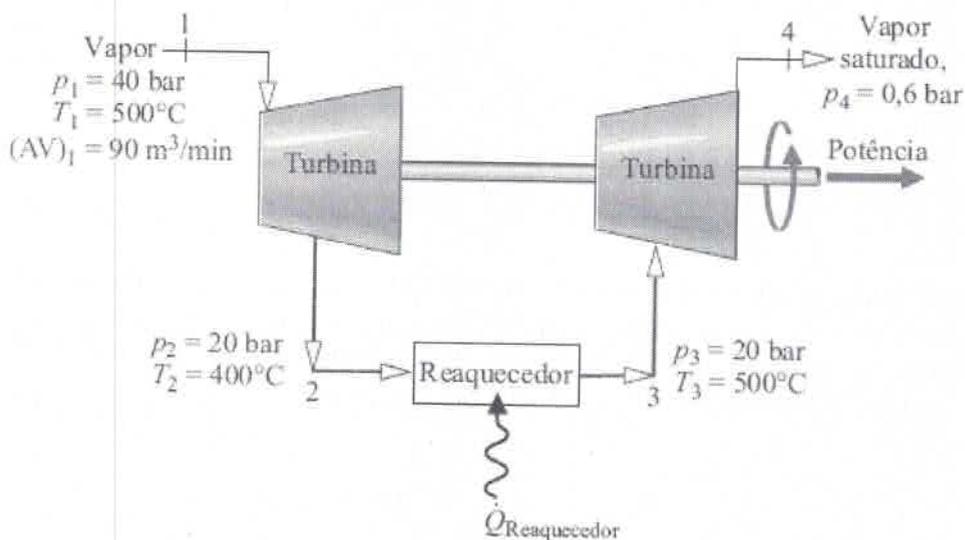


Fig. P4.50

4.51 Vapor d'água a 1800 lbf/in^2 (12,4 MPa) e 1100°F (866,5°C) entra em uma turbina operando em regime permanente. Conforme mostrado na Fig. P4.51, 20% da vazão de entrada são extraídos a 600 lbf/in^2 (4,1 MPa) e

500°F (260°C). O restante do fluxo sai como vapor saturado a 1 lbf/in² (6,9 kPa). A turbina desenvolve uma potência de saída de $6,8 \times 10^6$ Btu/h (1992,9 kW). A transferência de calor da turbina para a vizinhança ocorre a uma taxa de 5×10^4 Btu/h (14,6 kW). Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a vazão mássica do vapor que entra na turbina, em lb/s.

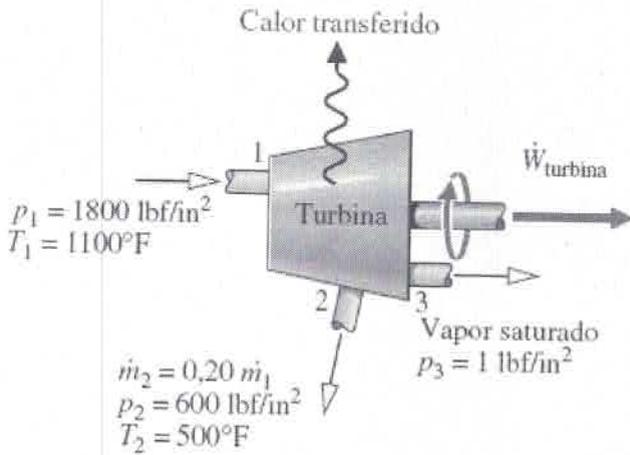


Fig. P4.51

4.52 Os gases quentes da combustão, modelados como ar com comportamento de gás ideal, entram em uma turbina a 145 lbf/in² (999,7 kPa), 2700°R (1226,8°C) e com uma vazão mássica de 0,22 lb/s (0,10 kg/s), e saem a 29 lbf/in² (199,9 kPa) e 1620°R (626,8°C). Considerando que a transferência de calor da turbina para sua vizinhança ocorre a uma taxa de 14 Btu/s, (14,8 kW) determine a potência de saída da turbina em hp.

4.53 Ar a 1,05 bar e 300 K entra em um compressor operando em regime permanente, com uma vazão volumétrica de 12 m³/min, e sai a 12 bar e 400 K. A transferência de calor entre o compressor e sua vizinhança ocorre a uma taxa de 2 kW. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a potência de entrada em kW.

4.54 Nitrogênio é comprimido em um compressor axial operando em regime permanente de uma pressão de 15 lbf/in² (103,4 kPa) e uma temperatura de 50°F (10°C) até uma pressão de 60 lbf/in² (413,7 kPa). O gás entra no compressor através de um duto de 6 in (0,15 m) de diâmetro com uma velocidade de 30 ft/s (9,1 m/s) e sai a 198°F (92,2°C) com uma velocidade de 80 ft/s (24,4 m/s). Utilizando o modelo de gás ideal e desprezando as perdas de calor e os efeitos da energia potencial, determine a potência de acionamento do compressor em hp.

4.55 Refrigerante 134a entra em um compressor operando em regime permanente como vapor saturado a 0,12 MPa e sai a 1,2 MPa e 70°C, com uma vazão mássica de 0,108 kg/s. Conforme o refrigerante passa ao longo do compressor, a transferência de calor para a vizinhança ocorre a uma taxa de 0,32 kJ/s. Determine, em regime permanente, a potência de acionamento do compressor em kW.

4.56 Dióxido de carbono gasoso é comprimido em regime permanente de uma pressão de 20 lbf/in² (137,9 kPa) e uma temperatura de 32°F (0,0°C) para uma pressão de 50 lbf/in² (344,7 kPa) e uma temperatura de 120°F (48,9°C). O gás entra no compressor com uma velocidade de 30 ft/s (9,1 m/s) e sai a uma velocidade de 80 ft/s (24,4 m/s). A vazão mássica é de 0,98 lb/s (0,44 kg/s). A ordem de grandeza da transferência de calor do compressor para sua vizinhança é de 5% da potência do compressor. Usando o modelo de gás ideal com $c_p = 0,21$ Btu/lb · °R (0,88 kJ/kg · K) e abandonando os efeitos da energia potencial, determine a potência do compressor, em hp.

4.57 Um compressor bem isolado admite nitrogênio a 60°F (15,6°C), 14,2 lbf/in² (97,9 kPa), com uma vazão volumétrica de 1200 ft³/min (0,57 m³/s), e o comprime até 500°F (260,0°C), 120 lbf/in² (827,4 kPa). Variações das energias cinética e potencial entre a entrada e a saída podem ser desprezadas. Determine a potência do compressor,

em hp, e a vazão volumétrica na saída em ft^3/min .

4.58 Ar entra em um compressor operando em regime permanente com uma pressão de $14,7 \text{ lbf/in}^2$ ($101,3 \text{ kPa}$), uma temperatura de 80°F ($26,7^\circ\text{C}$) e com uma vazão volumétrica de $18 \text{ ft}^3/\text{s}$ ($0,51 \text{ m}^3/\text{s}$). O ar sai do compressor a uma pressão de 90 lbf/in^2 ($620,5 \text{ kPa}$). A transferência de calor entre o compressor e sua vizinhança ocorre a uma taxa de $9,7 \text{ Btu por lb}$ ($22,6 \text{ kJ/kg}$) de ar. A potência de entrada do compressor é de 90 hp ($67,1 \text{ kW}$). Usando o modelo de gás ideal para o ar e abandonando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a temperatura de saída, em $^\circ\text{F}$.

4.59 Refrigerante 134a entra no compressor de um aparelho de ar condicionado a 4 bar , 20°C , e é comprimido em regime permanente até 12 bar e 80°C . A vazão volumétrica do refrigerante que entra é de $4 \text{ m}^3/\text{min}$. A potência de entrada do compressor é de 60 kW para cada quilo de refrigerante. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a transferência de calor em kW .

4.60 Refrigerante 134a entra em um compressor isolado operando em regime permanente como vapor saturado a -20°C , com uma vazão mássica de $1,2 \text{ kg/s}$. O refrigerante sai a 7 bar e 70°C . Variações das energias cinética e potencial entre a entrada e a saída podem ser desprezadas. Determine, (a) as vazões volumétricas na entrada e na saída em m^3/s e, (b) a potência de acionamento do compressor em kW .

4.61 Refrigerante 134a entra em um compressor com camisas d'água, operando em regime permanente, a -10°C , $1,4 \text{ bar}$, com uma vazão mássica de $4,2 \text{ kg/s}$ e sai a 50°C e 12 bar . A potência requerida pelo compressor é de 150 kW . Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a taxa de transferência de calor para a água de resfriamento que circula através das camisas d'água.

4.62 Ar, modelado como um gás ideal, é comprimido em regime permanente desde uma pressão de 1 bar e temperatura de 300 K até um estado final de 5 bar e 500 K , utilizando 150 kW de potência no processo. A transferência de calor ocorre a uma taxa de 20 kW do ar para resfriar a água circulando em uma camisa que circunda o compressor. Desprezando os efeitos de energia cinética e potencial, determine a vazão mássica do ar, em kg/s .

4.63 Ar entra em um compressor operando em regime permanente com uma pressão de $14,7 \text{ lbf/in}^2$ ($101,3 \text{ kPa}$) e uma temperatura de 70°F ($21,1^\circ\text{C}$). A vazão volumétrica na entrada é de $16,6 \text{ ft}^3/\text{s}$ ($0,47 \text{ m}^3/\text{s}$) e a área do escoamento é de $0,26 \text{ ft}^2$ ($0,02 \text{ m}^2$). Na saída, a pressão é de 35 lbf/in^2 ($241,3 \text{ kPa}$), a temperatura vale 280°F ($137,8^\circ\text{C}$) e a velocidade é 50 ft/s ($15,2 \text{ m/s}$). A transferência de calor entre o compressor e sua vizinhança ocorre a uma taxa de $1,0 \text{ Btu por lb}$ ($2,3 \text{ kJ/kg}$) de ar. Considere que os efeitos da energia potencial são desprezíveis e admita o modelo de gás ideal para o ar. Determine (a) a velocidade do ar na entrada, em ft/s , (b) a vazão mássica, em lb/s , e (c) a potência do compressor, em Btu/s e em hp .

4.64 Ar a $14,7 \text{ lbf/in}^2$ ($101,3 \text{ kPa}$) e 60°F ($15,6^\circ\text{C}$) entra em um compressor operando em regime permanente, onde é comprimido até uma pressão de 150 lbf/in^2 ($1,0 \text{ MPa}$). Conforme o ar passa ao longo do compressor ele é resfriado a uma taxa de 10 Btu por libra ($23,3 \text{ kJ/kg}$) de ar pela água que circula no invólucro do compressor. A vazão volumétrica do ar na entrada é de $5000 \text{ ft}^3/\text{min}$ ($2,4 \text{ m}^3/\text{s}$), e a potência de acionamento do compressor é 700 hp ($522,0 \text{ kW}$). Considere que o ar se comporta como um gás ideal, que não há perdas de calor e que os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine (a) a vazão mássica do ar, em lb/s , e (b) a temperatura do ar na saída do compressor, em $^\circ\text{F}$.

4.65 Conforme ilustrado na Fig. P4.65, uma bomba, operando em regime permanente, retira água de um lago e a entrega com o auxílio de um tubo, cuja saída está 90 ft ($27,4 \text{ m}$) acima da entrada. Na saída, a vazão mássica é de 10 lb/s ($4,5 \text{ kg/s}$). Não há variações significativas na temperatura, pressão e energia cinética da água, entre a entrada e a saída. Considerando que a potência requerida pela bomba é de $1,68 \text{ hp}$ ($1,2 \text{ kW}$), determine a taxa de transferência de calor entre a bomba e sua vizinhança em hp e Btu/min . Considere $g = 32,0 \text{ ft/s}^2$ ($9,7 \text{ m/s}^2$).

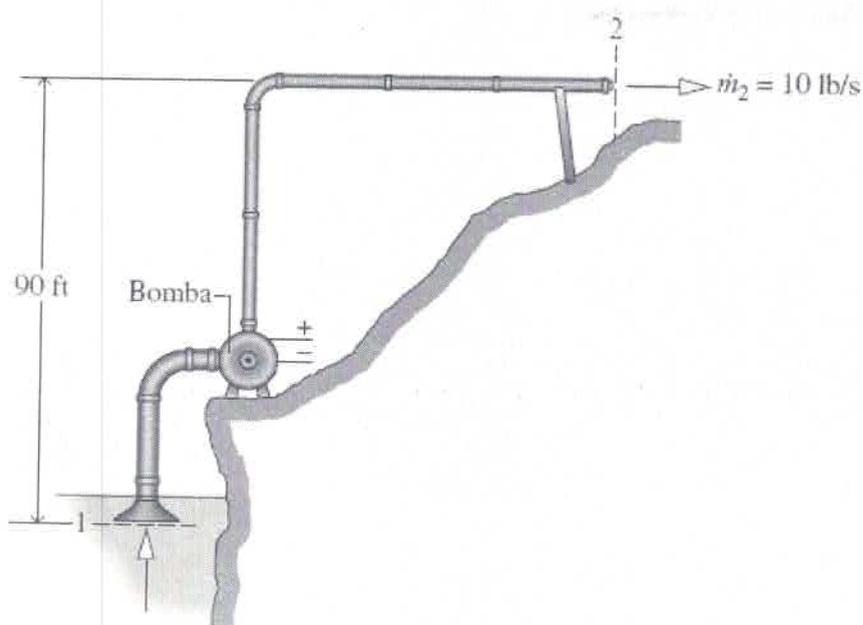


Fig. P4.65

4.66 A Fig. P4.66 fornece os dados para uma bomba que opera em regime permanente retirando água de uma represa e entregando-a a uma pressão de 3 bar para um tanque de armazenamento situado acima da represa. A vazão mássica da água é de 1,5 kg/s. A temperatura da água permanece aproximadamente constante e igual a 15°C, não há variações significativas na energia cinética entre a entrada e a saída, e a transferência de calor entre a bomba e sua vizinhança é desprezível. Determine a potência necessária para a bomba em kW. Considere $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

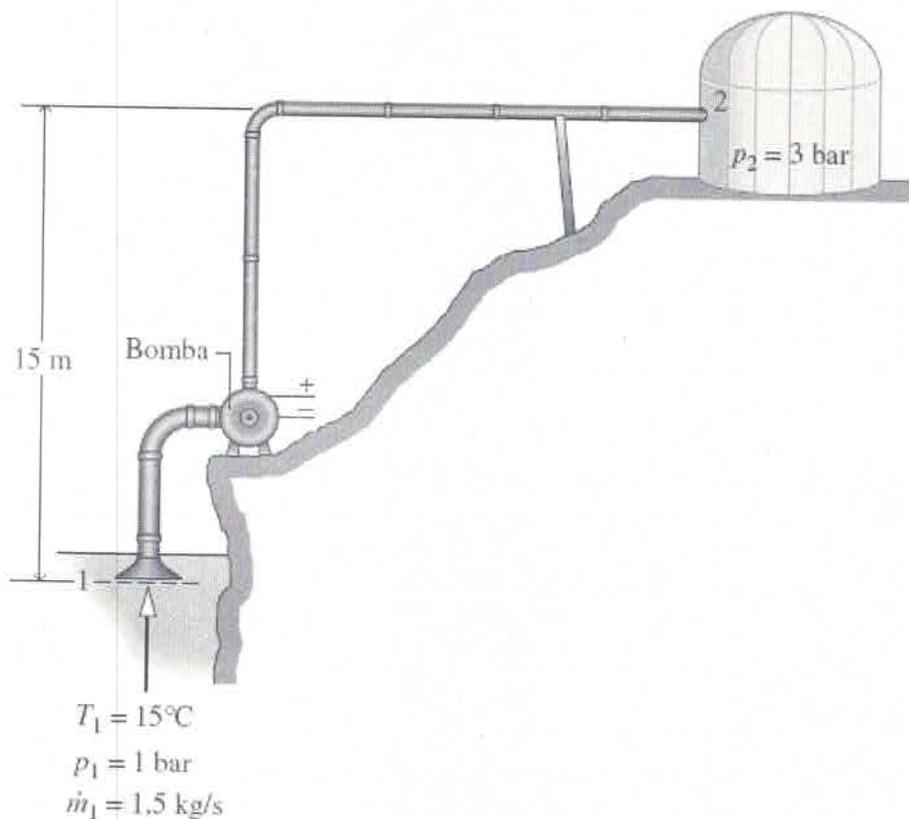


Fig. P4.66

4.67 A Fig. P4.67 fornece os dados para uma bomba submersa com uma tubulação de descarga acoplada operando em regime permanente. Na entrada, a vazão volumétrica é de $0,75 \text{ m}^3/\text{min}$ e a temperatura é de 15°C . Na saída, a pressão é de 1 atm . Não há variações significativas na temperatura ou energia cinética da água entre a entrada e a saída. A transferência de calor entre a bomba e sua vizinhança é desprezível. Determine a potência necessária para a bomba em kW. Considere $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

4.68 Conforme ilustrado na Fig. P4.68, um “lava a jato” é usado para limpar a superfície lateral de uma casa. Água a 20°C , 1 atm e uma velocidade de $0,2 \text{ m/s}$ entra no equipamento por meio de uma mangueira. O jato de água sai com uma velocidade de 20 m/s e uma elevação média em relação ao solo de 5 m , sem qualquer variação significativa na temperatura ou pressão. No regime permanente, a ordem de grandeza da taxa de transferência de calor do equipamento para a vizinhança é de 10% da potência elétrica de entrada. Avaliando a eletricidade em oito centavos por $\text{kW} \cdot \text{h}$, determine o custo da potência requerida, em centavos por litro de água distribuída. Compare com o custo da água, considerando $0,05$ centavos por litro, e comente o resultado obtido.

