

# 1

---

## Conceitos Introdutórios e Definições

### ▶ RESULTADOS DE APRENDIZAGEM

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

- ▶ demonstrar conhecimento de diversos conceitos fundamentais usados ao longo deste livro... incluindo sistema fechado, volume de controle, fronteira e vizinhanças, propriedade, estado, processo, a distinção entre propriedades extensivas e intensivas, e equilíbrio.
- ▶ aplicar as unidades SI e as unidades inglesas de engenharia, incluindo as unidades para o volume específico, a pressão e a temperatura.
- ▶ trabalhar com as escalas de temperatura Kelvin, Rankine, Celsius e Fahrenheit.
- ▶ aplicar os fatores de conversão de unidades adequadas em cálculos.
- ▶ aplicar a metodologia de solução de problemas usada neste livro.

### 1.1 Usando a Termodinâmica

Os engenheiros utilizam os princípios extraídos da termodinâmica e de outras ciências da engenharia, tais como a mecânica dos fluidos e a transmissão de calor e massa, para analisar e projetar sistemas com o objetivo de atender às necessidades humanas. Ao longo do século XX, as aplicações da termodinâmica na engenharia ajudaram a abrir caminho para melhorias significativas na nossa qualidade de vida com avanços em áreas importantes, como viagens aéreas, voos espaciais, transporte de superfície, geração e transmissão de eletricidade, construções com sistemas de aquecimento e refrigeração, e aperfeiçoaram as práticas médicas. O amplo espectro de aplicações desses princípios está sugerido na [Tabela 1.1](#).

No século XXI, os engenheiros irão criar a tecnologia necessária para alcançar um futuro sustentável. A termodinâmica continuará a avançar quanto ao bem-estar humano, abordando iminentes desafios sociais, devido ao declínio das fontes dos recursos energéticos: petróleo, gás natural, carvão e material fósil; aos efeitos da mudança climática global e ao aumento populacional. A vida nos Estados Unidos deverá mudar em vários aspectos importantes até meados do século. Na área de uso de energia, por exemplo, a eletricidade terá um papel ainda maior do que o atual. A [Tabela 1.2](#) fornece previsões de outras alterações que especialistas dizem que serão observadas.

Se esta visão de vida de meados do século estiver correta, será necessária a rápida evolução da nossa postura atual de energia. Como no caso do século XX, a termodinâmica contribuirá significativamente para enfrentar os desafios do século XXI, incluindo o uso de combustíveis fósseis de forma mais eficaz, o avanço das tecnologias envolvendo

energia renovável e o desenvolvimento de sistemas de transporte, de construção e de práticas industriais mais eficientes em termos energéticos. A Termodinâmica também desempenhará um papel importante na atenuação do aquecimento global, da poluição atmosférica e da água. Serão observadas aplicações na bioengenharia, nos sistemas de biomédicos, e a implantação da nanotecnologia. Este livro fornece as ferramentas necessárias para especialistas que trabalham em todos esses campos. Para os não especialistas, o livro fornece o conhecimento para a tomada de decisões que envolvam tecnologia relacionada com termodinâmica — no trabalho, como cidadãos informados e como líderes de governo e políticos.

## 1.2 Definindo Sistemas

Um passo-chave inicial em qualquer análise em engenharia consiste em descrever de forma precisa o que está sendo estudado. Em mecânica, se a trajetória de um corpo deve ser determinada, normalmente o primeiro passo é definir um *corpo livre* e identificar todas as forças exercidas por outros corpos sobre ele. A segunda lei do movimento de Newton é então aplicada. Na termodinâmica o termo *sistema* é usado para identificar o objeto da análise. Uma vez que o sistema é definido e as interações relevantes com os outros sistemas são identificadas, uma ou mais leis ou relações físicas são aplicadas.

### sistema

O sistema é tudo aquilo que desejamos estudar. Ele pode ser tão simples como um corpo livre ou tão complexo como uma refinaria química inteira. Podemos desejar estudar uma quantidade de matéria contida em um tanque fechado e de paredes rígidas, ou considerar algo como o escoamento de gás natural em um gasoduto. A composição da matéria dentro de um sistema pode ser fixa ou variar em função de reações químicas ou nucleares. A forma ou o volume do sistema que está sendo analisado não é necessariamente constante, como no caso de um gás no interior de um cilindro comprimido por um pistão ou quando um balão é inflado.

### vizinhanças

### fronteira

Tudo o que é externo ao sistema é considerado parte das vizinhanças do sistema. O sistema é distinguido de suas vizinhanças por uma fronteira especificada, que pode estar em repouso ou em movimento. Você verá que as interações entre o sistema e suas vizinhanças, que ocorrem ao longo da fronteira, representam uma parte importante na termodinâmica aplicada à engenharia.

Dois tipos básicos de sistema são estudados neste livro. Eles são denominados, respectivamente, *sistemas fechados* e *volumes de controle*. Um sistema fechado refere-se a uma quantidade fixa de matéria, enquanto um volume de controle é uma região do espaço através da qual pode ocorrer fluxo de massa. O termo *massa de controle* é usado algumas vezes no lugar de sistema fechado, e o termo *sistema aberto* é usado como alternativa para volume de controle. Quando os termos massa de controle e volume de controle são usados, a fronteira do sistema é frequentemente chamada de *superfície de controle*.

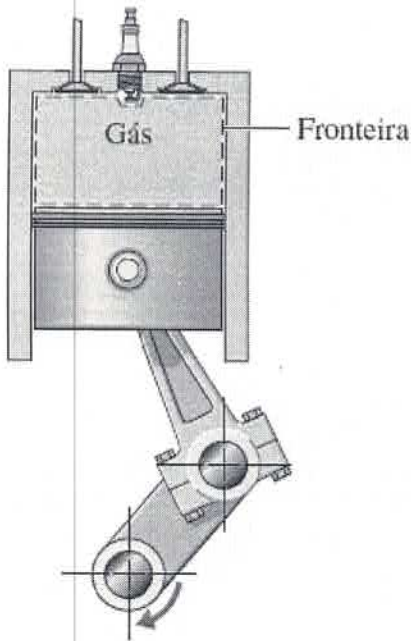
### 1.2.1 Sistemas Fechados

#### sistema fechado

#### sistema isolado

Um sistema fechado é definido quando uma determinada quantidade de matéria encontra-se em estudo. Um sistema fechado sempre contém a mesma quantidade de matéria. Não pode ocorrer fluxo de massa através de suas fronteiras. Um tipo especial de sistema fechado que não interage de modo algum com suas vizinhanças é denominado sistema isolado.

A Fig. 1.1 mostra um gás em um conjunto cilindro-pistão. Quando as válvulas estão fechadas podemos considerar o gás como um sistema fechado. A fronteira encontra-se somente no interior das paredes do cilindro e do pistão, como mostram as linhas tracejadas na figura. Como a fronteira entre o gás e o pistão se move com o pistão, o volume do sistema varia. Nenhuma massa atravessa essa fronteira ou qualquer outra parte do contorno. Se a combustão ocorrer, a composição do sistema muda conforme a mistura inicial de combustível se transforma nos produtos da combustão.