4.69 Durante uma cirurgia cardíaca, um equipamento de circulação extracorpórea (máquina coração-pulmão) realiza a circulação de sangue através de uma bomba operando em regime permanente. O sangue entra na bomba (isolada) a uma taxa de 5 L/min . A variação de temperatura do sangue pode ser considerada desprezível à medida que ele flui pela bomba. A bomba utiliza uma potência de 20 W na realização do processo. Assumindo o sangue como uma substância incompressível e desprezando efeitos de energia cinética e potencial, determine a variação de pressão do sangue, em kPa, à medida que ele flui através da bomba.

4.70 Uma bomba é utilizada para circular água quente em um sistema de aquecimento residencial. A água entra na bomba isolada operando em regime permanente a uma taxa de $0,42 \text{ gal/min}$ ($1,59 \text{ L/min}$). A pressão de entrada e a temperatura são, respectivamente, $14,7 \text{ lbf/in}^2$ ($101,3 \text{ kPa}$) e 180°F ($82,2^\circ\text{C}$); na saída, a pressão é 120 lbf/in^2 ($827,4 \text{ kPa}$). A bomba utiliza $1/35 \text{ hp}$ de potência para realização do processo. A água, nessas condições, pode ser modelada como uma substância incompressível com densidade constante de $60,58 \text{ lb/ft}^3$ ($970,4 \text{ kg/m}^3$) e calor específico constante de $1 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$. Desprezando efeitos de energia cinética e potencial, determine a variação de temperatura, em $^\circ\text{R}$, associada à passagem da água através da bomba. Comente o resultado obtido.

4.71 Refrigerante 134a entra em um trocador de calor de um sistema de refrigeração, operando em regime permanente, com uma vazão mássica de $0,5 \text{ lb/s}$ ($0,23 \text{ kg/s}$), como líquido saturado a 0°F ($217,8^\circ\text{C}$) e sai a 20°F ($26,7^\circ\text{C}$) a uma pressão de 20 lbf/in^2 . Um fluxo separado de ar escoa em contracorrente ao fluxo de refrigerante 134a, entrando a 120°F ($48,9^\circ\text{C}$) e saindo a 77°F ($25,0^\circ\text{C}$). O exterior do trocador de calor encontra-se bem isolado. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, e modelando o ar como um gás ideal, determine a vazão mássica do ar, em lb/s .

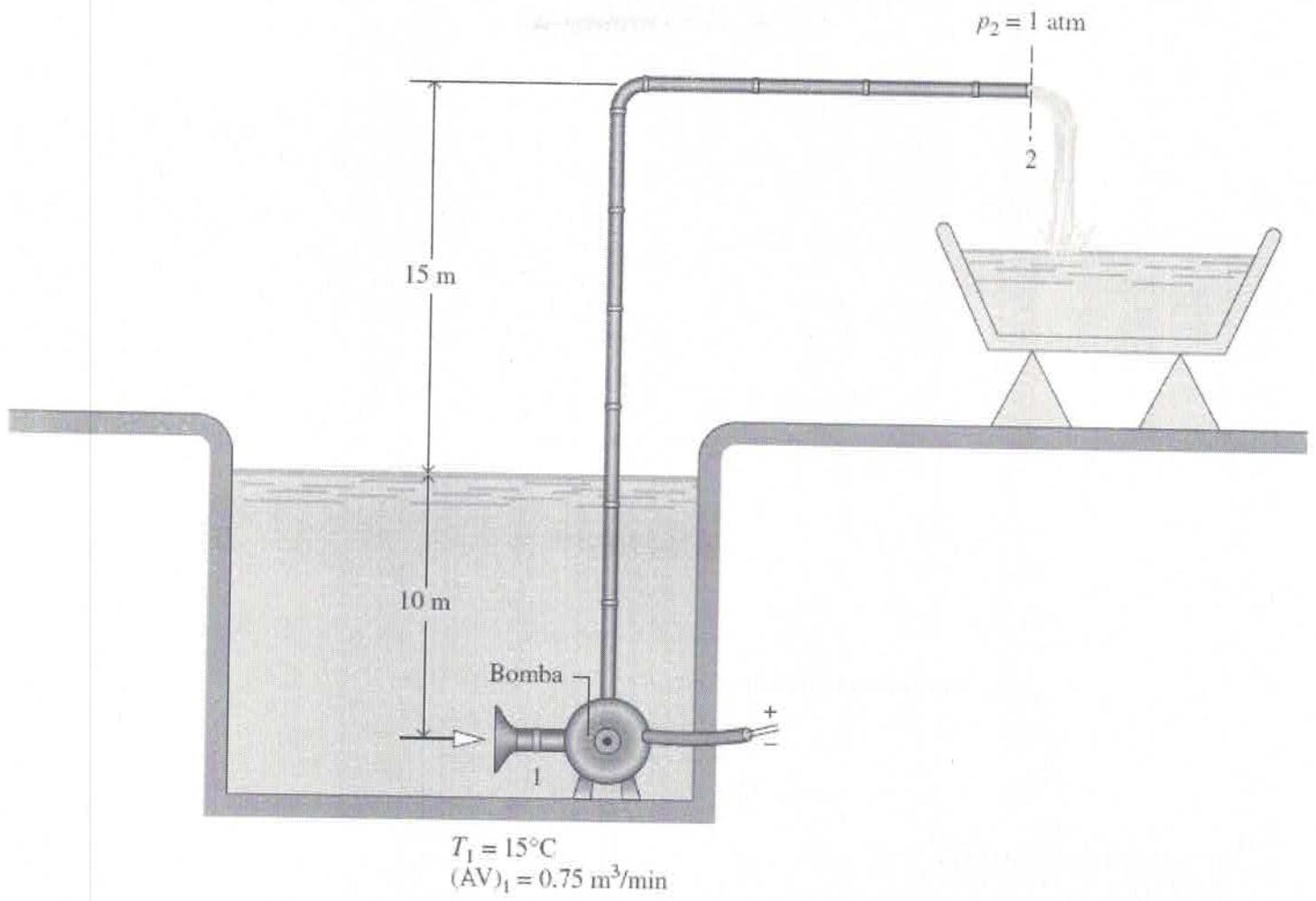


Fig. P4.67

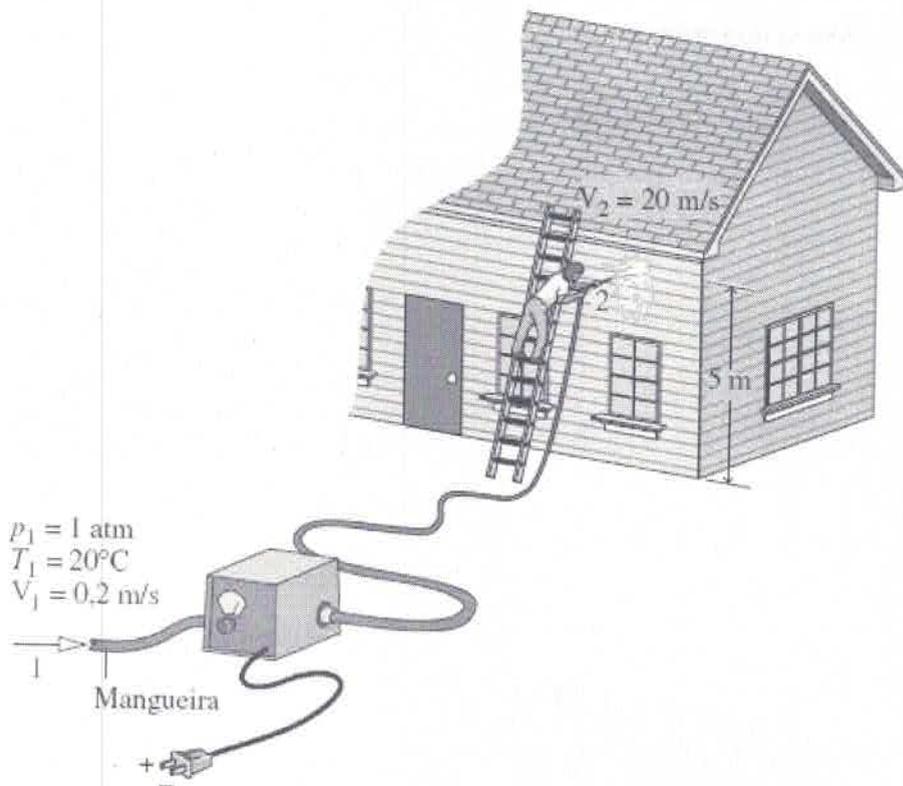


Fig. P4.68

4.72 Óleo entra em um trocador de calor contracorrente a 450 K, com uma vazão mássica de 10 kg/s, e sai a 350 K. Um fluxo separado de água líquida entra a 20°C e 5 bar. Ambos os fluxos não apresentam variações significativas na pressão. As perdas de calor para a vizinhança do trocador de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. O calor específico do óleo é constante e igual a $c_p = 2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Considerando que o projetista deseja garantir que não haja vapor d'água presente no fluxo de água de saída, qual o intervalo de vazão mássica permitido para a água, em kg/s?

4.73 Conforme ilustrado na Fig. P4.73, Refrigerante 134a entra em um condensador operando em regime permanente a 70 lbf/in^2 ($482,6 \text{ kPa}$) e 160°F ($71,1^\circ\text{C}$) e é condensado para líquido saturado a 60 lbf/in^2 ($413,7 \text{ kPa}$) no exterior de tubos nos quais a água de resfriamento escoia. Ao passar pelos tubos, a água de resfriamento aumenta sua temperatura em 20°F ($6,7^\circ\text{C}$) e não sofre nenhuma queda de pressão apreciável. A água de resfriamento pode ser modelada como incompressível com $\gamma = 0,0161 \text{ ft}^3/\text{lb}$ ($0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$) e $c = 1 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$ ($4,2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$). A vazão mássica do refrigerante é de 3100 lb/h ($0,39 \text{ kg/s}$). Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial e ignorando a transferência de calor no exterior do condensador, determine

(a) a vazão volumétrica da água de resfriamento que entra, em galões/min.

(b) a taxa de transferência de calor, em Btu/h, do refrigerante que se condensa para a água de resfriamento.

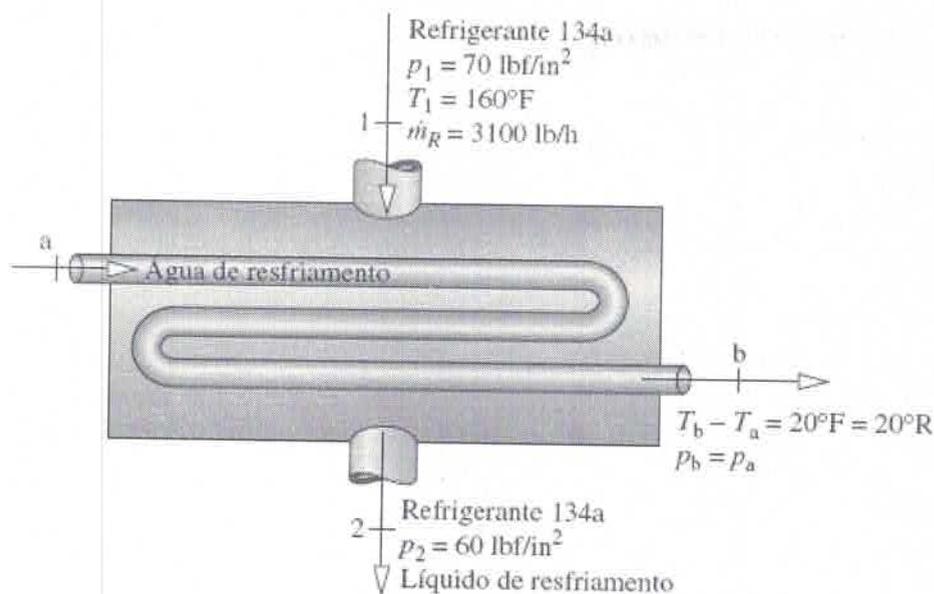


Fig. P4.73

4.74 Vapor a uma pressão de 0,08 bar e um título de 93,2% entra em um trocador de calor casco e tubo, e se condensa no exterior de tubos nos quais água de resfriamento escoia, saindo como líquido saturado a 0,08 bar. A vazão mássica do vapor condensado é $3,4 \times 10^5$ kg/h. A água de resfriamento entra nos tubos a 15°C e sai a 35°C com uma variação de pressão desprezível. Desprezando as perdas de calor e ignorando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a vazão mássica da água de resfriamento, em kg/h, para a operação em regime permanente.

4.75 Um sistema de ar condicionado é ilustrado na Fig. P4.75, no qual o ar escoia sobre tubos através dos quais flui Refrigerante 134a. O ar entra com uma vazão volumétrica de $50 \text{ m}^3/\text{min}$ a 32°C , 1 bar e sai a 22°C , 0,95 bar. O refrigerante entra nos tubos a 5 bar com um título de 20% e sai a 5 bar, 20°C . Ignorando a transferência de calor na superfície externa do ar condicionado e desprezando os efeitos das energia cinética e potencial, determine, considerando regime permanente:

(a) a vazão mássica do refrigerante, em kg/min.

(b) a taxa de transferência de calor, em kJ/min, entre o ar e o refrigerante.

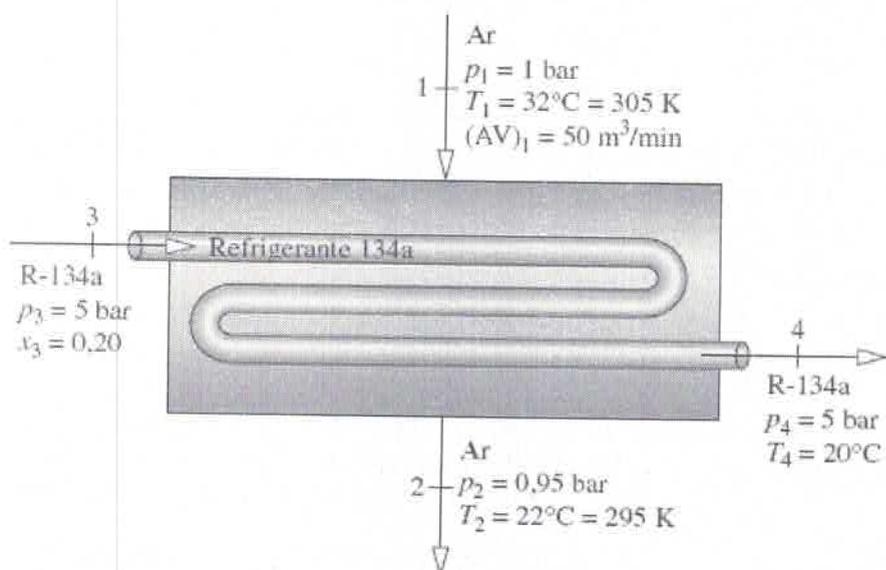


Fig. P4.75

- 4.76 Vapor a 250 kPa e um título de 90% entra em um trocador de calor operando em regime permanente e sai com a mesma pressão como líquido saturado. Um fluxo de óleo separado com uma vazão mássica de 29 kg/s entra a 20°C e sai a 100°C, sem qualquer variação significativa na pressão. O calor específico do óleo é $c = 2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Considerando que a transferência de calor do trocador para a vizinhança é 10% da energia necessária para aumentar a temperatura do óleo, determine a vazão mássica do vapor, em kg/s.
- 4.77 Refrigerante 134a a -12°C e um título de 42% entra em um trocador de calor e sai com uma vazão volumétrica de $0,85 \text{ m}^3/\text{min}$ como vapor saturado na mesma temperatura. Um fluxo de ar separado com uma vazão mássica de 188 kg/s entra a 22°C e sai a 17°C . Admitindo o comportamento de gás ideal para o ar e abandonando os efeitos das energias cinética e potencial, determine (a) a vazão mássica do Refrigerante 134a, em kg/min, e (b) a transferência de calor entre o trocador e sua vizinhança, em kJ/min.
- 4.78 Conforme o esboço da Fig. P4.78, um condensador utilizando a água de um rio para condensar vapor com uma vazão mássica de $2 \times 10^5 \text{ kg/h}$, de vapor saturado até líquido saturado a uma pressão de 0,1 bar, é proposto para uma instalação industrial. Medidas indicam que a diversas centenas de metros a montante da instalação o rio apresenta uma vazão volumétrica de $2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ e uma temperatura de 15°C . Para uma operação em regime permanente e ignorando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a elevação de temperatura da água do rio, em $^\circ\text{C}$, a jusante da instalação causada pelo uso desse condensador e comente.

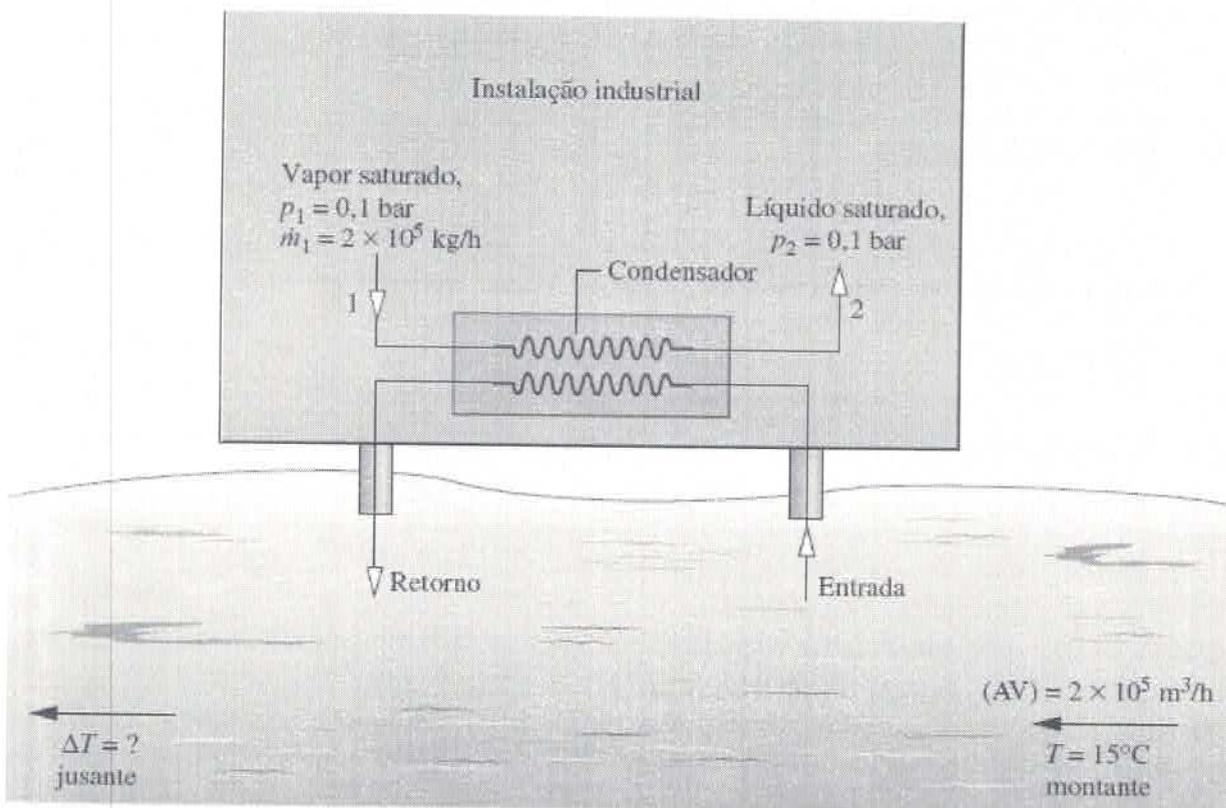


Fig. P4.78

- 4.79 A Fig. P4.79 mostra um painel de coletor solar colocado em um telhado com uma área superficial de 24 ft^2 ($2,2 \text{ m}^2$). O painel recebe energia do Sol a uma taxa de $200 \text{ Btu/h por ft}^2$ ($630,8 \text{ W/m}^2$) de área do coletor. Vinte e cinco por cento da energia incidente são perdidos para a vizinhança. O restante da energia é usado para aquecer água de uso doméstico de 90°F ($32,2^\circ\text{C}$) a 120°F ($48,9^\circ\text{C}$). A água atravessa o coletor solar sem queda de pressão apreciável. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine para regime permanente quantos galões de água

a 120°F o coletor fornece por hora.

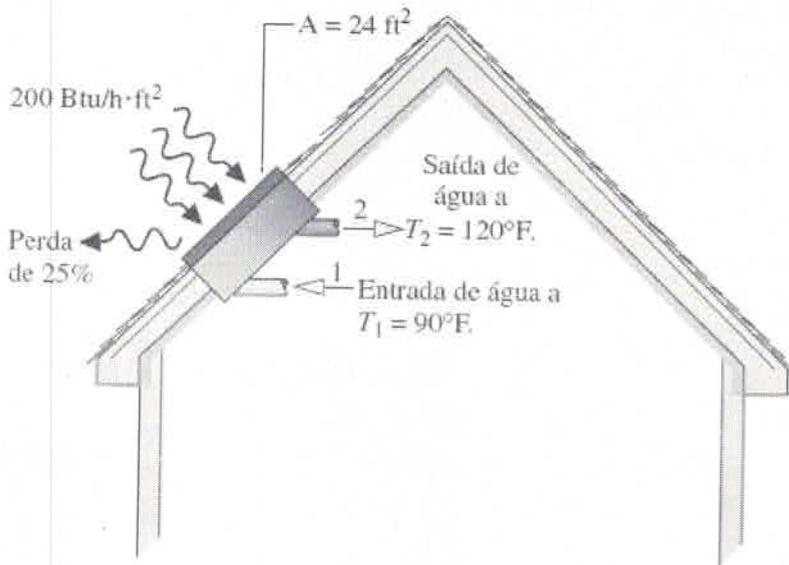


Fig. P4.79

4.80 Vapor a $0,07 \text{ MPa}$ e com uma entalpia específica de $2431,6 \text{ kJ/kg}$ entra em um trocador de calor contracorrente operando em regime permanente e sai com a mesma pressão como líquido saturado. A vazão mássica do vapor é de $1,5 \text{ kg/min}$. Um fluxo de ar separado com uma vazão mássica de 100 kg/min entra no trocador a 30°C e sai a 60°C . O modelo de gás ideal com $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ pode ser admitido para o ar. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine (a) o título do vapor que entra e (b) a taxa de transferência de calor entre o trocador de calor e sua vizinhança, em kW.



4.81 A Fig. P4.81 fornece os dados para um trocador de calor com escoamento em paralelo em regime permanente, no qual estão presentes uma corrente de ar e uma de água. Ambas as correntes não apresentam variações de pressão significantes. As perdas de calor para a vizinhança do trocador de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. O modelo de gás ideal pode ser aplicado ao ar. Considerando que ambas as correntes saem na mesma temperatura, determine o valor da temperatura, em K.

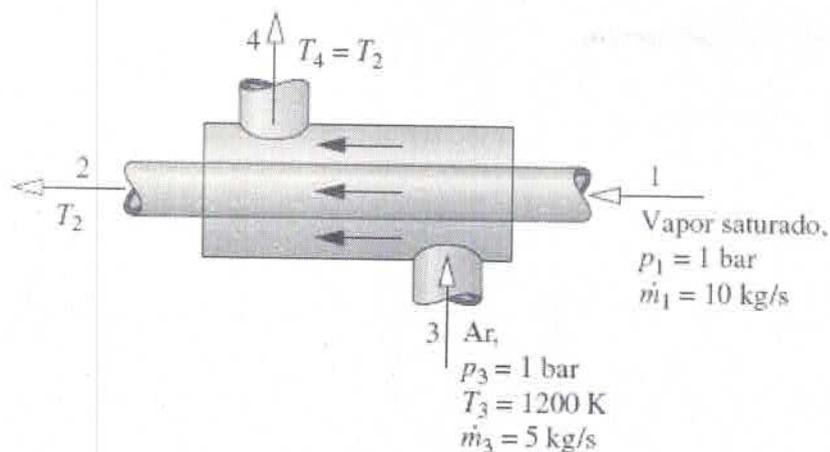


Fig. P4.81

4.82 A Fig. P4.82 fornece os dados para um trocador de calor com escoamento em paralelo em regime permanente, no qual estão presentes uma corrente de ar e uma de dióxido de carbono (CO_2). As perdas de calor para a vizinhança do trocador de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. O modelo de gás ideal pode ser aplicado para ambos os gases. Uma restrição relativa ao tamanho do trocador de calor requer que a temperatura de saída do ar seja 20 graus maior do que a temperatura de saída do CO_2 . Determine a temperatura de saída de ambas as correntes, em $^{\circ}\text{R}$.

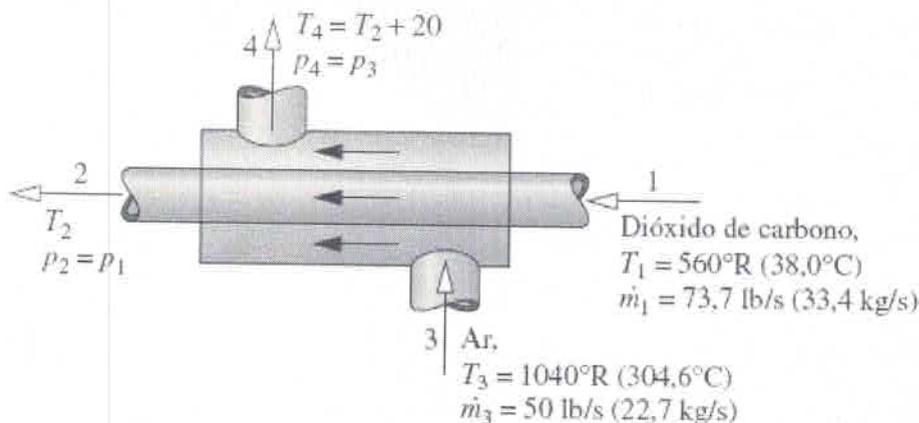


Fig. P4.82

4.83 Um sistema aberto de aquecimento de água opera em regime permanente com água líquida entrando pela abertura 1 a 10 bar, 50°C e vazão de 60 kg/s . Separadamente, um fluxo de vapor d'água entra pela abertura 2 a 10 bar e 200°C . Água, na forma de líquido saturado, sai do sistema de aquecimento a 10 bar pela abertura 3. Desprezando a troca de calor do sistema com as vizinhanças, bem como os efeitos de energia cinética e potencial, determine a vazão mássica do vapor, na abertura 2, em kg/s .

4.84 A Fig. P4.84 fornece dados para o duto adiante das serpentinhas da unidade de resfriamento de água de um sistema de ar condicionado operando em regime permanente. Ar externo a 90°F ($32,2^{\circ}\text{C}$) é misturado com ar de retorno a 75°F ($23,9^{\circ}\text{C}$). As perdas de calor são desprezíveis, e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. A pressão em todo o conjunto é 1 atm. Admitindo o modelo de gás ideal com $c_p = 0,24 \text{ Btu/lb} \cdot ^{\circ}\text{R}$ ($1,0 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$) para o ar, determine (a) a temperatura do ar misturado, em $^{\circ}\text{F}$, e (b) o diâmetro do duto com ar misturado, em ft.

4.85 Conforme o *dessuperaquecedor* ilustrado na Fig. P4.85, água líquida no estado 1 é injetada em um fluxo de vapor superaquecido que entra no estado 2. Como resultado, vapor saturado sai no estado 3. Os dados para a operação em regime permanente estão apresentados na figura. Ignorando as perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial, determine a vazão mássica do vapor superaquecido que entra, em kg/min.

4.86 Três linhas de vapor em uma planta de processamento entram em um tanque de armazenamento operando em regime permanente a 1 bar. Vapor é adicionado pela entrada 1 com vazão de 0,8 kg/s e título 0,9, enquanto o fluxo de vapor adicionado pela entrada 2 tem vazão de 2 kg/s a 200°C e o vapor adicionado à entrada 3 flui com vazão de 1,2 kg/s a 95°C. Na única saída do tanque, vapor é eliminado a 1 bar. A taxa de transferência de energia do tanque é de 40 kW. Desprezando efeitos de energia cinética e potencial, determine para o fluxo de saída:

(a) a vazão mássica, em kg/s.

(b) a temperatura, em °C.

4.87 Um tanque isolado em uma planta de vapor opera em regime permanente. Água é adicionada pela entrada 1 a uma taxa de 125 lb/s (56,7 kg/s), a uma pressão de 14,7 lbf/in² (101,3 kPa). Para repor as perdas de vapor, mais água é adicionada pela entrada 2, a uma taxa de 10 lb/s (4,54 kg/s) sob 14,7 lbf/in² de pressão e 60°F (15,6°C). Com isso, água é eliminada do tanque sob 14,7 lbf/in² de pressão. Desprezando efeitos de energia cinética e potencial, determine, para a água sendo eliminada do tanque:

(a) a vazão mássica, em lb/s.

(b) a entalpia específica, em Btu/lb.

(c) a temperatura, em °F.