**Fig. 1.1** Sistema fechado: um gás em um conjunto cilindro-pistão.

#### **TABELA 1.1**

##### Algumas Áreas de Aplicação da Termodinâmica na Engenharia

Sistemas de propulsão de aeronaves e foguetes

Sistemas alternativos de energia

Células a combustível

Sistemas geotérmicos

Conversores magneto-hidrodinâmicos (MHD)

Geração de potência por energia térmica dos oceanos, energia das ondas e marés

Geração de potência, aquecimento e resfriamento ativados por energia solar

Dispositivos termoelétricos e termoiônicos

Turbinas eólicas

Motores de automóveis

Aplicações na bioengenharia

Aplicações biomédicas

Sistemas de combustão

Compressores, bombas

Resfriamento de equipamentos eletrônicos

Sistemas criogênicos, separação e liquefação de gases

Usinas de energia movidas a combustível fóssil e nuclear

Sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado

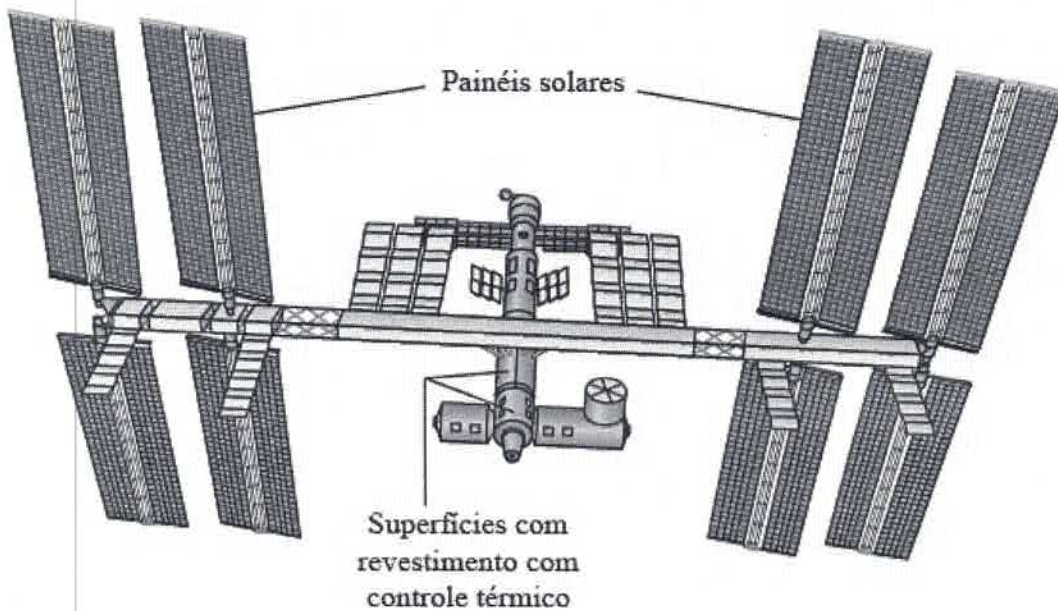
Refrigeração por absorção e bombas de calor