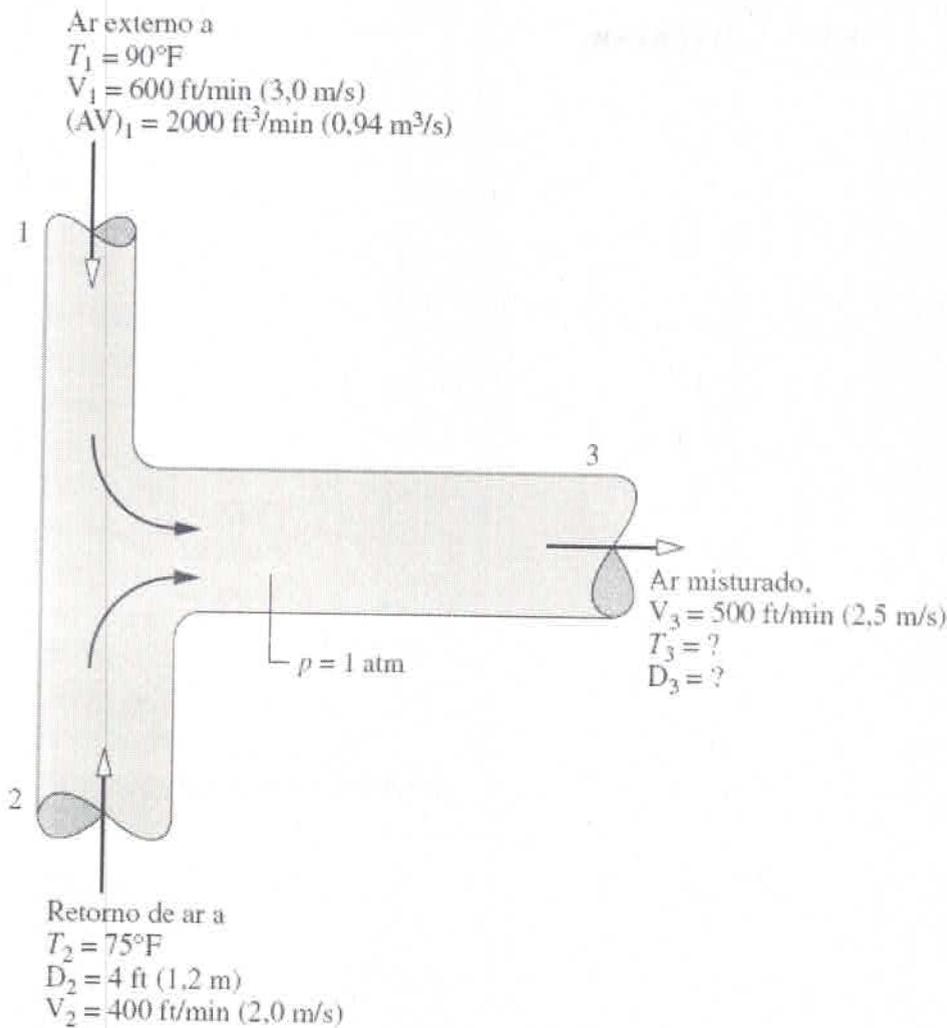


Fig. P4.84

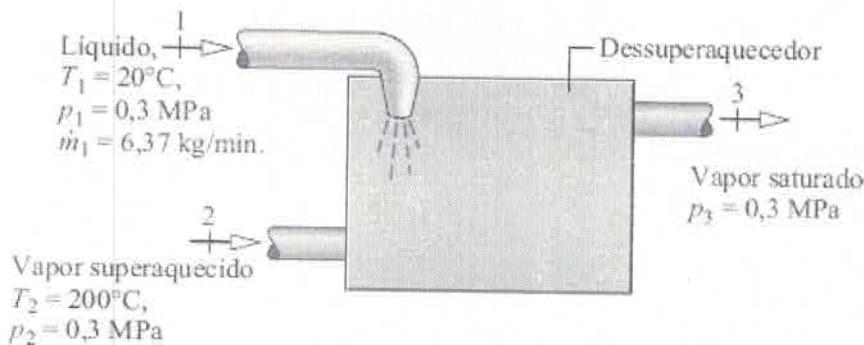


Fig. P4.85

4.88 Vapor com título 0,7, pressão 1,5 bar e vazão mássica 10 kg/s entra em um separador de vapor operando em regime permanente. Vapor saturado é eliminado do separador a 1,5 bar no estado 2 sob uma vazão mássica de 6,9 kg/s, enquanto líquido saturado sob 1,5 bar é eliminado do separador no estado 3. Desprezando os efeitos de energia cinética e potencial, determine a taxa de transferência de calor, em kW, e sua direção.

4.89 Amônia entra em uma válvula de expansão de um sistema de refrigeração a uma pressão de 10 bar e a uma temperatura de 24°C e sai a 1 bar. Se o refrigerante sofre um processo de estrangulamento, qual é o título do refrigerante na saída da válvula de expansão?

4.90 Vapor de propano entra em uma válvula a 1,0 MPa, 60°C, e sai a 0,3 MPa. Se o refrigerante sofre um processo de estrangulamento, qual é a temperatura do propano, em °C, na saída da válvula?

4.91 Vapor d'água entra por uma válvula parcialmente aberta operando em regime permanente como um líquido saturado a 300°F (148,9°C) e sai a 60 lbf/in² (413,7 kPa). Desprezando efeitos de energia cinética e potencial, bem como efeitos de dispersão de energia térmica para as vizinhanças, determine a temperatura, em °F, e o título do vapor d'água na saída da válvula.

4.92 Uma válvula e uma turbina a vapor operam em série, em regime permanente. O vapor que escoava pela válvula sofre um processo de estrangulamento. Na entrada da válvula, as condições são 600 lbf/in² (4,1 MPa) e 800°F (426,7°C). Na saída da válvula, correspondente a entrada da turbina, a pressão é de 300 lbf/in² (2,1 MPa). Na saída da turbina, a pressão é de 5 lbf/in² (34,5 kPa). A potência desenvolvida pela turbina é de 350 Btu por lb de vapor em escoamento. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. Fixe o estado na saída da turbina: para o estado de vapor superaquecido, determine a temperatura, em °F. Para o estado de mistura bifásica líquido-vapor, determine o título.

4.93 Um tubo horizontal de diâmetro constante com um acúmulo parcial de depósito na parede interna é mostrado na Fig. P4.93. Sob as condições observadas, pode-se assumir o comportamento ideal do ar, o qual entra a 320 K, 900 kPa com velocidade de 30 m/s e saindo desse sistema a 305 K. Assumindo que o sistema se encontra em regime permanente e desprezando a transferência de calor por dispersão térmica com as vizinhanças, determine, para o ar saindo do tubo:

(a) a velocidade, em m/s.

(b) a pressão, em kPa.



Fig. P4.93

4.94 Água líquida entra em uma válvula a 300 kPa e sai a 275 kPa, sob regime permanente. À medida que a água flui através da válvula, a variação na sua temperatura, a transferência de calor por dispersão para as vizinhanças, e efeitos de energia cinética e potencial podem ser desprezados. Assumindo que a água é uma substância incompressível sob as condições dadas, com densidade 1000 kg/m³, determine a variação na energia cinética por unidade de massa da água fluindo através da válvula, em kJ/kg.

Sistemas Avançados de Energia em Regime Permanente

4.95 A Fig. P4.95 ilustra uma turbina, operando em regime permanente, que fornece energia para um compressor de ar e um gerador elétrico. Ar entra na turbina com uma vazão mássica de 5,4 kg/s a 527°C e sai da turbina a 107°C e 1 bar. A turbina fornece energia a uma taxa de 900 kW para o compressor e a uma taxa de 1400 kW para o gerador. O ar pode ser modelado como um gás ideal e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine (a) a vazão volumétrica do ar na saída da turbina, em m³/s, e (b) a taxa de transferência de calor entre a turbina e sua vizinhança, em kW.

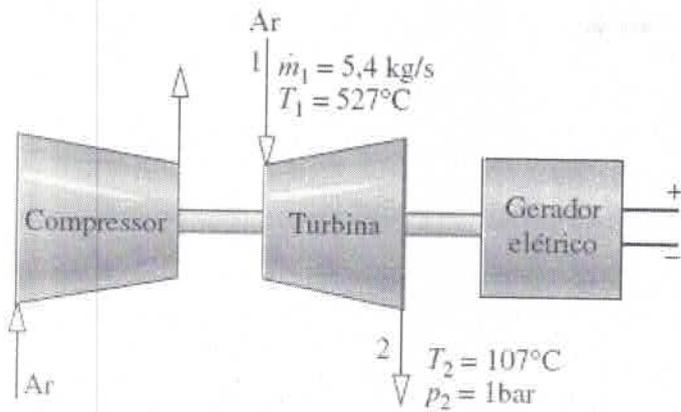


Fig. P4.95

4.96 A Fig. P4.96 mostra uma representação esquemática e os dados pertinentes de um sistema de estrangulamento em série com um trocador de calor. Refrigerante 134a entra na válvula sob a forma de líquido saturado a uma pressão de 9 bar, saindo (da válvula) a uma pressão de 2 bar. O refrigerante então entra no trocador de calor, saindo a uma temperatura de 10°C sem variação significativa em sua pressão. Separadamente, água líquida flui a 1 bar entrando no trocador de calor a uma temperatura de 25°C com vazão de 2 kg/s e saindo a 1 bar como líquido a 15°C. Nesse sistema, efeitos de energia cinética e potencial podem ser desprezados, bem como a transferência de energia térmica por dispersão para as vizinhanças. Determine:

- a temperatura, em °C, do refrigerante na saída da válvula;
- a vazão mássica do refrigerante, em kg/s.

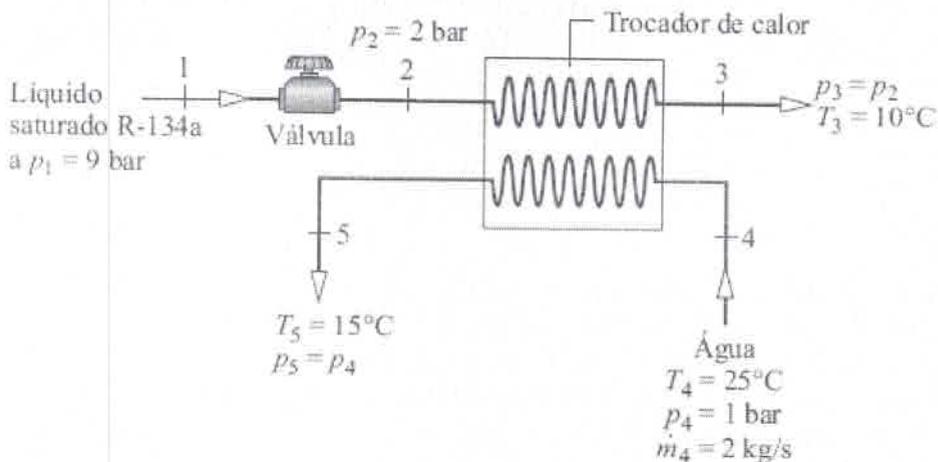


Fig. P4.96

4.97 Conforme ilustrado na Fig. P4.97, Refrigerante 22 entra no compressor de uma unidade de ar condicionado, operando em regime permanente, a 40°F (4,4°C) e 80 lbf/in² (551,6 kPa), e é comprimido até 140°F (60,0°C) e 200 lbf/in² (1,4 MPa). O refrigerante que sai do compressor entra em um condensador, onde ocorre transferência de energia para o ar como um fluxo separado, e o refrigerante sai como um líquido a 200 lbf/in² e 90°F (32,2°C). Ar entra no condensador a 80°F (26,7°C) e 14,7 lbf/in² (101,3 kPa) com uma vazão volumétrica de 750 ft³/min (0,35 m³/s) e sai a 110°F (43,3°C). Ignorando as perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial, e admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine (a) a vazão mássica do refrigerante, em lb/min, e (b) a potência do compressor, em hp.

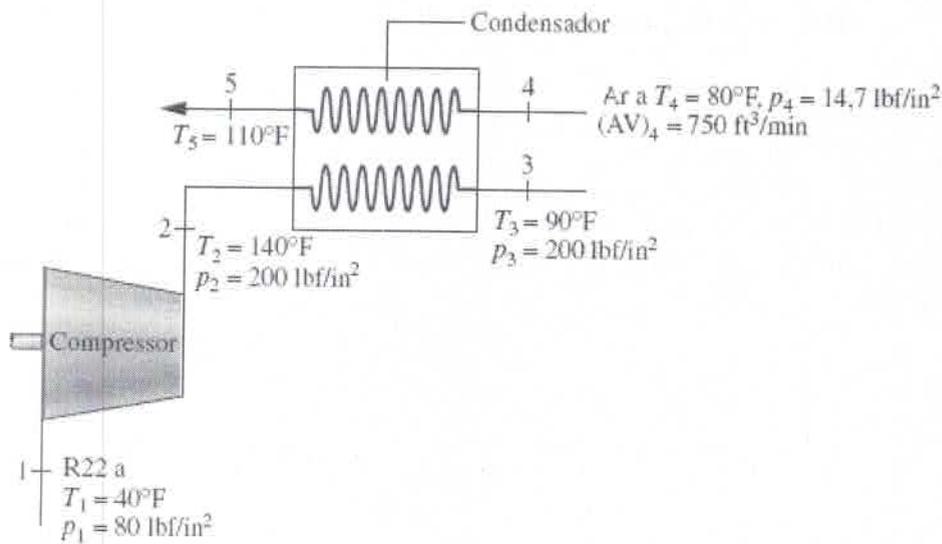


Fig. P4.97

4.98 A Fig. P4.98 mostra três componentes de um sistema de condicionamento de ar. O Refrigerante 134a flui através de uma válvula de estrangulamento e de um trocador de calor, enquanto o ar flui por um sistema de ventilação e pelo mesmo trocador de calor. Os dados para a operação em regime permanente encontram-se representados na figura. Não há transferência de calor significativa entre qualquer um dos componentes e as vizinhanças, e efeitos de energia cinética e potencial no presente sistema podem ser desconsiderados. Assumindo comportamento ideal para o ar, com $c_p = 0,240 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$ ($1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$), determine a vazão mássica do ar, em lb/s.

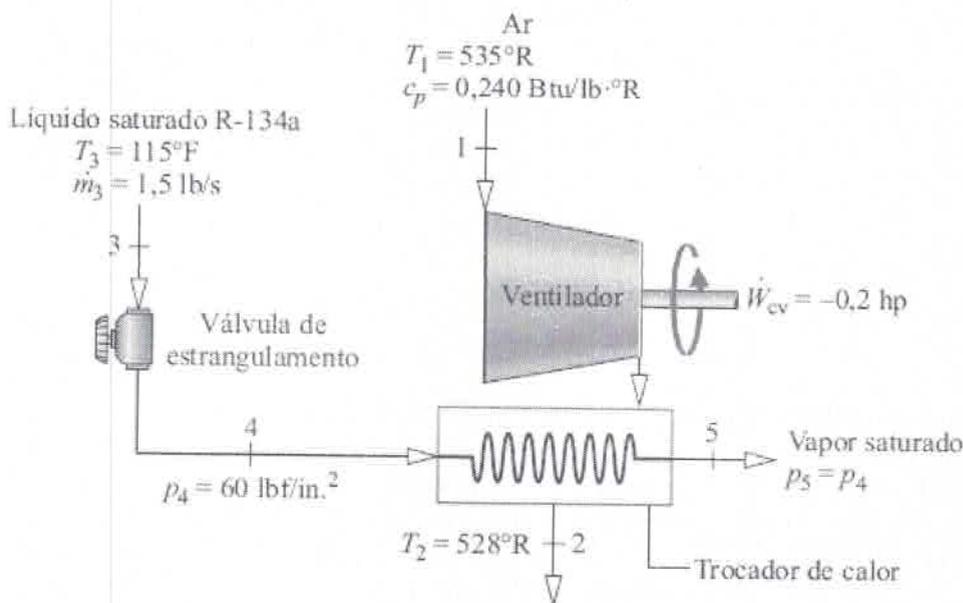


Fig. P4.98

4.99 A Fig. P4.99 mostra um sistema formado por uma bomba acionada por turbina que fornece água a uma câmara de mistura localizada a 25 m de altura em relação à bomba. Dados para a operação em regime permanente desse sistema encontram-se representados na figura. A taxa de transferência de calor da água para as vizinhanças é 2 kW. Para a turbina, a transferência de calor com as vizinhanças, bem como efeitos de energia cinética e potencial, podem ser desconsiderados. Determine:

(a) a potência utilizada pela bomba, em kW, para fornecer água até a entrada da câmara de mistura.

(b) a vazão mássica de vapor, em kg/s, que flui através da turbina.

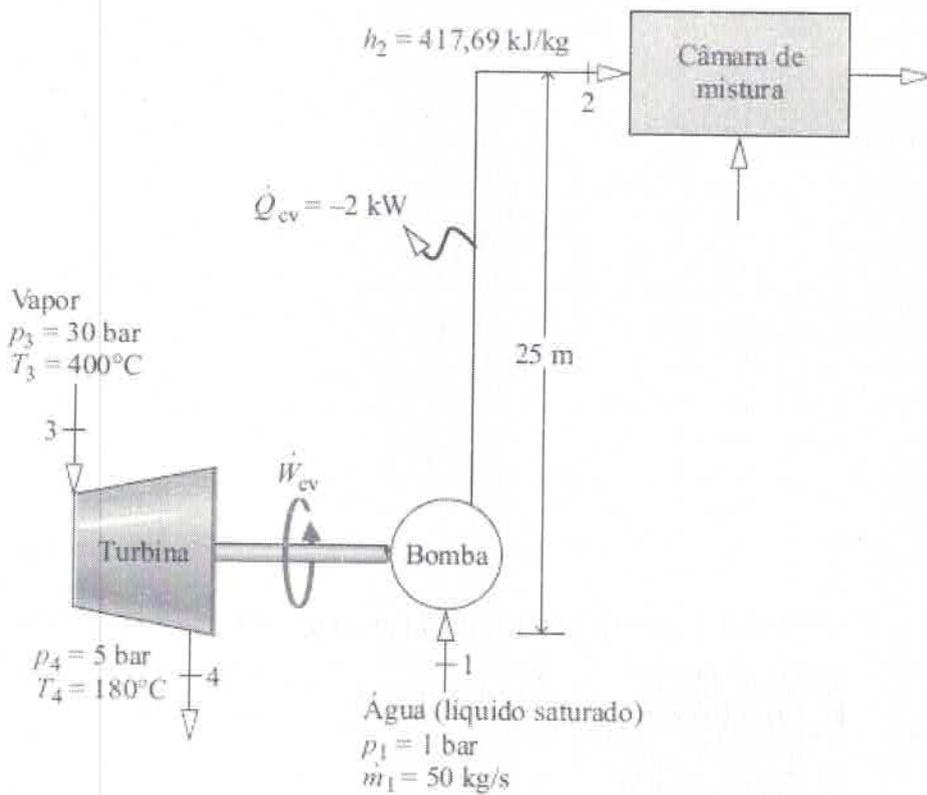


Fig. P4.99

4.100 Fluxos separados de vapor d'água e ar passam por um compressor e um trocador de calor em sistema como o representado na Fig. P4.100. Os dados para a operação em regime permanente encontram-se representados nela. A transferência de calor com as vizinhanças, bem como efeitos de energia cinética e potencial, pode ser desconsiderada, e pode-se assumir o modelo de gases ideais para o ar. Determine:

- a potência total requerida em ambos os compressores, em kW.
- a vazão mássica de água, em kg/s.