Refrigeração por compressão de vapor e bombas de calor

Turbinas a gás e a vapor

Produção de potência

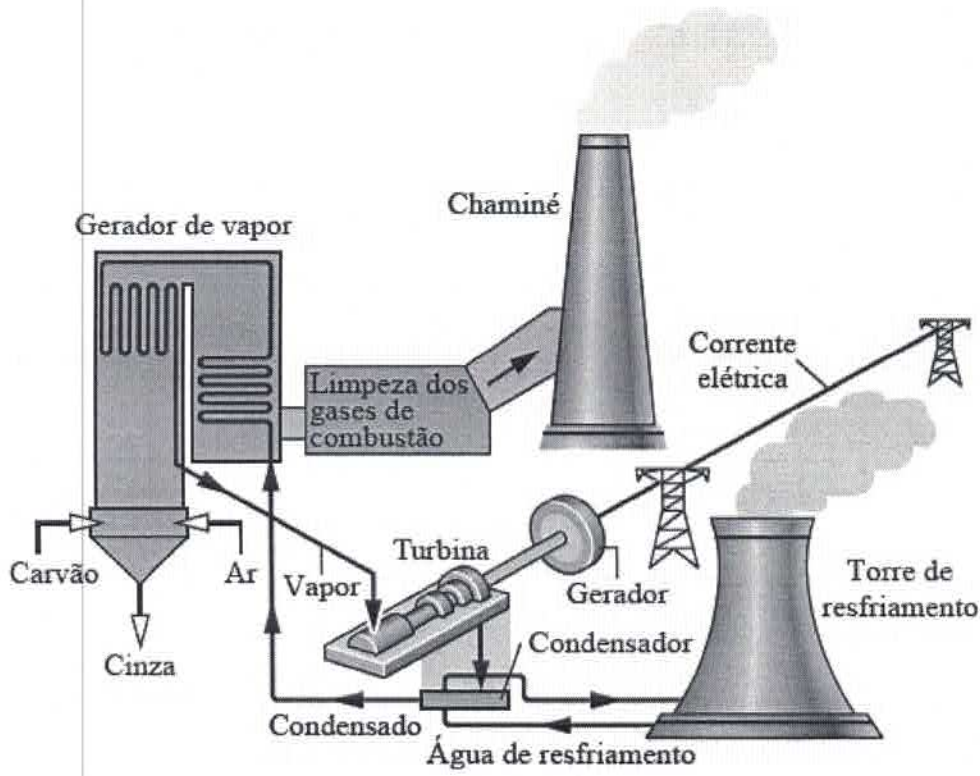
Propulsão



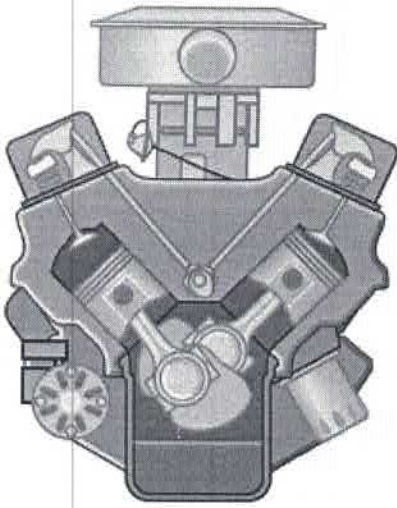
Estação Espacial Internacional



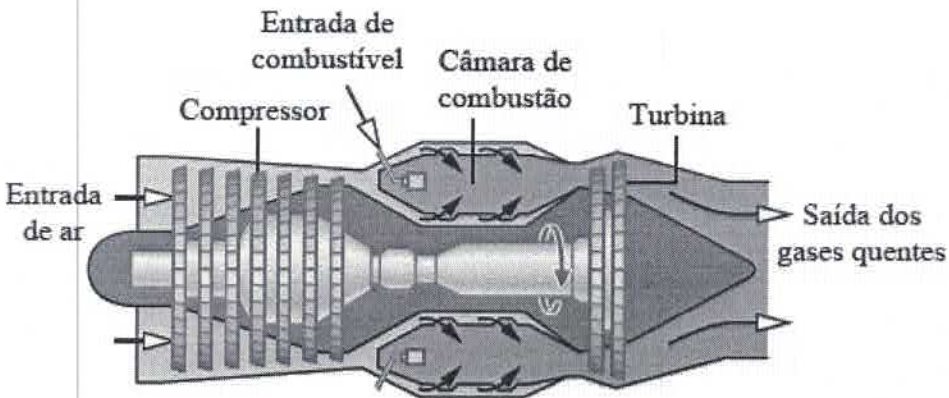
Refrigerador



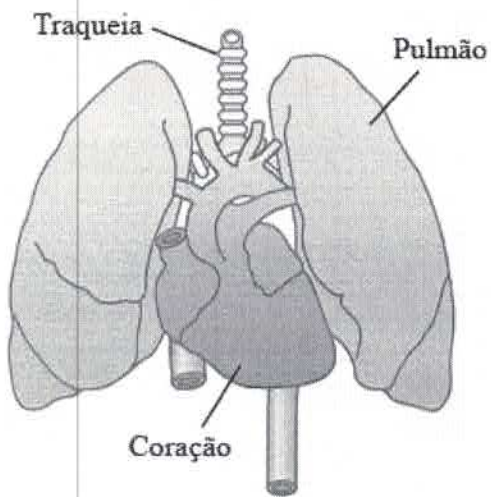
Termoelétrica



Motor de automóvel



Motor turbojato



Aplicações biomédicas

**TABELA 1.2**

Previsões para a Vida nos Estados Unidos em 2050

*Com relação à casa*

- ▶ As casas são construídas de modo a reduzir as necessidades de aquecimento e refrigeração.
- ▶ As casas possuem sistemas de monitoramento eletrônico e regulação do uso de energia.
- ▶ Os eletrodomésticos e sistemas com aquecimento e ar-condicionado são mais eficientes em termos energéticos.
- ▶ O uso da energia solar para o aquecimento do ambiente e da água é comum.
- ▶ Mais alimentos são produzidos localmente.

#### *Com relação ao transporte*

- ▶ A versão plug-in de veículos híbridos e veículos totalmente elétricos dominam o mercado.
- ▶ Os veículos híbridos utilizam principalmente biocombustíveis.
- ▶ O uso de transportes públicos dentro e entre as cidades é comum.
- ▶ Um sistema ferroviário de passageiros ampliado é amplamente utilizado.

#### *Com relação ao estilo de vida*

- ▶ As práticas de utilização da energia de forma eficiente são utilizadas em toda a sociedade.
- ▶ A reciclagem é amplamente praticada, incluindo a reciclagem da água.
- ▶ O ensino à distância é comum na maioria dos níveis de ensino.
- ▶ A telecomunicação e as teleconferências constituem a norma.
- ▶ A Internet é predominantemente usada para consumo, comércio e negócios.

#### *Com relação à energia*

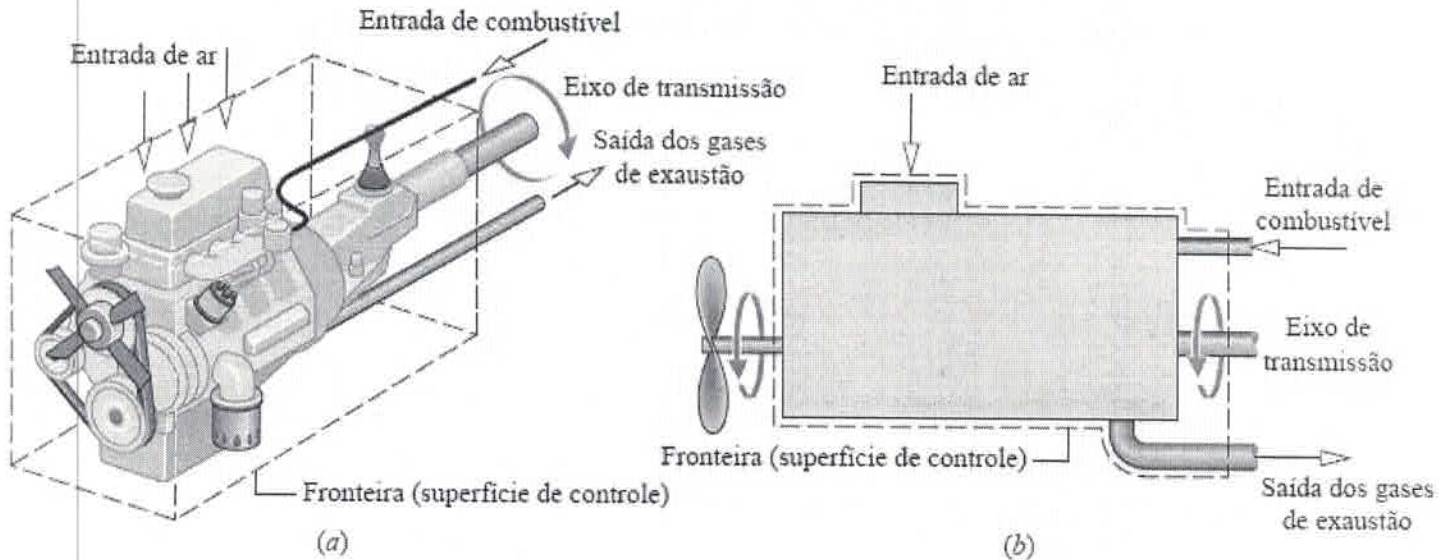
- ▶ A eletricidade desempenha um papel maior na sociedade.
- ▶ A energia eólica, solar e outras tecnologias renováveis contribuem com uma parcela significativa das necessidades de eletricidade da população.
- ▶ Uma mistura de usinas convencionais de energia movidas a combustíveis fósseis e usinas de energia nuclear representam uma menor, mas ainda significativa, parcela das necessidades de eletricidade da população.
- ▶ Uma rede nacional inteligente e segura de transmissão de energia se estabelece.

### **1.2.2 Volumes de Controle**

#### **volume de controle**

Nas seções subsequentes deste livro, as análises termodinâmicas serão realizadas em dispositivos como turbinas e bombas através das quais a massa flui. Essas análises podem ser conduzidas, a princípio, estudando-se uma certa quantidade de matéria, um sistema fechado, à medida que ela passa através do dispositivo. No entanto, em vez da análise anterior, na maioria dos casos é mais simples pensar em termos de uma certa região do espaço através da qual há fluxo de massa. Nessa abordagem, estuda-se uma *região* delimitada por uma fronteira prescrita. Essa região é chamada de volume de controle. A massa pode cruzar a fronteira de um volume de controle.

A Fig. 1.2a mostra o diagrama de uma máquina. As linhas tracejadas definem o volume de controle que envolve a máquina. Observe que ar, combustível e gases de exaustão atravessam a fronteira. Um esquema como o da Fig. 1.2b usualmente é suficiente para a análise de engenharia.



**Fig. 1.2** Exemplo de um volume de controle (sistema aberto). Um motor de automóvel.



## BIOCONEXÕES

Os seres vivos e seus órgãos podem ser estudados como volumes de controle. Para o animal de estimação mostrado na Fig. 1.3a, ar, comida e bebida são essenciais para manter a vida e as atividades que entram através da fronteira, e para a saída dos produtos que não serão utilizados. Um esquema como o da Fig. 1.3b pode ser suficiente para uma análise biológica. Órgãos particulares, como o coração, também podem ser estudados como volumes de controle. Conforme está ilustrado na Fig. 1.4, as plantas podem ser estudadas sob o ponto de vista de um volume de controle. A radiação solar é usada para a produção de substâncias químicas essenciais nas plantas por meio da *fotossíntese*. Durante a fotossíntese as plantas retiram dióxido de carbono da atmosfera e liberam oxigênio para a mesma. As plantas também absorvem água e nutrientes através de suas raízes.

### 1.2.3 Selecionando a Fronteira do Sistema

É essencial que a fronteira do sistema seja cuidadosamente delineada antes do procedimento da análise termodinâmica. Entretanto, o mesmo fenômeno físico frequentemente pode ser analisado com escolhas alternativas do sistema, fronteira e vizinhanças. A escolha de uma determinada fronteira que define certo sistema depende profundamente da conveniência que essa escolha proporciona à análise subsequente.

Em geral, a escolha da fronteira de um sistema é determinada por duas considerações: (1) o que é conhecido sobre o possível sistema, particularmente nas suas fronteiras, e (2) o objetivo da análise.