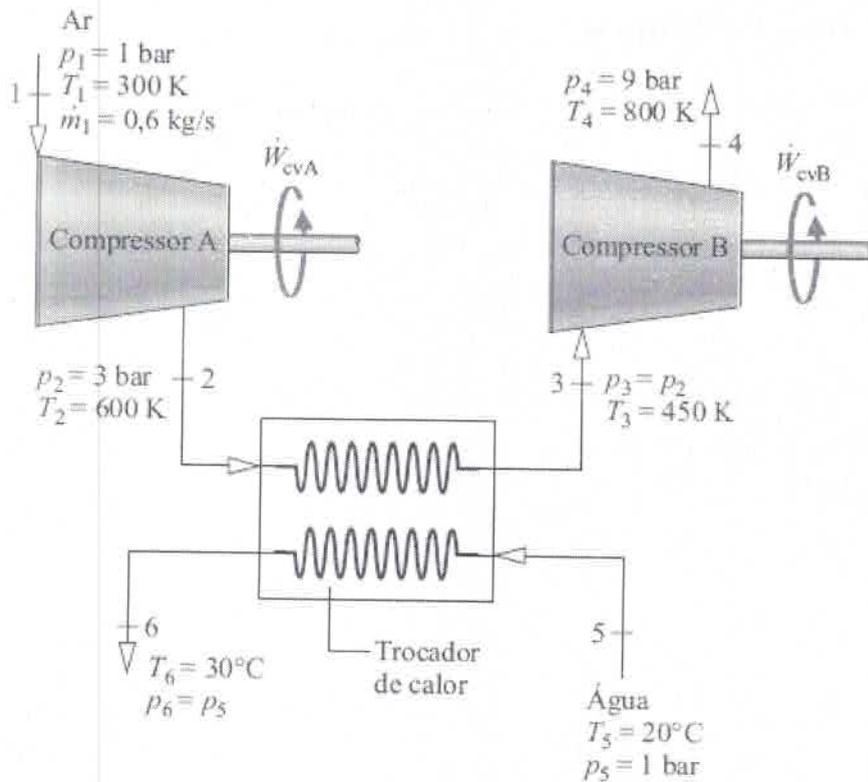


Fig. P4.100

4.101 A Fig. P4.101 ilustra um sistema de armazenamento de energia por meio de *bombagem hídrica* que opera em regime permanente, bombeando água de um reservatório com cota inferior para um reservatório com cota superior, usando a eletricidade armazenada *fora dos horários de pico* (veja a Seção 4.8.3). A água é bombeada para o reservatório superior com uma vazão volumétrica de $150 \text{ m}^3/\text{s}$, vencendo uma altura de 20 m . Não há variações significativas na temperatura, pressão ou energia cinética, entre a entrada e a saída. A transferência de calor da bomba para a vizinhança ocorre a uma taxa de $0,6 \text{ MW}$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Determine a potência requerida pela bomba, em MW. Admitindo a mesma vazão volumétrica quando o sistema gera eletricidade *nos horários de pico* usando esta água, a potência será maior, menor, ou igual a potência da bomba? Explique.

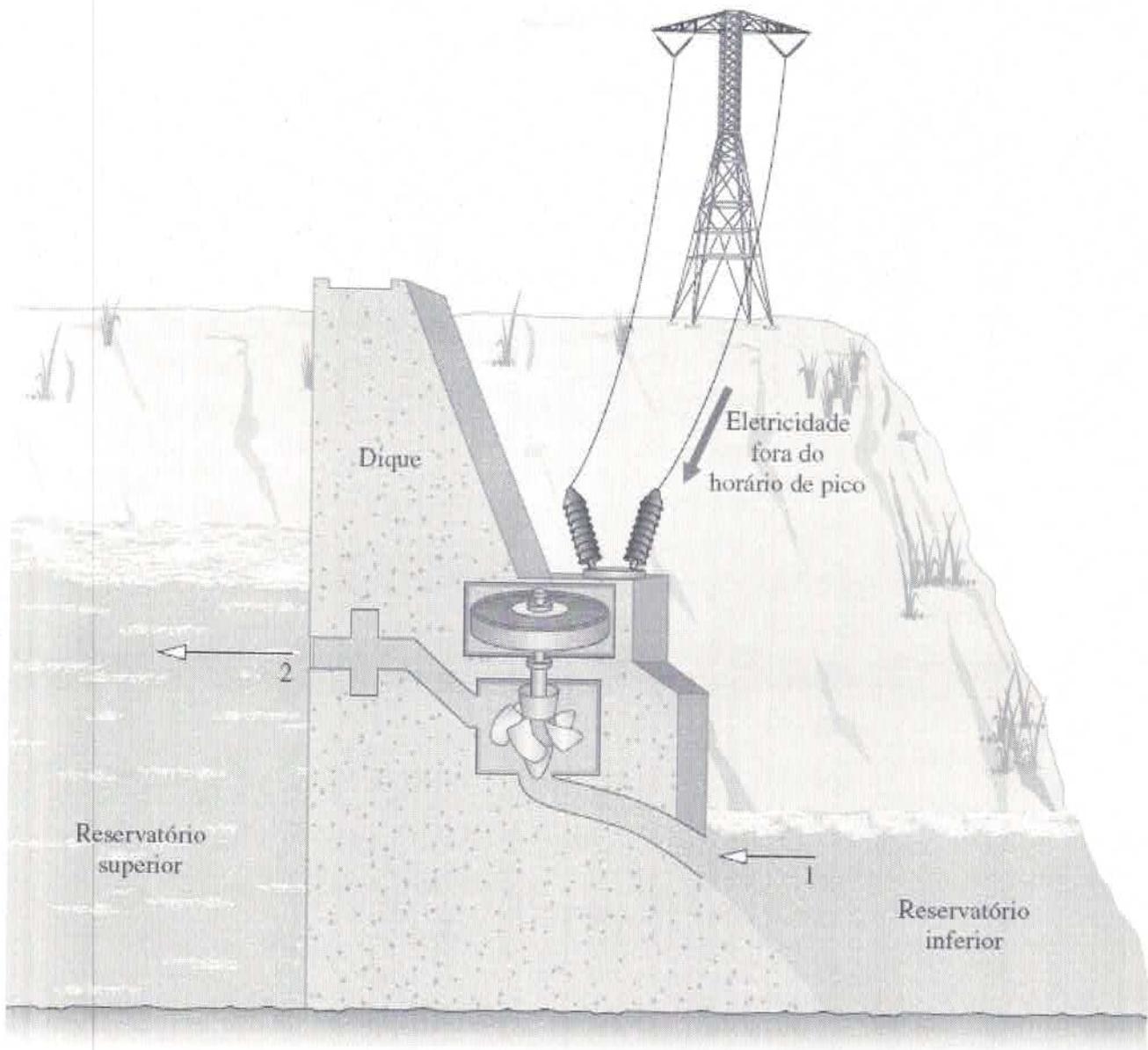


Fig. P4.101

4.102 A Fig. P4.102 fornece os dados da operação em regime permanente de uma instalação de potência a vapor simples. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine (a) a eficiência térmica e (b) a vazão mássica da água de resfriamento em kg por kg de vapor em escoamento.

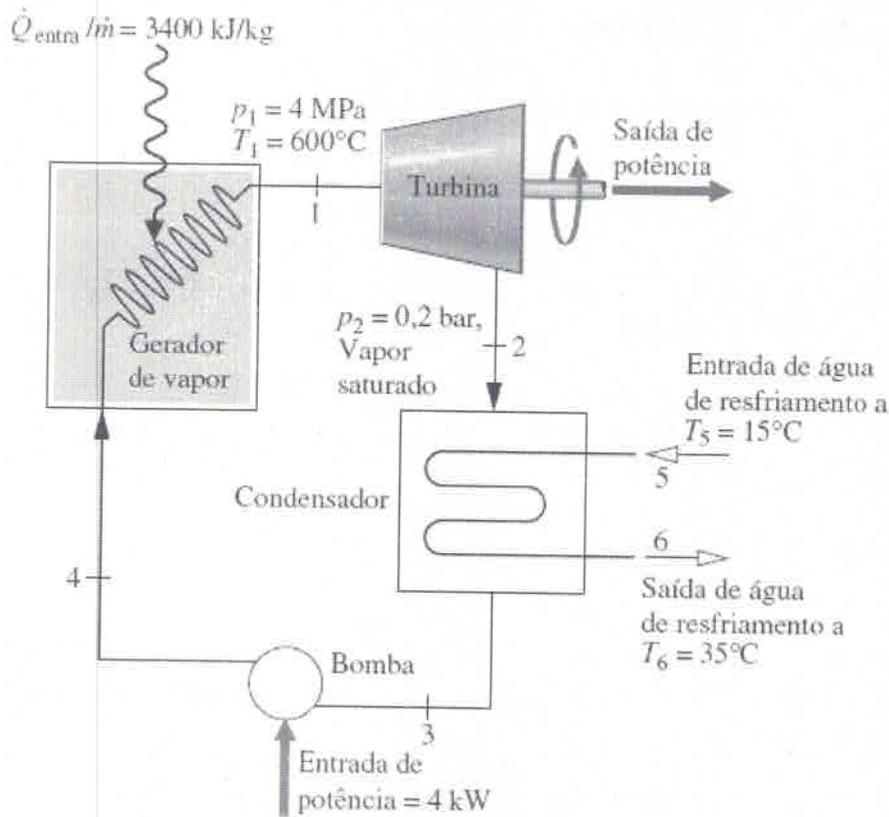


Fig. P4.102

4.103 A Fig. P4.103 fornece os dados da operação em regime permanente de um compressor e um trocador de calor. A potência de acionamento do compressor é de 50 kW. Conforme ilustrado na figura, nitrogênio (N_2) escoa pelo compressor e pelo trocador de calor com uma vazão mássica de 0,25 kg/s. O nitrogênio é modelado como um gás ideal. Um fluxo separado de hélio, modelado como um gás ideal com $k = 1,67$, também escoa pelo trocador de calor. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. Determine a vazão mássica de hélio, em kg/s.

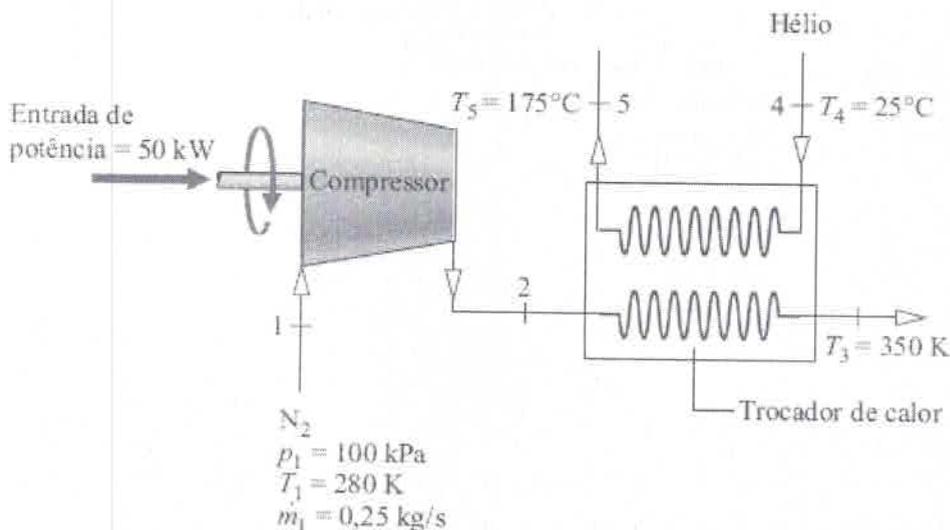


Fig. P4.103

4.104 A Fig. P4.104 fornece os dados da operação em regime permanente de um sistema de cogeração com vapor

d'água a 20 bar, 360°C, entrando pela posição 1. A potência desenvolvida pelo sistema é de 2,2 MW. Vapor de processo sai pela posição 2 e água quente para outro processo sai pela posição indicada por 3. Calcule a taxa de transferência de calor, em MW, entre o sistema e sua vizinhança. Considere $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

4.105 Conforme mostrado na Fig. P4.105, água quente de resíduos industriais a 15 bar, 180°C e com uma vazão mássica de 5 kg/s entra em um separador através de uma válvula. Líquido saturado e vapor saturado saem do separador em fluxos distintos, cada um a 4 bar. O vapor saturado entra na turbina e se expande até 0,08 bar e $x = 90\%$. As perdas de calor e os efeitos das energias cinética e potencial podem ser ignorados. Para a operação em regime permanente, determine a potência, em hp, desenvolvida pela turbina.

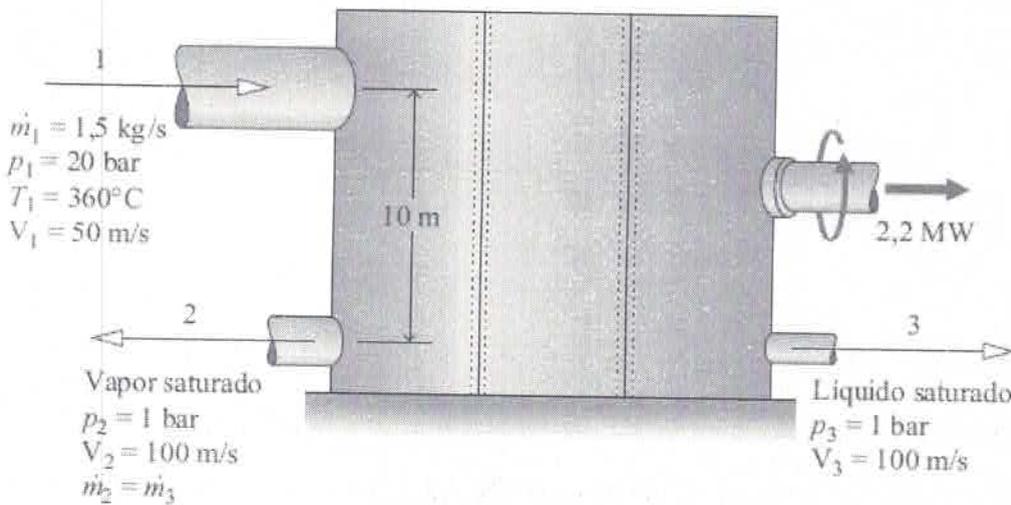


Fig. P4.104

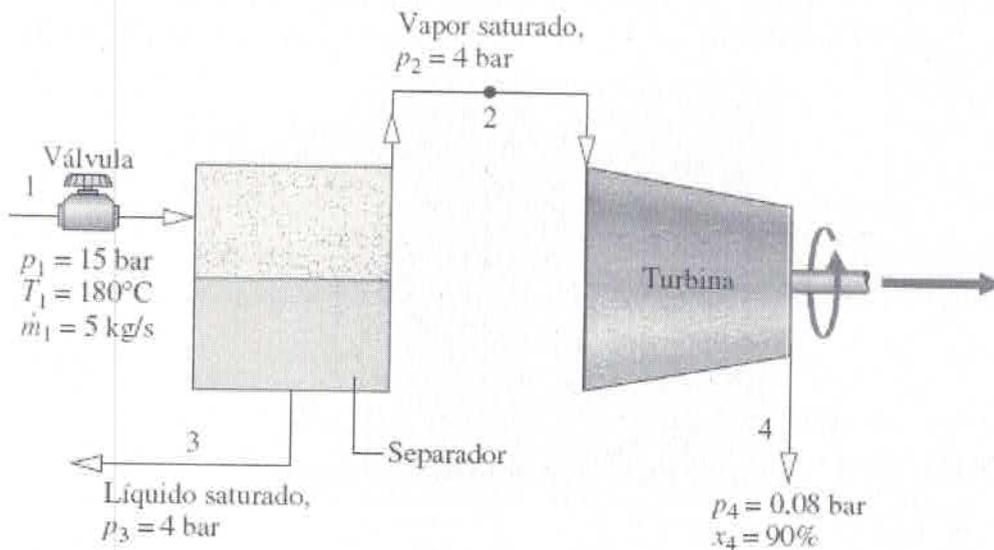


Fig. P4.105

4.106 Um ciclo de potência simples com base em uma turbina a gás operando em regime permanente, com ar como substância de trabalho, é mostrado na Fig. P4.106. Dentre os componentes do ciclo está um compressor de ar montado no mesmo eixo da turbina. O ar é aquecido no trocador de calor a alta pressão antes de entrar na turbina. O ar que sai da turbina é resfriado no trocador de calor a baixa pressão antes de retornar ao compressor. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. O compressor e a turbina operam adiabaticamente. Usando o modelo de gás ideal para o ar, determine a (a) potência requerida pelo compressor, em hp, (b) a potência de saída da turbina, em hp, e (c) a eficiência térmica do ciclo.

4.107 Um sistema de ar condicionado residencial opera em regime permanente, conforme ilustrado na Fig. P4.107. Refrigerante 22 circula nos componentes do sistema. Dados de propriedades em posições-chave são mostrados na figura. Considerando que o evaporador remove energia por transferência de calor do ar do ambiente a uma taxa de 600 Btu/min (10,5 kW), determine (a) a taxa de transferência de calor entre o compressor e a vizinhança, em Btu/min, e (b) o coeficiente de desempenho.

4.108 Fluxos separados de vapor e ar escoam ao longo do conjunto turbina-trocador de calor mostrado na Fig. P4.108. Os dados da operação em regime permanente são mostrados na figura. A transferência de calor para o ambiente pode ser desprezada, assim como todos os efeitos das energias cinética e potencial. Determine (a) T_3 , em K, e (b) a potência da segunda turbina, em kW.

Análise Transiente

4.109 Um tanque rígido, cujo volume é de 10 L, encontra-se inicialmente evacuado. Um orifício se desenvolve na parede, e ar da vizinhança a 1 bar, 25°C, é admitido até que a pressão no tanque atinja 1 bar. A transferência de calor entre os conteúdos do tanque e a vizinhança é desprezível. Admitindo o modelo de gás ideal com $k = 1,4$ para o ar, determine (a) a temperatura final no interior do tanque em °C, e (b) a quantidade de ar que penetra no tanque, em g.

4.110 Um tanque cujo volume é de 0,01 m³ encontra-se inicialmente evacuado. Um orifício se desenvolve na parede, e ar da vizinhança a 21°C, 1 bar, é admitido até que a pressão no tanque atinja 1 bar. Considerando que a temperatura final do ar no tanque é de 21°C, determine (a) a massa final no interior do tanque em g, e (b) a transferência de calor entre os conteúdos do tanque e a vizinhança, em kJ.

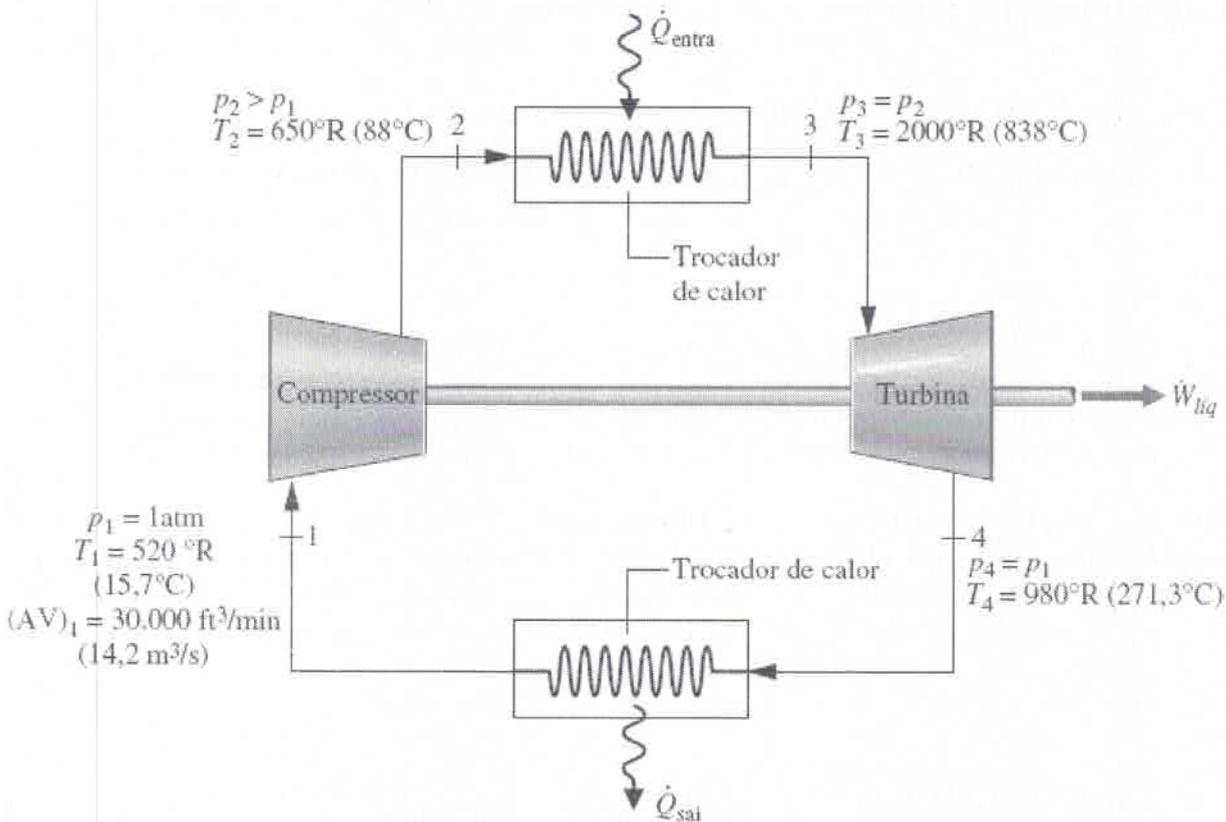


Fig. P4.106

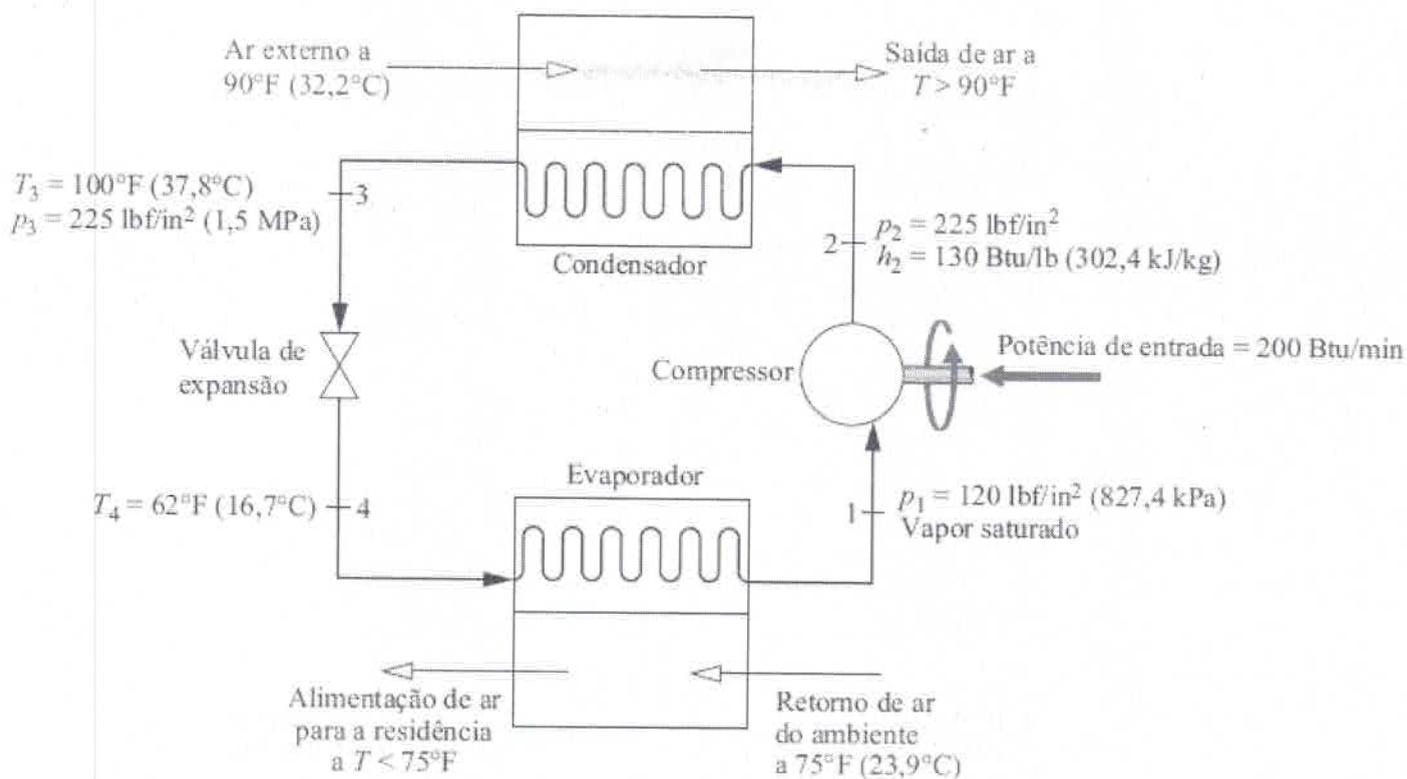


Fig. P4.107

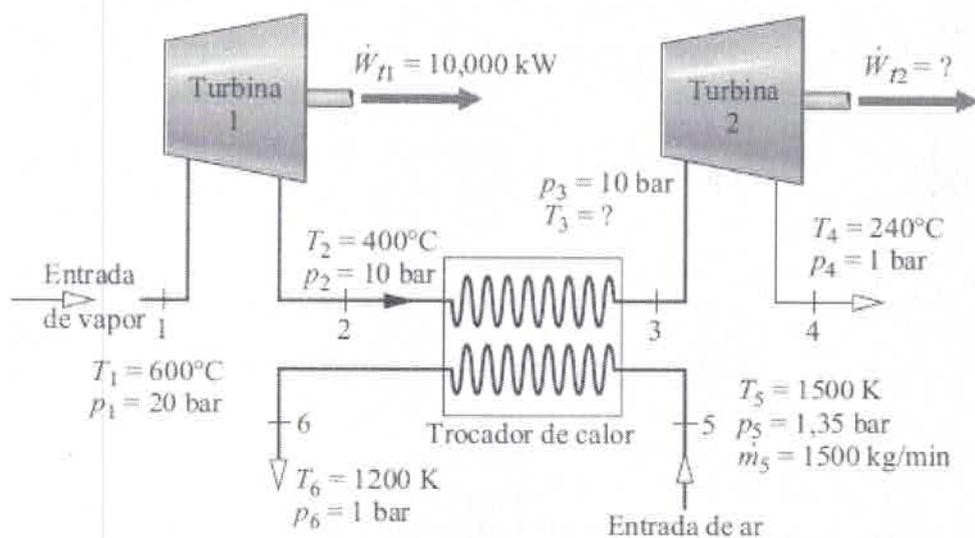


Fig. P4.108

4.111 Um tanque rígido com 2 m^3 de volume contendo ar, inicialmente a 1 bar, 295 K, é conectado por meio de uma válvula a um grande recipiente que armazena ar a 6 bar e 295 K. A válvula é aberta apenas o tempo necessário para encher o tanque com ar até uma pressão de 6 bar e uma temperatura de 350 K. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine a transferência de calor entre os conteúdos do tanque e sua vizinhança, em kJ.

4.112 Um tanque rígido e isolado de $0,5 \text{ m}^3$ de volume está conectado por meio de uma válvula a um grande recipiente contendo vapor a 40 bar, 500°C . O tanque inicialmente encontra-se evacuado. A válvula é aberta apenas o tempo necessário para encher o tanque com vapor até uma pressão de 20 bar. Determine a temperatura final do vapor no tanque, em $^\circ\text{C}$, e a massa final de vapor no tanque, em kg.

4.113 Um tanque rígido e isolado de 10 ft^3 ($0,28 \text{ m}^3$) está conectado, por meio de uma válvula, a uma grande linha de vapor através da qual o vapor escoava a 500 lbf/in^2 ($3,4 \text{ MPa}$) e 800°F ($426,7^\circ\text{C}$). O tanque inicialmente encontra-se evacuado. A válvula é aberta apenas o tempo necessário para encher o tanque com vapor até uma pressão de 500 lbf/in^2 . Determine a temperatura final do vapor no tanque, em $^\circ\text{F}$, e a massa final de vapor no tanque, em lb.

4.114 A Fig. P4.114 apresenta os dados de operação de um sistema de armazenamento de energia por meio de ar comprimido, usando a eletricidade armazenada *fora dos horários de pico* para alimentar um compressor que fornece ar pressurizado a uma caverna (veja a Seção 4.8.3). A caverna ilustrada na figura tem 10^5 m^3 de volume e inicialmente mantém ar a 290 K , 1 bar , que corresponde ao ar ambiente. Após o fornecimento de ar, o ar na caverna se encontra a 790 K e 21 bar . Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine (a) as massas inicial e final do ar na caverna, ambas em kg, e (b) o trabalho requerido pelo compressor, em GJ. Ignore a transferência de calor e os efeitos das energias cinética e potencial.

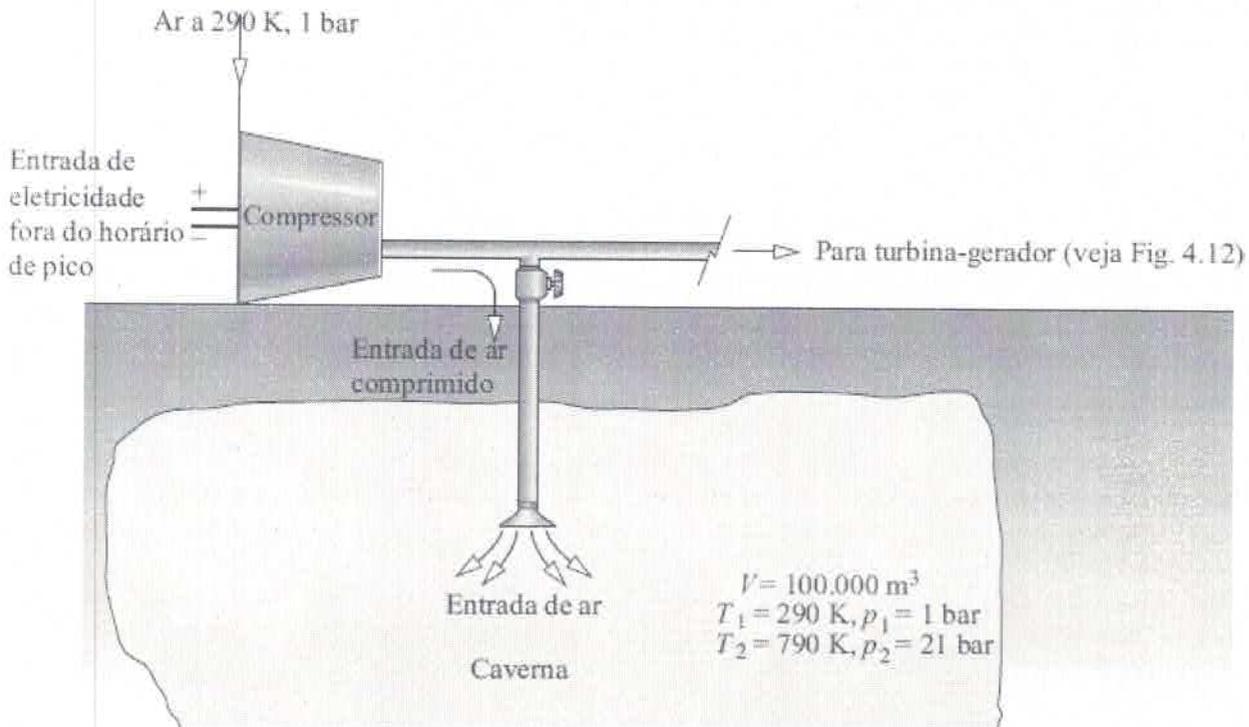


Fig. P4.114

4.115 Um tanque rígido de $0,5 \text{ m}^3$ de volume contém amônia inicialmente a 20°C , $1,5 \text{ bar}$, e encontra-se conectado, por meio de uma válvula, a uma grande linha de alimentação que transporta amônia a 12 bar , 60°C . A válvula é aberta apenas o tempo necessário para encher o tanque com amônia adicional, levando a massa total de amônia no tanque a $143,36 \text{ kg}$. No estado final, o tanque contém uma mistura bifásica líquido-vapor a 20°C . Determine a transferência de calor entre os conteúdos do tanque e a vizinhança, em kJ, ignorando os efeitos das energias cinética e potencial.