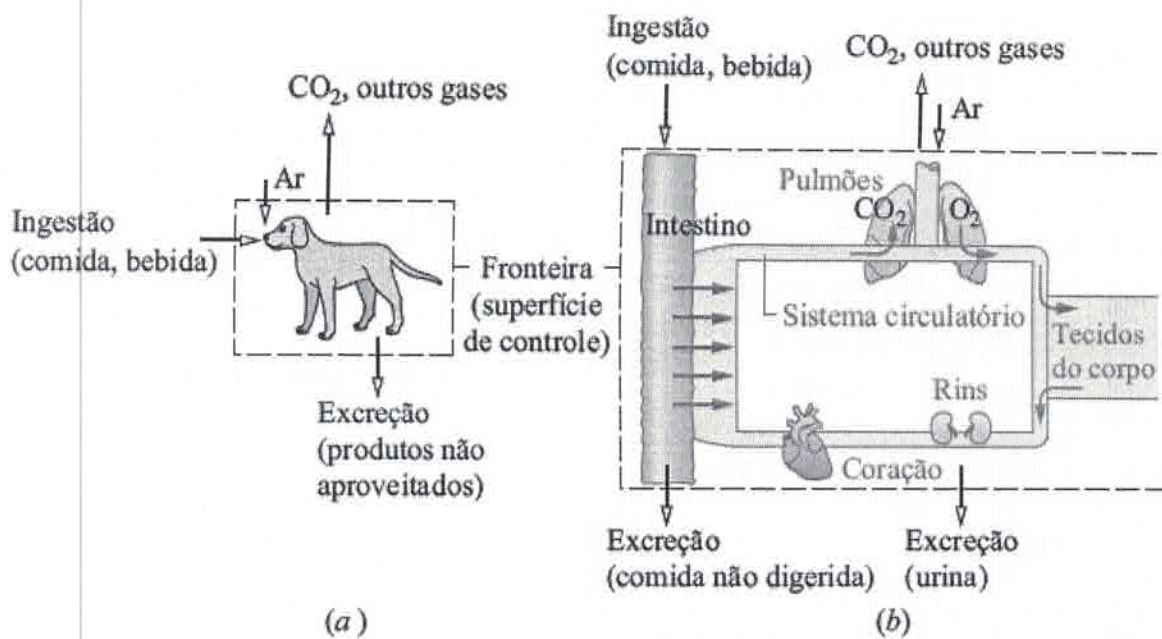


Fig. 1.3 Exemplo de um volume de controle (sistema aberto) em biologia.

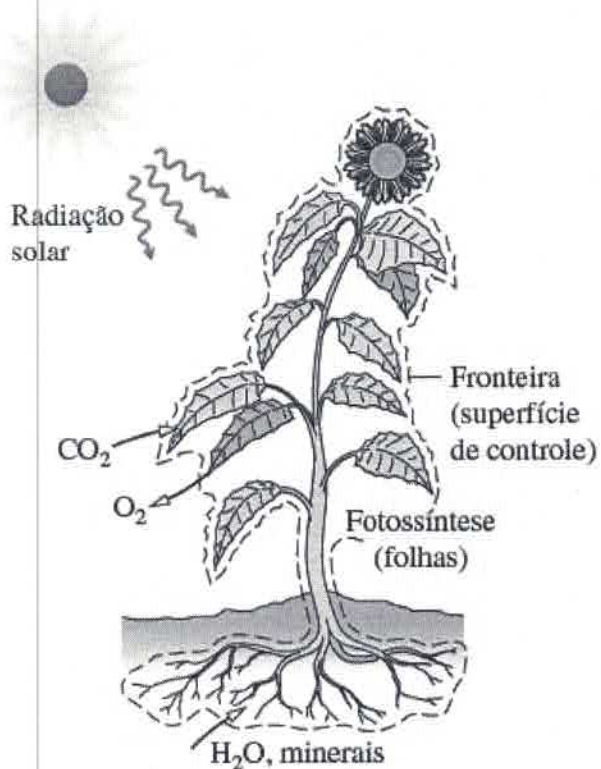
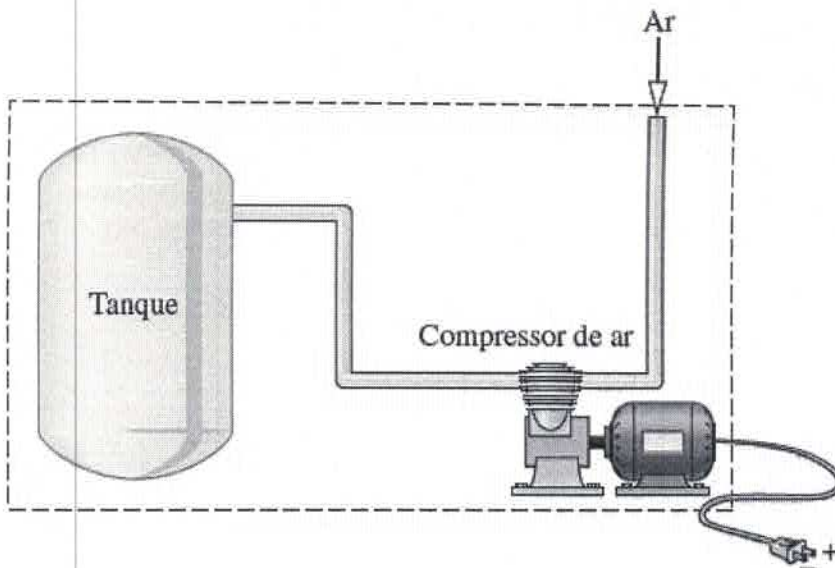


Fig. 1.4 Exemplo de um volume de controle (sistema aberto) em botânica.



**Fig. 1.5** Compressor de ar e tanque de armazenamento.

### TOME NOTA...

**Animações** reforçam muitas das apresentações do texto. Você pode visualizar estas animações, consultando o material suplementar deste livro no GEN-IO, ambiente virtual de aprendizagem do GEN.

As animações estão indicadas em conteúdos específicos, através de um ícone na margem.

O primeiro desses ícones aparece imediatamente acima.

Neste exemplo, o título **Tipos\_de\_Sistemas** refere-se ao conteúdo do texto, enquanto **A.1-Abas a, b & c** referem-se à animação específica (**A.1**) e as abas (**Abas a, b & c**) da animação recomendada para a visualização para melhorar a sua compreensão.

► POR EXEMPLO a Fig. 1.5 mostra um esboço de um compressor de ar conectado a um tanque de armazenamento. A fronteira do sistema mostrado na figura engloba o compressor, o tanque e toda a tubulação. Essa fronteira poderia ser selecionada se a corrente elétrica de alimentação fosse conhecida e o objetivo da análise fosse determinar quanto tempo o compressor deve operar até que a pressão no tanque alcance um valor especificado. Como a massa atravessa a fronteira, o sistema pode ser um volume de controle. Um volume de controle englobando apenas o compressor poderia ser escolhido se a condição de entrada e saída de ar do compressor fosse conhecida e o objetivo fosse determinar a potência elétrica de acionamento. ◀◀◀◀◀

Tipos\_de\_Sistemas  
A.1 – Abas a, b & c



## 1.3 Descrevendo Sistemas e Seus Comportamentos

Os engenheiros estão interessados em estudar sistemas e como eles interagem com suas vizinhanças. Nesta seção, introduziremos diversos termos e conceitos usados para descrever sistemas e como eles se comportam.