4.116 Conforme ilustrado na Fig. P4.116, um tanque de $247,5 \text{ ft}^3$ (7 m^3) contém vapor d'água saturado inicialmente a 30 lbf/in^2 ($206,8 \text{ kPa}$). O tanque está conectado a uma grande linha através da qual o vapor d'água escoava a 180 lbf/in^2 ($1,24 \text{ MPa}$) e 450°F ($232,2^\circ\text{C}$). Vapor d'água escoava no tanque através de uma válvula até que $2,9 \text{ lb}$ do vapor tenham sido adicionados ao tanque. Nesse instante a válvula é fechada e a pressão no tanque é 40 lbf/in^2 . Determine o volume específico, em ft^3/lb , no estado final do volume e a magnitude e a direção da troca de calor entre o tanque e sua vizinhança, em Btu.

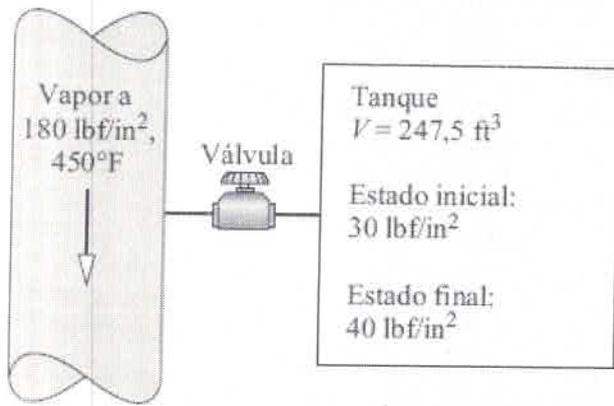


Fig. P4.116

4.117 Um tanque rígido de cobre contendo inicialmente 1 m^3 de ar a 295 K , 5 bar , encontra-se conectado, por meio de uma válvula, a uma grande linha de alimentação que transporta ar a 295 K , 15 bar . A válvula é aberta apenas o tempo necessário para encher o tanque com ar até uma pressão de 15 bar . No estado final, o ar no tanque se encontra a 310 K . O tanque de cobre, cuja massa é de 20 kg , está a mesma temperatura do ar no tanque, nos estados inicial e final. O calor específico do cobre é $c = 0,385 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Admitindo o comportamento de gás ideal para o ar, determine (a) as massas inicial e final do ar no tanque, ambas em kg , e (b) a transferência de calor do tanque e seus conteúdos para a vizinhança, em kJ , ignorando os efeitos das energias cinética e potencial.



4.118 Um tanque rígido e isolado contendo inicialmente $0,4 \text{ m}^3$ de vapor d'água saturado a $3,5 \text{ bar}$, é conectado por meio de uma válvula a um grande recipiente que armazena vapor a 15 bar e 320°C . A válvula é aberta apenas o tempo necessário para levar a pressão do tanque a 15 bar . Determine, para os conteúdos do tanque, a temperatura final, em $^\circ\text{C}$, e a massa final, em kg .

4.119 Um tanque rígido e bem isolado, cujo volume inicial é de $0,9 \text{ m}^3$, encontra-se inicialmente evacuado. No tempo $t = 0$, ar da vizinhança a 1 bar , 27°C , começa a fluir para o interior do tanque. Um resistor elétrico transfere energia para o ar no tanque durante 5 min e, nesse instante, a pressão no tanque é 1 bar e $T = 457^\circ\text{C}$. Qual é a potência transferida, em KW ?



4.120 Um tanque rígido e bem isolado de 15 m^3 de volume está conectado a uma grande linha através da qual o vapor d'água escoia a 1 MPa e 320°C . O tanque inicialmente encontra-se evacuado. Vapor d'água escoia no tanque até que a pressão em seu interior seja igual a p .

(a) Determine a quantidade de massa no tanque, em kg , e a temperatura, em $^\circ\text{C}$, quando $p = 500 \text{ KPa}$.

(b) Esboce graficamente as grandezas do item (a) versus p no intervalo entre 0 e 500 KPa .



4.121 Um aquecedor de água com capacidade de 50 galões ($189,27 \text{ L}$) encontra-se representado na Fig. P4.121. A água no interior do tanque tem uma temperatura inicial de 120°F ($48,9^\circ\text{C}$). Quando a torneira de um chuveiro é aberta, a água flui do tanque a uma vazão de $0,47 \text{ lb/s}$ ($213,2 \text{ g/s}$) e é adicionada água a 40°F ($4,4^\circ\text{F}$) para preencher novamente o tanque, a partir de um sistema de distribuição externo. A água no tanque recebe energia a uma taxa de 40.000 Btu/h ($42,2 \text{ MJ}$), a partir de uma resistência elétrica. Se a água no interior do tanque estiver eficientemente misturada, a temperatura pode ser considerada uniforme por todo o volume. O tanque é bem isolado e podem ser

desconsideradas as perdas de energia por dispersão térmica com as vizinhanças. Desprezando efeitos de energia cinética e potencial, assumindo também como desprezível a variação de pressão entre a entrada e a saída do tanque, e assumindo o modelo de substância incompressível para a água, com densidade $62,28 \text{ lb/ft}^3$ ($997,63 \text{ kg/m}^3$) com capacidade calorífica $1,0 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$ ($4,1868 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$), esboce um gráfico da temperatura da água, em $^\circ\text{F}$, contra o tempo, em um intervalo de $t = 0$ até $t = 20 \text{ min}$.

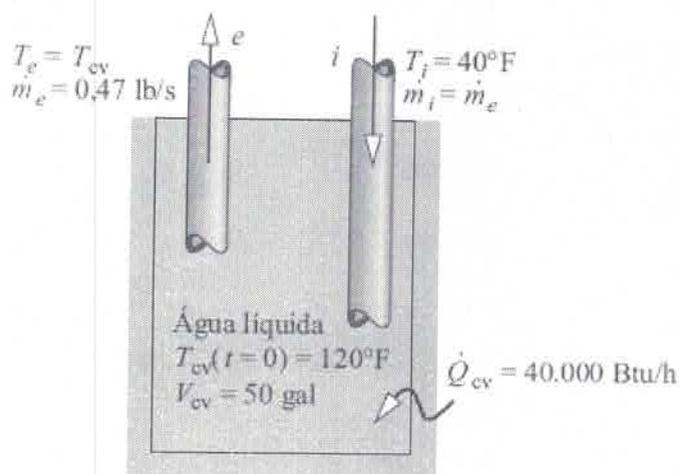


Fig. P4.121

4.122 Um tanque rígido de $0,1 \text{ m}^3$ de volume inicialmente contém uma mistura bifásica líquido-vapor de água a 1 bar e 1% de título. A água é aquecida em dois estágios:

Estágio 1: Aquecimento a volume constante até a pressão de 20 bar.

Estágio 2: Continuação do aquecimento, enquanto o vapor d'água saturado é lentamente retirado do tanque a uma pressão constante de 20 bar. O aquecimento cessa quando toda a água restante no tanque se encontrar como vapor saturado a 20 bar.

Calcule para a água a transferência de calor, em kJ, para ambos os estágios de aquecimento. Ignore os efeitos das energias cinética e potencial.



4.123 Um tanque rígido e isolado de 50 ft^3 ($1,4 \text{ m}^3$) de volume inicialmente contém uma mistura bifásica líquido-vapor de amônia a 100°F ($37,8^\circ\text{C}$) e 1,9% de título. Vapor saturado é removido lentamente do tanque até que a mistura bifásica líquido-vapor de amônia permaneça a 80°F ($26,7^\circ\text{C}$). Determine as massas inicial e final de amônia no tanque, ambas em lb.

4.124 Uma panela de pressão com um volume de $0,011 \text{ m}^3$ contém, inicialmente, uma mistura líquido-vapor de água a uma temperatura de 100°C , com título 10%. À medida que a água é aquecida sob volume constante, a pressão aumenta para 2 bar e o título aumenta para 18,9%. Com a continuação do aquecimento, a válvula de controle de pressão mantém o sistema constante no interior da panela em 2 bar permitindo que o vapor, nessa pressão (2 bar), escape do sistema. Desconsiderando efeitos de energia cinética e potencial,

(a) determine o título da água no estado inicial para o qual inicia o escape do vapor (estado 2) e a quantidade de calor transferido, em kJ, até alcançar este estado.

(b) determine a massa de água final na panela, em kg, e a quantidade adicional de calor transferido, em kJ, se o aquecimento continuasse do estado 2 até que o título seja 1,0.

(c) elabore um gráfico das duas propriedades solicitadas no item (b) em função do título, aumentando entre o estado 2 e 100%.



4.125 Um tanque rígido bem isolado, cujo volume é de 8 ft^3 ($0,23 \text{ m}^3$), inicialmente contém CO_2 a 180°F ($82,2^\circ\text{C}$) e 40 lbf/in^2 ($275,8 \text{ kPa}$). Uma válvula conectada ao tanque é aberta e CO_2 é retirado lentamente, até que a pressão no interior do tanque baixe para p . Um resistor elétrico no interior do tanque mantém a temperatura em 180°F . Modelando o CO_2 como um gás ideal e negligenciando os efeitos das energias potencial e cinética,

(a) determine a massa de CO_2 retirada, em lb, e a energia fornecida ao resistor, em Btu, quando $p = 22 \text{ lbf/in}^2$ ($151,7 \text{ kPa}$).

(b) esboce graficamente as grandezas do item (a) *versus* p no intervalo entre 15 e 40 lbf/in^2 ($103,4 \text{ kPa}$ e $275,8 \text{ kPa}$).



4.126 Um tanque de $1,2 \text{ m}^3$ de volume inicialmente contém vapor d'água a 8 MPa e 400°C . Vapor d'água é retirado lentamente do tanque até que a pressão caia para p . A transferência de calor dos produtos do tanque mantém a temperatura constante em 400°C . Abandonando todos os efeitos das energias cinética e potencial e considerando a entalpia específica do vapor que sai leveal em relação à massa no tanque,

(a) determine a transferência de calor, em kJ, se $p = 2 \text{ MPa}$.

(b) esboce graficamente a transferência de calor, em kJ, *versus* p entre 0,5 e 8 MPa .



4.127 Uma panela convencional contém $0,5 \text{ L}$ de água a 20°C e 1 bar , ela é posicionada acima de um queimador de fogão. Uma vez que o queimador é acionado, a água é gradualmente aquecida a uma taxa de $0,85 \text{ kW}$, enquanto a pressão é mantida constante. Após algum tempo, inicia-se a ebulição da água, que continua até que toda a massa seja evaporada. Determine

(a) o tempo necessário para iniciar a evaporação, em s.

(b) o tempo necessário para evaporar completamente a água, após o início da ebulição, em s.

4.128 Um tanque rígido de 1 m^3 contém gás nitrogênio inicialmente a 10 bar , 300 K . A transferência de calor para os produtos do tanque ocorre até que a temperatura tenha se elevado para 400 K . Durante o processo, uma válvula de alívio de pressão permite que o nitrogênio escape mantendo a pressão constante no tanque. Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial e usando o modelo de gás ideal com calores específicos constantes e avaliados a 350 K , determine a massa de nitrogênio, em kg, que escapou juntamente com a quantidade de energia transferida por calor, em kJ.



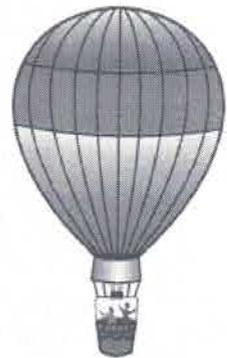
4.129 De modo a conservar os equipamentos, o suprimento de ar de um escritório de 2000 ft^3 ($56,6 \text{ m}^3$) é fechado durante a noite e a temperatura ambiente cai para 40°F ($4,4^\circ\text{C}$). Pela manhã, um funcionário regula o termostato para 70°F ($21,1^\circ\text{C}$), e $200 \text{ ft}^3/\text{min}$ ($0,09 \text{ m}^3/\text{s}$) de ar a 120°F ($48,9^\circ\text{C}$) começam a escoar através de uma linha de alimentação. O ar é bem misturado no interior do ambiente, e uma vazão mássica de ar à temperatura ambiente é retirada através de um duto de retorno. A pressão do ar é praticamente igual a 1 atm no processo. Ignorando a

transferência de calor para a vizinhança e os efeitos das energias cinética e potencial, estime o tempo necessário para que a temperatura do ambiente atinja 70°F. Esboce graficamente a temperatura do ambiente como uma função do tempo.

4.130 O procedimento para inflar um balão de ar quente requer um ventilador para deslocar uma quantidade inicial de ar para dentro dele, seguido por uma transferência de calor, proporcionada por um sistema de queima de propano para completar o processo. Após o funcionamento do ventilador por 10 minutos, com uma transferência de calor desprezível em relação às vizinhanças, o ar em um balão inicialmente vazio alcança uma temperatura de 80°F (26,7°C) e um volume de 49.100 ft³ (1390,36 m³). Nesse estágio, o queimador de propano fornece energia por transferência de calor à medida que o ar continua a fluir para dentro do balão, sem a utilização do ventilador, até que o ar no balão alcance um volume de 65.425 ft³ (1852,63 m³) e uma temperatura de 210°F. O ar externo ao balão tem uma temperatura de 77°F (98,9°C) e uma pressão de 14,7 lbf/in² (101,3 kPa). A taxa líquida de transferência de calor é 7×10^6 Btu/h ($7,385 \times 10^6$ kJ/h). Ignorando efeitos de energia cinética e potencial, assumindo o comportamento ideal para o ar e assumindo que a pressão no interior do balão permanece igual àquela do ar que o cerca, determine:

(a) a potência necessária para o funcionamento do ventilador, em hp.

(b) o tempo necessário para inflar completamente o balão, em min.



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

4.1P Usando a internet, identifique no mínimo cinco aplicações médicas da tecnologia *MEMS*. Em cada caso, explique a base científica e tecnológica para a aplicação, discuta o estado atual da pesquisa e determine quão perto a tecnologia está em termos de comercialização. Escreva um relatório com os resultados de sua pesquisa incluindo, no mínimo, três referências.

4.2P Um grupo de células, chamadas células do *nó sinusal*, funciona como um marcapasso natural do coração, controlando o batimento cardíaco. Uma disfunção do nó sinusal dá origem à condição médica conhecida como *arritmia* cardíaca: batimento cardíaco irregular. As arritmias significativas são tratadas de várias maneiras, incluindo o uso de um marcapasso artificial, que é um dispositivo elétrico que envia os sinais necessários para fazer o coração

bater corretamente. Pesquise como os marcapassos natural e artificial operam para atingir o objetivo de manter o batimento cardíaco regular. Coloque o resultado de sua pesquisa em um relatório, incluindo esboços de cada tipo de marcapasso.

4.3P Conduza um projeto com prazo estabelecido focado no uso das turbinas para *baixas velocidades* de vento para satisfazer as necessidades de eletricidade de pequenas empresas, fazendas ou vizinhanças selecionadas por seu grupo de projeto ou designadas para ele. Você pode levar diversos dias para pesquisar sobre o projeto e, então, preparar uma breve propos-ta com a descrição da finalidade, de uma lista dos objetivos e das diversas referências utilizadas. Como parte da sua proposta anote as medições locais da velocidade do vento de pelo menos três dias diferentes para atingir uma boa correspondência entre os requisitos das turbinas para baixas velocidades de vento candidatas e as condições locais. Sua pro-posta também deve reconhecer a necessidade do cumprimento dos códigos de zoneamento em vigor. Durante o projeto, observe os procedimentos para um bom projeto, como os discutidos na Seção 1.3 do *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1996, por A. Bejan, G. Tsatsaronis e M. J. Moran. Escreva um relatório final bem documentado, incluindo uma avaliação da viabilidade econômica da turbina selecionada para a aplicação considerada.