### 1.3.1 Pontos de Vista Macroscópico e Microscópico da Termodinâmica

Os sistemas podem ser estudados sob o ponto de vista macroscópico ou microscópico. A abordagem macroscópica da termodinâmica está preocupada com o comportamento geral ou global. Isso algumas vezes é chamado de termodinâmica *clássica*. Nenhum modelo da estrutura da matéria em níveis molecular, atômico e subatômico é utilizado diretamente na termodinâmica clássica. Embora o comportamento dos sistemas seja afetado pela estrutura molecular, a termodinâmica clássica permite que importantes aspectos do comportamento de um sistema sejam avaliados partindo da observação do sistema global.

A abordagem microscópica da termodinâmica, conhecida como termodinâmica *estatística*, se preocupa diretamente com a estrutura da matéria. O objetivo da termodinâmica estatística é caracterizar por meios estatísticos o comportamento médio das partículas que compõem o sistema de interesse e relacionar essa informação com o comportamento macroscópico observado do sistema. Para aplicações envolvendo lasers, plasmas, escoamento de gases em alta velocidade, cinética química, temperaturas extremamente baixas (criogenia) e outras, os métodos da termodinâmica estatística são essenciais. A abordagem microscópica é utilizada neste livro para interpretar a *energia interna* no Cap. 2 e a *entropia* no Cap. 6. Além disso, conforme é mencionado no Cap. 3, a abordagem microscópica exerce um papel fundamental no desenvolvimento de certos dados, como os *calores específicos de gases ideais*.

Para uma vasta gama de aplicações na engenharia, a termodinâmica clássica não apenas fornece uma abordagem consideravelmente mais direta para a análise e o projeto, mas também requer menor complexidade matemática. Por essas razões, o ponto de vista macroscópico é o adotado neste livro. Finalmente, efeitos relativísticos não são significativos para os sistemas considerados neste livro.

### 1.3.2 Propriedade, Estado e Processo

#### propriedade

Para descrever um sistema e prever seu comportamento é necessário o conhecimento de suas propriedades e de como estas propriedades estão relacionadas. Uma propriedade é uma característica macroscópica de um sistema, tal como massa, volume, energia, pressão e temperatura, para as quais um valor numérico pode ser atribuído em um dado tempo sem o conhecimento do comportamento prévio (*história*) do sistema.

#### estado

A palavra estado refere-se à condição de um sistema como descrito por suas propriedades. Já que existem normalmente relações entre as propriedades de um sistema, com frequência o estado pode ser especificado fornecendo-se os valores de um subconjunto dessas propriedades. Todas as outras propriedades podem ser determinadas a partir desse subconjunto.

#### processo

##### regime permanente

Quando qualquer uma das propriedades de um sistema é alterada, ocorre uma mudança de estado e diz-se que o sistema percorreu um processo. Um processo é uma transformação de um estado a outro. Entretanto, se um sistema exibe o mesmo valor de suas propriedades em dois tempos distintos ele está no mesmo estado nesses tempos. Um sistema é dito em regime permanente se nenhuma de suas propriedades varia com o tempo.

Muitas propriedades são consideradas no decorrer de nosso estudo sobre termodinâmica aplicada à engenharia. A termodinâmica também trata de grandezas que não são propriedades, como taxas de vazões mássicas e transferência de energia por trabalho e calor. Exemplos adicionais de grandezas que não são propriedades são fornecidos nos capítulos subsequentes. Uma maneira de distinguir propriedades de *não* propriedades pode ser encontrada no boxe a seguir.

# A

## 1.3.3 Propriedades Extensivas e Intensivas

### propriedade extensiva

As propriedades termodinâmicas podem ser classificadas em duas classes gerais: extensivas e intensivas. Uma propriedade é chamada extensiva se seu valor para o sistema como um todo é a soma de seus valores para as partes nas quais o sistema é dividido. Massa, volume, energia e muitas outras propriedades, que serão apresentadas posteriormente, são extensivas. As propriedades extensivas dependem do tamanho ou da extensão de um sistema. As propriedades extensivas de um sistema podem variar com o tempo, e muitas análises termodinâmicas consistem basicamente em avaliar cuidadosamente as variações de propriedades extensivas, tais como massa e energia, à medida que um sistema interage com suas vizinhanças.

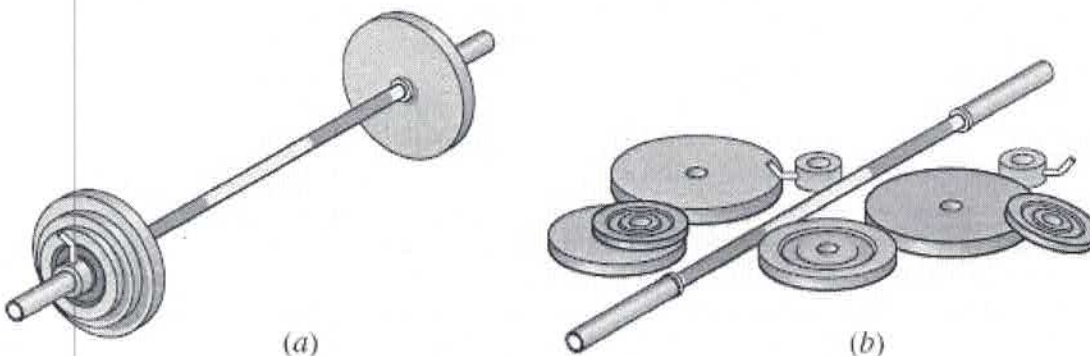
### propriedade intensiva

Propriedades intensivas não são aditivas no sentido considerado anteriormente. Seus valores são independentes do tamanho ou da extensão de um sistema, e podem variar de local para local no interior de um sistema em qualquer momento. Assim, propriedades intensivas podem ser funções da posição e do tempo, enquanto propriedades extensivas podem variar somente com o tempo. O volume específico (Seção 1.5), a pressão e a temperatura são propriedades intensivas importantes; muitas outras propriedades intensivas serão introduzidas em capítulos subsequentes.

► **POR EXEMPLO** para ilustrar a diferença entre propriedades intensivas e extensivas, considere uma porção de matéria com temperatura uniforme e imagine que ela é composta de várias partes, como ilustrado na Fig. 1.6. A massa do conjunto é a soma das massas das partes, e o volume total é a soma dos volumes das partes. No entanto, a temperatura do todo não é a soma da temperatura das partes; é a mesma para cada parte. A massa e o volume são propriedades extensivas, mas a temperatura é uma propriedade intensiva. ◀◀◀◀◀

Propriedades\_Ext\_Int  
A.3 – Aba a

# A



**Fig. 1.6** Figura utilizada para discutir os conceitos de propriedades extensivas e intensivas.

### Distinguindo Propriedades de Não Propriedades

Em um dado estado, cada propriedade possui um valor definido que pode ser atribuído sem o conhecimento de como o sistema alcançou aquele estado. Logo, a mudança no valor de uma propriedade quando o sistema é alterado de um

estado para outro é determinada somente pelos dois estados extremos, e é independente do caminho particular pelo qual a variação de estado ocorreu. Ou seja, a mudança é independente dos detalhes do processo. Reciprocamente, se o valor de uma grandeza é independente do processo entre dois estados, então essa grandeza corresponde à variação de uma propriedade. Isso fornece um teste para determinar se uma grandeza é uma propriedade: **uma grandeza é uma propriedade se, e somente se, sua mudança de valor entre dois estados é independente do processo.** Segue-se que, se o valor de uma determinada grandeza depende dos detalhes do processo e não apenas dos estados extremos, essa grandeza não pode ser uma propriedade.

### 1.3.4 Equilíbrio

#### equilíbrio

A termodinâmica clássica enfatiza principalmente os estados de equilíbrio e as mudanças de um estado de equilíbrio a outro. Assim, o conceito de equilíbrio é fundamental. Em mecânica, equilíbrio significa uma condição de estabilidade mantida por uma igualdade de forças que se opõem. Em termodinâmica esse conceito é mais abrangente, incluindo não apenas um equilíbrio de forças, mas também um equilíbrio de outras influências. Cada tipo de influência refere-se a um aspecto particular ou geral do equilíbrio termodinâmico. Consoante com esse fato, vários tipos de equilíbrio devem existir individualmente para se estabelecer a condição de total equilíbrio; entre estes estão os equilíbrios mecânico, térmico, de fase e químico.

#### estado de equilíbrio

Os critérios para esses quatro tipos de equilíbrio serão considerados em discussões subsequentes. Pode-se fazer um teste para verificar se o sistema está em equilíbrio termodinâmico através do seguinte procedimento: isole o sistema de suas vizinhanças e aguarde por mudanças em suas propriedades observáveis. Se não ocorrerem mudanças, concluímos que o sistema estava em equilíbrio no momento em que foi isolado. Pode-se dizer que o sistema está em um estado de equilíbrio.

Quando um sistema está isolado ele não pode interagir com suas vizinhanças; entretanto, seu estado pode mudar como uma consequência de eventos espontâneos que estejam ocorrendo internamente, à medida que suas propriedades intensivas, tais como a temperatura e a pressão, tendam a valores uniformes. Quando todas essas mudanças cessam o sistema está em equilíbrio. No equilíbrio a temperatura é uniforme ao longo do sistema. Também a pressão pode ser considerada uniforme, desde que o efeito da gravidade não seja significativo; caso contrário, pode existir uma variação de pressão, como em uma coluna vertical de líquido.

Não há exigência de que um sistema que passa por um processo esteja em equilíbrio *durante* o processo. Alguns ou todos os estados intermediários podem ser estados de não equilíbrio. Para muitos desses processos estamos limitados ao conhecimento do estado antes de o processo ocorrer e do estado depois que o processo é completado.

## 1.4 Medindo Massa, Comprimento, Tempo e Força

Quando os cálculos de engenharia são efetuados é necessário preocupar-se com as *unidades* das grandezas físicas envolvidas. Uma unidade é uma certa quantidade de uma grandeza através da qual, por comparação, qualquer outra grandeza do mesmo tipo é medida. Por exemplo, metros, centímetros, quilômetros, pés, polegadas e milhas são todas *unidades de comprimento*. De forma semelhante, segundos, minutos e horas são *unidades de tempo*.

Como as grandezas físicas estão relacionadas por meio de definições e leis, um número relativamente pequeno dessas grandezas físicas é suficiente para conceber e mensurar todas as outras. Estas são chamadas de *dimensões primárias*. As outras são mensuradas em termos das dimensões primárias, e são chamadas de *secundárias*. Por exemplo, se o comprimento e o tempo fossem considerados primários, a velocidade e a área seriam consideradas secundárias.

Um conjunto de dimensões primárias adequado para aplicações em *mecânica* consiste em massa, comprimento e

tempo. Outras dimensões primárias são necessárias quando fenômenos físicos adicionais são levados em consideração. A temperatura é incluída para a termodinâmica, e a corrente elétrica é introduzida para aplicações que envolvem eletricidade.

## unidade básica

Uma vez que um conjunto de dimensões primárias é adotado, especifica-se uma unidade básica para cada dimensão primária. As unidades para todas as outras grandezas são então obtidas a partir das unidades básicas. Vamos ilustrar essas ideias considerando brevemente dois sistemas de unidades: as unidades SI e as unidades inglesas de engenharia.

### 1.4.1 Unidades SI

#### unidades básicas do SI

Na presente discussão vamos analisar o sistema de unidades chamado SI, que considera a massa, o comprimento e o tempo como dimensões primárias e a força como dimensão secundária. SI é a abreviação para *Système International d'Unités* (Sistema Internacional de Unidades), que é o sistema legalmente aceito na maioria dos países. As convenções para o SI são publicadas e controladas por tratados de uma organização internacional. As unidades básicas do SI para massa, comprimento e tempo encontram-se listadas na [Tabela 1.3](#) e são discutidas nos parágrafos a seguir. A unidade básica SI para a temperatura é o kelvin, K.

**TABELA 1.3**

Unidades para Massa, Comprimento, Tempo e Força

Grandeza	SI		Inglês	
	Unidade	Símbolo	Unidade	Símbolo
massa	quilograma	kg	libra-massa	lb
comprimento	metro	m	pé	ft
tempo	segundo	s	segundo	s
força	Newton	N	libra-força	lbf
	(= 1 kg · m/s <sup>2</sup> )		(= 32,1740 lb · ft/s <sup>2</sup> )	

A unidade básica SI de massa é o quilograma, kg. Ele é igual à massa de um determinado cilindro de uma liga platina-irídio mantida pelo Escritório Internacional de Pesos e Medidas, próximo a Paris. A massa-padrão para os Estados Unidos é mantida pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia. O quilograma é a única unidade básica definida por associação a um objeto fabricado.

A unidade básica SI de comprimento é o metro, m, definido como o comprimento percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo especificado. A unidade básica de tempo é o segundo, s. O segundo é definido como a duração de 9.192.631.770 ciclos da radiação associada a uma transição específica do átomo de césio.

A unidade SI de força, denominada newton, é uma unidade secundária, definida em termos de unidades básicas para massa, comprimento e tempo. A segunda lei do movimento de Newton estabelece que a força líquida agindo em um corpo é proporcional ao produto da massa pela aceleração, escrito por  $F \propto ma$ . O newton é definido de forma que a constante de proporcionalidade na expressão é igual à unidade. Assim, a segunda lei de Newton é expressa pela igualdade

$$F = ma \quad (1.1)$$

O newton, N, é a força necessária para acelerar uma massa de 1 quilograma a uma taxa de 1 metro por segundo por segundo. Utilizando a Eq. 1.1

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg})(1 \text{ m/s}^2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \quad (1.2)$$

#### TOME NOTA...

Observe que no cálculo da força em newtons o fator de conversão de unidades é identificado por um par de linhas verticais. Esse dispositivo é usado ao longo do texto para identificar conversões de unidades.

► POR EXEMPLO para ilustrar o uso das unidades SI introduzidas até aqui, vamos determinar o peso em newtons de um objeto cuja massa é 1000 kg, em um local na superfície da Terra onde a aceleração devida à gravidade é igual a um valor-padrão definido como  $9,80665 \text{ m/s}^2$ . Recordando que o peso de um corpo refere-se à força da gravidade e é calculado usando a massa do corpo,  $m$ , e a aceleração local devida à gravidade,  $g$ , partindo da Eq. 1.1, obtemos

$$\begin{aligned} F &= mg \\ &= (1000 \text{ kg})(9,80665 \text{ m/s}^2) = 9806,65 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \end{aligned}$$

Esta força pode ser expressa em termos de newtons usando a Eq. 1.2 como um *fator de conversão de unidades*. Assim,

$$F = \left( 9806,65 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| = 9806,65 \text{ N} \quad \leftarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow \leftarrow$$

Como o peso é calculado em termos da massa e da aceleração local devida à gravidade, o peso de um objeto pode mudar em função do local, devido à variação da aceleração da gravidade, mas a sua massa permanece constante.