4.4P A geração de eletricidade por meio do aproveitamento das correntes, marés e ondas tem sido mundialmente estudada. A eletricidade pode ser gerada a partir das correntes usando turbinas marítimas, conforme ilustrado na Fig. P4.4P. A eletricidade também pode ser gerada a partir do *movimento de ondulação* das ondas usando boias ligadas a um sistema. Meios semelhantes podem ser usados para gerar energia a partir do movimento das marés. Embora as correntes e as ondas tenham sido por muito tempo utilizadas para alcançar uma escala relativamente modesta de potência, atualmente muitos observadores estão pensando nos sistemas de geração de potência em larga escala. Alguns veem os oceanos como provedores de uma fonte quase ilimitada e renovável de potência. Avalie de maneira crítica a viabilidade da geração de potência em larga escala a partir das correntes e/ou das ondas até 2025, considerando as águas costeiras, os estuários ou os rios de um local dos Estados Unidos. Considere os fatores técnicos e econômicos e os efeitos sobre o ecossistema. Escreva um relatório incluindo no mínimo três referências.

4.5P Em virtude do tamanho relativamente compacto, da construção simples e da modesta necessidade de energia, as bombas de sangue do tipo centrífuga estão sob consideração com relação a diversas aplicações médicas. Apesar disso, as bombas centrífugas têm obtido sucesso limitado por enquanto para fluxo sanguíneo porque podem causar danos às células do sangue e estão sujeitas a falha mecânica. A meta dos esforços atuais de desenvolvimento é um dispositivo com biocompatibilidade a longo prazo, desempenho e confiabilidade suficientes para possibilitar uma ampla utilização. Investigue o estado de desenvolvimento da bomba de sangue centrífuga, inclusive identificando os principais desafios técnicos e as possibilidades de superá-los. Resuma os resultados de sua pesquisa em um relatório incluindo no mínimo três referências.

4.6P Elabore um experimento para determinar a energia (em kW-h) necessária para evaporar completamente uma quantidade fixa de água. Para este experimento, determine procedimentos, por escrito, que incluam a identificação de todos os equipamentos necessários e todas as especificações de cálculos a serem realizados. Conduza o experimento proposto, organizando seus resultados em um relatório.

4.7P Realize um levantamento de informações sobre o sistema de água no seu município. Elabore um diagrama que seja capaz de mapear a água, desde sua fonte original, através do sistema de tratamento, estocagem e sistemas distribuição, até os sistemas de coleta de esgoto, tratamento e eliminação. Identifique etapas desses processos que operem em regime permanente e em regime transiente, os dispositivos envolvidos e incorporados nesses sistemas para alcançar o fluxo, a estocagem e o tratamento necessários. Resuma seu levantamento em uma apresentação.

4.8P A literatura técnica contém discussões sobre as formas de utilização de sistemas de turbinas eólicas com espécies de pipas presas a cabos para captar a energia dos ventos de altas altitudes, incluindo correntes de jatos em altitudes de 6 a 15 km (4 a 9 milhas). Analistas estimam que se esses sistemas forem implantados em número suficiente, poderiam atender a uma parcela significativa da demanda total de eletricidade dos Estados Unidos. Avalie criticamente a viabilidade de um desses sistemas, selecionado a partir da literatura existente, estar totalmente operacional até 2025. Considere os meios para implantar o sistema para a altitude apropriada, como a potência desenvolvida é transferida para a terra, os requisitos de infraestrutura, o impacto ambiental, os custos e outras

questões pertinentes. Escreva um relatório com pelo menos três referências.

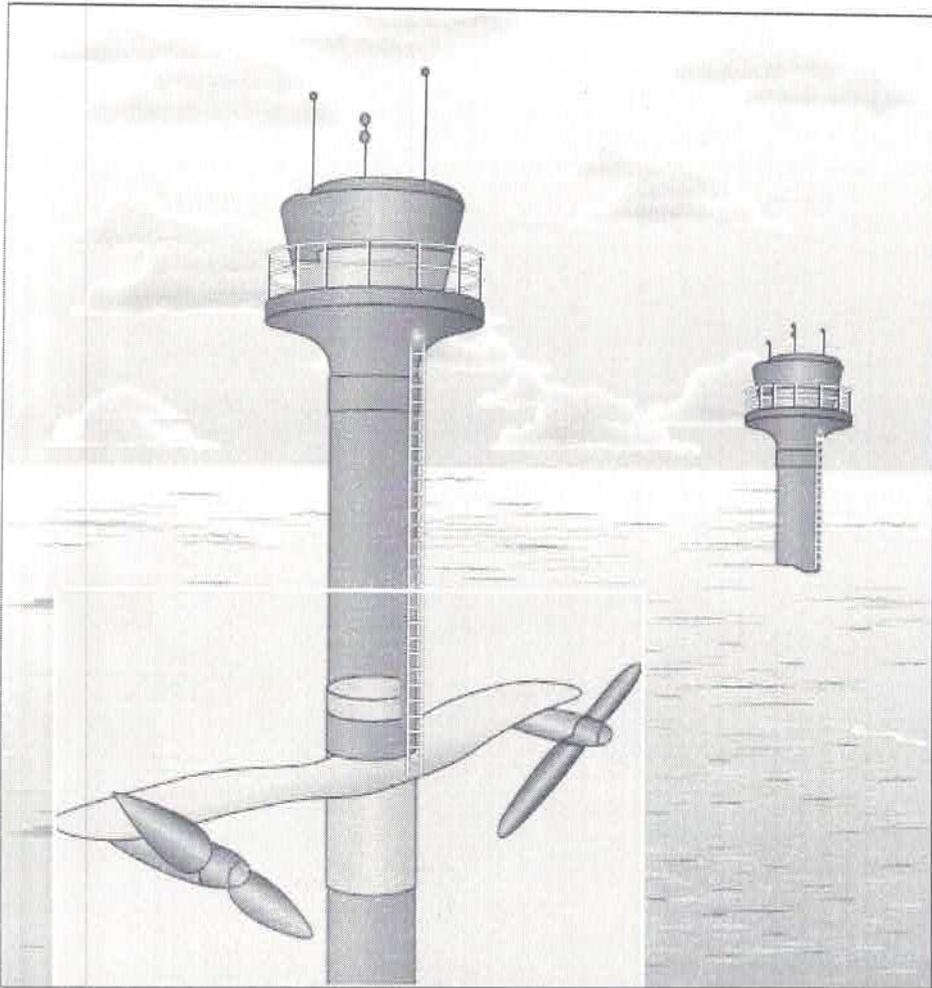


Fig. P4.4p

4.9P Faça uma *engenharia reversa* em um secador de cabelos portátil, desconectando o dispositivo em seus componentes individuais. Disponha os componentes em uma prancheta de apresentação para ilustrar como estas partes são conectadas no dispositivo, nomeando cada uma delas. Próximo a cada componente, identifique sua função e descreva o seu princípio fundamental de operação (quando for o caso). Inclua uma representação do fluxo de massa e energia através do secador de cabelo quando em operação. Realize uma apresentação utilizando a montagem sobre a prancheta.

4.10P *Sistemas integrados* residenciais capazes de gerar eletricidade e fornecer o aquecimento do espaço e o aquecimento de água irão reduzir a dependência da eletricidade fornecida pelas instalações centrais de potência. Para uma residência de 2500 ft² (232,3 m²) em sua região, avalie duas tecnologias alternativas para o fornecimento de energia e aquecimento combinados: um sistema que se baseia na energia solar e um sistema com célula combustível alimentada por meio de gás natural. Para cada alternativa especifique o equipamento, avalie os custos, considerando o custo do sistema inicial, o custo de instalação e o custo operacional. Compare o custo total com o custo relacionado aos meios convencionais para o fornecimento de energia e o aquecimento da residência. Escreva um relatório com um resumo da sua análise, recomendando uma ou ambas as opções se elas forem preferíveis em comparação com os meios convencionais.

4.11P A *Fig. P4.11P* fornece o esquema de um dispositivo para a produção de um gás combustível para transporte a partir da biomassa. Embora diversos tipos de biomassa sólida possam ser empregados nos projetos dos gaseificadores atuais, utilizam-se normalmente cavacos de madeira. Os cavacos são introduzidos no topo da unidade

de gaseificação. Abaixo desse nível de profundidade os cavacos reagem com o oxigênio na combustão do ar para produzir carvão. No próximo nível de profundidade o carvão reage com os gases quentes da combustão do estágio da formação de carvão para produzir um gás combustível consistindo basicamente em hidrogênio, monóxido de carbono e nitrogênio a partir da combustão do ar. O gás combustível é então resfriado, filtrado e conduzido ao motor de combustão interna pelo gaseificador. Avalie criticamente a conveniência dessa tecnologia atualmente para transporte no caso de uma escassez de petróleo prolongada em sua região. Documente suas conclusões em um relatório.

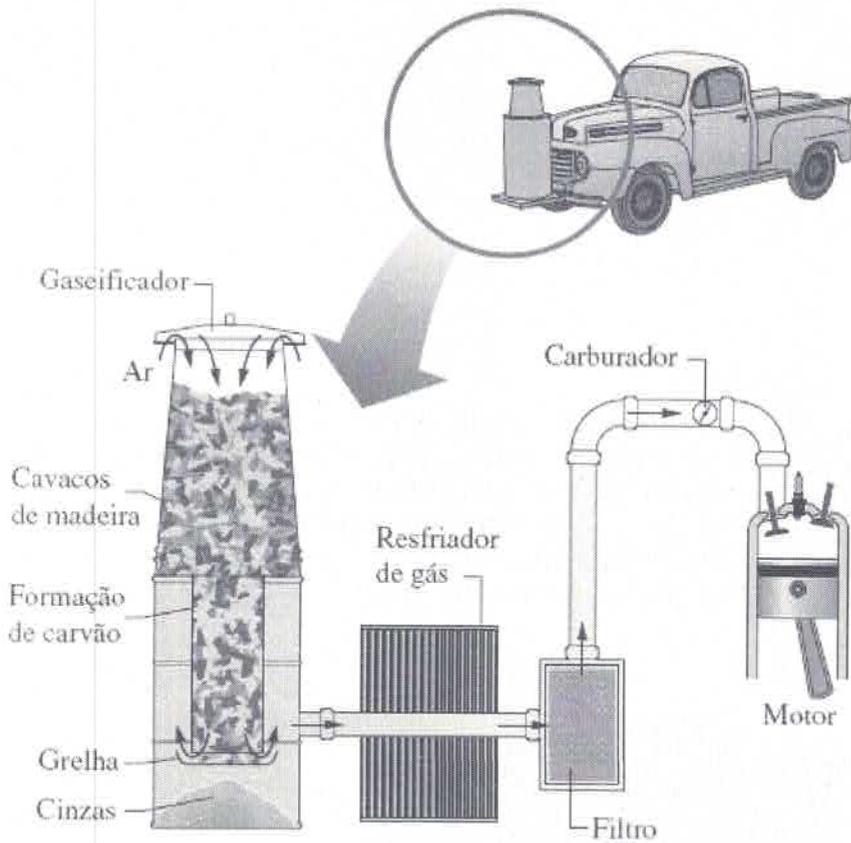
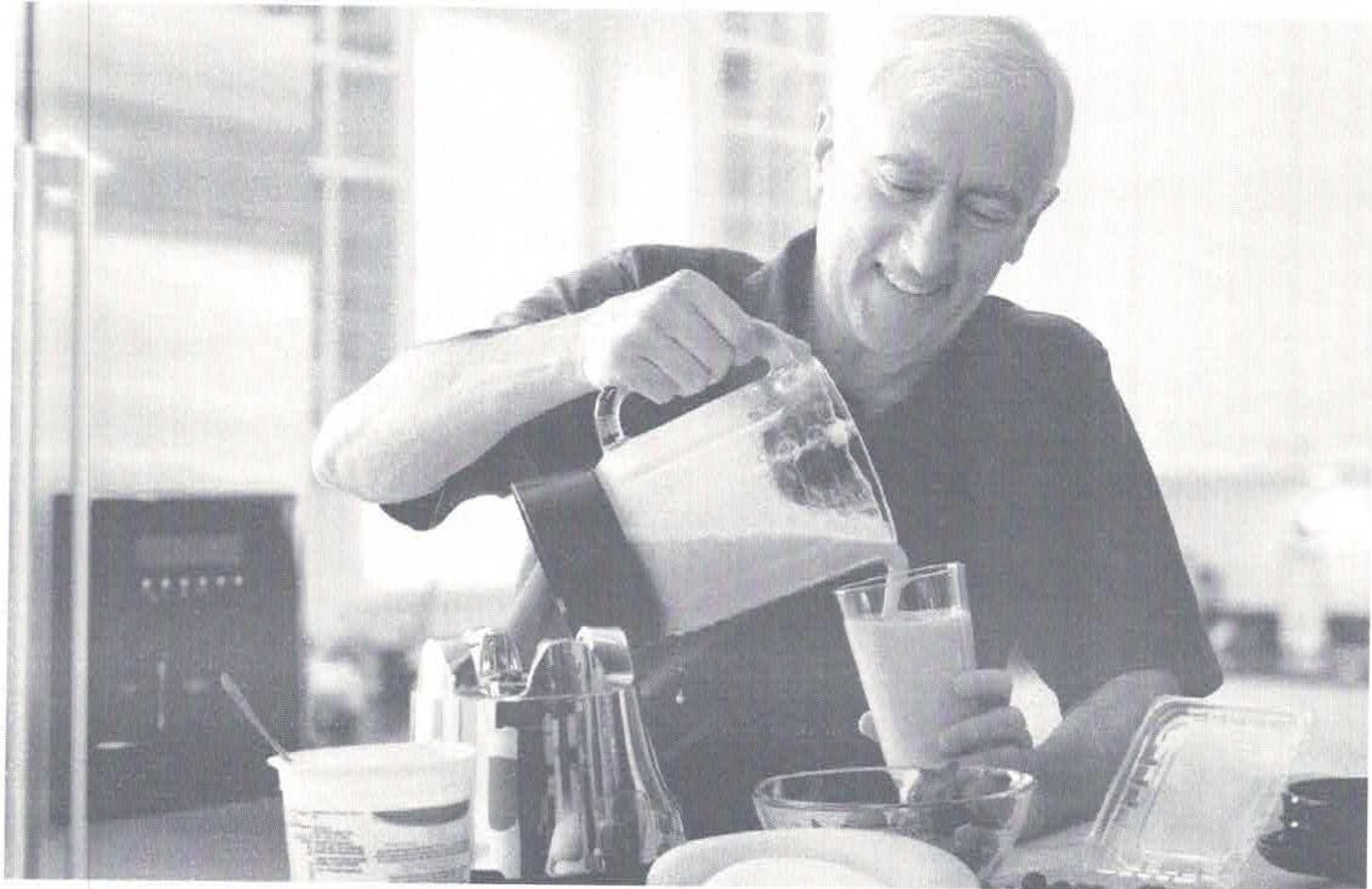


Fig. P4.11p



A mistura de diferentes substâncias em composições ou estados diferentes é uma das diversas irreversibilidades consideradas na Seção 5.3. ©Select Stock/iStockphoto.

CONTEXTO DE ENGENHARIA Até agora este texto considerou a análise termodinâmica utilizando os princípios da conservação de massa e da conservação de energia, juntamente com as relações entre as propriedades. Nos Caps. 2 a 4 esses fundamentos são aplicados a situações de complexidade crescente. Entretanto, os princípios de conservação nem sempre são suficientes, e frequentemente a segunda lei da termodinâmica faz-se também necessária para a análise termodinâmica. O **objetivo** deste capítulo é introduzir a segunda lei da termodinâmica. Algumas deduções que podem ser chamadas de corolários da segunda lei também são consideradas, incluindo os limites de desempenho para ciclos termodinâmicos. A apresentação em questão fornece a base para desenvolvimentos subsequentes envolvendo a segunda lei nos Caps. 6 e 7.