#### TABELA 1.4

Prefixos das Unidades SI

Fator	Prefixo	Símbolo
$10^{12}$	tera	T

$10^9$	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	quilo	k
$10^2$	hecto	h
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	mili	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p

► POR EXEMPLO se o objeto considerado anteriormente estivesse na superfície de um planeta em um local onde a aceleração da gravidade fosse um décimo do valor usado no cálculo anterior, a massa permaneceria a mesma, mas o peso seria um décimo do valor calculado. ◀◀◀◀◀◀

As unidades SI para outras grandezas físicas também são obtidas em função das unidades SI básicas. Algumas dessas unidades ocorrem tão frequentemente que são dados nomes e símbolos especiais, como no caso do newton. As unidades SI para as grandezas pertinentes à termodinâmica serão apresentadas conforme forem introduzidas no texto. Já que frequentemente se torna necessário trabalhar com valores extremamente grandes ou pequenos quando se usa o sistema SI de unidades, um conjunto de prefixos-padrão encontrase listado na Tabela 1.4, de modo a simplificar o assunto. Por exemplo, km significa quilômetro, ou seja,  $10^3$  m.

### 1.4.2 Unidades Inglesas de Engenharia

Embora as unidades SI sejam um padrão mundial, atualmente muitos segmentos da comunidade de engenharia nos Estados Unidos usam regularmente algumas outras unidades. Uma grande parte do estoque de ferramentas e máquinas industriais americanas, bem como muitos dados valiosos de engenharia, utiliza outras unidades além das unidades SI. Ainda por muitos anos os engenheiros nos Estados Unidos deverão estar familiarizados com os vários sistemas de unidades.

#### unidades básicas inglesas

Nesta seção consideraremos um sistema de unidades geralmente utilizado nos Estados Unidos, denominado sistema inglês de engenharia. As unidades básicas inglesas para massa, comprimento e tempo estão listadas na Tabela 1.3, e serão discutidas nos parágrafos seguintes. As unidades inglesas para outras grandezas pertinentes à termodinâmica



serão apresentadas conforme forem introduzidas ao longo do texto.

A unidade básica para o comprimento é o pé, ft, definido em termos do metro por

$$1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m} \quad (1.3)$$

A polegada, in, é definida em termos do pé

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}$$

Uma polegada é igual a 2,54 cm. Embora unidades como o minuto e a hora sejam comumente usadas em engenharia, é conveniente selecionar o segundo como unidade básica de tempo para o Sistema Inglês de Engenharia.

A unidade básica de massa no Sistema Inglês de Engenharia é a libra-massa, lb, definida em termos do quilograma por

$$1 \text{ lb} = 0,45359237 \text{ kg} \quad (1.4)$$

O símbolo lbm também pode ser usado para indicar a libra-massa.

Uma vez que as unidades básicas de massa, comprimento e tempo do sistema inglês de engenharia tenham sido especificadas, a unidade de força pode ser definida como para o newton, através da segunda lei de Newton, conforme a Eq. 1.1. Sob esse ponto de vista, a unidade inglesa de força, a libra-força, lbf, é a força necessária para acelerar uma libra-massa de  $32,1740 \text{ ft/s}^2$ , que é a aceleração-padrão da gravidade. Substituindo esses valores na Eq. 1.1

$$1 \text{ lbf} = (1 \text{ lb})(32,1740 \text{ ft/s}^2) = 32,1740 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2 \quad (1.5)$$

Nessa abordagem a força é considerada *secundária*.

A libra-força, lbf, não é igual à libra-massa, lb, apresentada anteriormente. Força e massa são fundamentalmente diferentes, assim como suas unidades. Contudo, os dois usos da palavra “libra” podem causar confusão, e deve-se tomar cuidado para evitar erros.

► POR EXEMPLO para ilustrar o uso dessas unidades em um único cálculo determinaremos o peso de um objeto cuja massa é de 1000 lb (453,6 kg) em um local onde a aceleração local da gravidade é de  $32,0 \text{ ft/s}^2$  ( $9,7 \text{ m/s}^2$ ). Inserindo os valores na Eq. 1.1 e usando a Eq. 1.5 como um fator unitário de conversão, obtemos

$$F = mg = (1000 \text{ lb}) \left( 32,0 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} \right) \left| \frac{1 \text{ lbf}}{32,1740 \text{ lb} \cdot \text{ft/s}^2} \right| = 994,59 \text{ lbf}$$

Este cálculo ilustra que a libra-força é uma unidade de força, diferente da libra-massa, que é uma unidade de massa.



## 1.5 Volume Específico

Três propriedades intensivas mensuráveis particularmente importantes na termodinâmica aplicada à engenharia são o volume específico, a pressão e a temperatura. O volume específico será discutido nesta seção. A pressão e a temperatura serão consideradas nas Seções 1.6 e 1.7, respectivamente.

Em uma perspectiva macroscópica, a descrição da matéria é simplificada quando se considera que ela é uniformemente distribuída ao longo de uma região. A validade dessa idealização, conhecida como hipótese do *contínuo*, pode ser inferida pelo fato de que, para uma classe extremamente ampla de fenômenos de interesse para a engenharia, o comportamento da matéria obtido por essa descrição encontra-se em conformidade com dados

medidos.

Quando as substâncias podem ser tratadas como meios contínuos é possível falar de suas propriedades termodinâmicas intensivas “em um ponto”. Assim, em qualquer instante a massa específica  $\rho$  em um ponto é definida por

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V'} \left( \frac{m}{V} \right) \quad (1.6)$$

em que  $V'$  é o menor volume no qual existe um valor definido para essa razão. O volume  $V'$  contém um número de partículas suficiente para que as médias estatísticas sejam significativas. Ele é o menor volume para o qual a matéria pode ser considerada um meio contínuo, e é normalmente pequeno o suficiente para ser considerado um “ponto”. A massa específica definida pela Eq. 1.6 pode ser descrita matematicamente por uma função contínua da posição e do tempo.

Propriedades\_Ext\_Int  
A.3 – Abas b & c



A massa específica, ou a massa local por unidade de volume, é uma propriedade intensiva que pode variar de ponto a ponto em um sistema. Assim, a massa associada a um certo volume  $V$  é, em princípio, determinada por integração

$$m = \int_V \rho dV \quad (1.7)$$

e não simplesmente pelo produto entre a massa específica e o volume.

### volume específico

O volume específico  $y$  é definido como o inverso da massa específica,  $y = 1/\rho$ . Ele é o volume por unidade de massa. Assim como a massa específica, o volume específico é uma propriedade intensiva e pode variar ponto a ponto. As unidades SI para a massa específica e o volume específico são, respectivamente,  $\text{kg}/\text{m}^3$  e  $\text{m}^3/\text{kg}$ . No entanto, elas também são expressas, frequentemente, por  $\text{g}/\text{cm}^3$  e  $\text{cm}^3/\text{g}$ , respectivamente. As unidades inglesas para a massa específica e o volume específico neste texto são  $\text{lb}/\text{ft}^3$  e  $\text{ft}^3/\text{lb}$ , respectivamente.

### base molar

Em certas aplicações é conveniente exprimir propriedades como o volume específico em uma base molar, em vez de uma base mássica. O mol corresponde a uma quantidade de uma determinada substância numericamente igual ao seu peso molecular. Neste livro expressaremos a quantidade de uma substância em uma base molar, em termos do quilomol (kmol) ou da libra-mol (lbmol), como for mais adequado. Em cada caso será usado

$$n = \frac{m}{M} \quad (1.8)$$

O número de quilomols,  $n$ , de uma substância é obtido dividindo-se a massa,  $m$ , em quilogramas pelo peso molecular,  $M$ , em  $\text{kg}/\text{kmol}$ . Analogamente, o número de libra-mols,  $n$ , é obtido dividindo-se a massa,  $m$ , em libra-massa pelo peso molecular,  $M$ , em  $\text{lb}/\text{lbmol}$ . Quando  $m$  é dado em gramas, a Eq.1.8 fornece  $n$  em grama-mol, ou *mol*, para abreviar. Recordando da química, sabe-se que o número de moléculas em um grama-mol, denominado

número de Avogadro, é  $6,022 \times 10^{23}$ . As Tabelas A-1 e A-1E, do Apêndice, fornecem os pesos moleculares de diversas substâncias.

Para assinalar que uma propriedade está em base molar, uma barra é utilizada acima do símbolo. Assim,  $\bar{v}$  significa volume por kmol ou por lbmol, conforme o caso. Neste texto, as unidades usadas para  $\bar{v}$  são  $\text{m}^3/\text{kmol}$  e  $\text{ft}^3/\text{lbmol}$ . Com base na Eq. 1.8, a relação entre  $\bar{v}$  e  $v$  é

$$\bar{v} = Mv \quad (1.9)$$

na qual  $M$  é o peso molecular em  $\text{kg}/\text{kmol}$  ou  $\text{lb}/\text{lbmol}$ , conforme o caso.

## 1.6 Pressão

### pressão

A seguir, apresentaremos o conceito de pressão sob o ponto de vista do contínuo. Vamos iniciar considerando uma pequena área  $A$  associada a um ponto em um fluido em repouso. O fluido em um lado dessa área exerce uma força compressiva que é normal à área,  $F_{\text{normal}}$ . Uma força igual, mas em sentido contrário, é exercida sobre a área pelo fluido situado no outro lado. Para um fluido em repouso não existem outras forças além dessas agindo nessa área. A pressão  $p$  no ponto especificado é definida como o limite

$$p = \lim_{A \rightarrow A'} \left( \frac{F_{\text{normal}}}{A} \right) \quad (1.10)$$

Propriedades\_Ext\_Int  
A.3 – Aba d



no qual  $A'$  é a área no “ponto” com a mesma percepção de limite usada na definição de massa específica.

Se a área  $A'$  estivesse associada a novas orientações oriundas da rotação no ponto considerado e se a pressão fosse determinada para cada nova orientação, iríamos concluir que a pressão no ponto seria a mesma em todas as direções, desde que o fluido esteja em repouso. Isso é uma consequência do equilíbrio de forças em um elemento de volume circundando o ponto. No entanto, a pressão pode variar de ponto a ponto em um fluido estático; exemplos são a variação da pressão atmosférica com a altura e a variação da pressão com a profundidade de oceanos, lagos e outros corpos d'água.

### pressão absoluta

Considere, em seguida, um fluido em movimento. Nesse caso, a força exercida sobre uma área associada a um ponto do fluido pode ser determinada em função de três componentes mutuamente perpendiculares: um normal à área e dois no plano da área. Quando expressos em termos de uma área unitária, a componente normal à área é chamada de *tensão normal*, e os dois componentes no plano da área são denominados *tensões cisalhantes*. As magnitudes dessas tensões geralmente variam de acordo com a orientação da área. O estado de tensão em um fluido em movimento é um tópico que normalmente é tratado em detalhes em *mecânica dos fluidos*. A diferença entre uma tensão normal e a pressão, que seria a tensão normal caso o fluido estivesse em repouso, é normalmente muito pequena. Neste livro admitiremos que a tensão normal em um ponto é igual à pressão naquele ponto. Essa hipótese conduz a resultados de precisão aceitável para as aplicações consideradas. O termo pressão, a não ser que seja afirmado algo em contrário, refere-se à pressão absoluta: a pressão que adota como zero o vácuo absoluto.



## Grandes Esperanças para a Nanotecnologia

A *nanociência* é o estudo das moléculas e estruturas moleculares, chamadas nanoestruturas, tendo uma ou mais dimensões menores do que cerca de 100 nanômetros. Um nanômetro é um bilionésimo do metro:  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ . Para alcançar esse nível de pequenez uma pilha de 10 átomos de hidrogênio teria a altura de 1 nm, enquanto o cabelo humano possui um diâmetro de cerca de 50.000 nm. *Nanotecnologia* é a engenharia da nanoestrutura em produtos úteis. Na escala relativa à nanotecnologia o comportamento pode diferir das nossas expectativas macroscópicas. Por exemplo, a *média* usada para atribuir valores a propriedades em um ponto no modelo contínuo não pode mais ser aplicada, devido às interações entre os átomos em consideração. Também, nessas escalas, a natureza do fenômeno físico tal como um fluxo corrente pode depender de forma explícita do tamanho físico dos dispositivos. Depois de muitos anos de frutíferas pesquisas a nanotecnologia está agora pronta para fornecer novos produtos com uma ampla gama de utilização, incluindo dispositivos implantáveis de quimioterapia, biossensores para a detecção da glicose em diabéticos, dispositivos eletrônicos modernos, novas tecnologias de conversão de energia e *materiais inteligentes*, como tecidos que permitem que vapor de água escape enquanto a água líquida é conservada.

### 1.6.1 Medidas de Pressão

Os manômetros e os barômetros medem a pressão em termos de um comprimento de uma coluna de líquido, tal como o mercúrio, a água ou o óleo. O manômetro mostrado na Fig. 1.7 possui um lado aberto para a atmosfera e o outro ligado a um tanque que contém um gás a pressão uniforme. Como pressões relativas à mesma altura em uma massa *contínua* de um líquido ou um gás em repouso são iguais, as pressões nos pontos *a* e *b*, da Fig. 1.7, são iguais. Aplicando um balanço elementar de forças, a pressão do gás é

$$p = p_{\text{atm}} + \rho g L \quad (1.11)$$

na qual  $p_{\text{atm}}$  é a pressão atmosférica local,  $\rho$  é a massa específica do líquido do manômetro,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $L$  é a diferença entre os níveis do líquido.

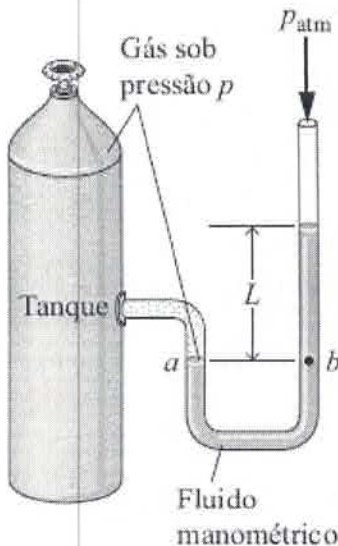


Fig. 1.7 Manômetro.

O barômetro mostrado na Fig. 1.8 é formado por um tubo fechado com mercúrio líquido e uma quantidade pequena de vapor de mercúrio, invertido e colocado em um recipiente aberto com mercúrio líquido. Como as pressões nos

pontos  $a$  e  $b$  são iguais, um balanço de forças fornece a pressão atmosférica, dada por

$$p_{\text{atm}} = p_{\text{vapor}} + \rho_m g L \quad (1.12)$$

sendo  $\rho_m$  a massa específica do líquido mercúrio. Como a pressão do vapor do mercúrio é muito menor do que a da atmosfera, a Eq. 1.12 pode ser aproximada por  $p_{\text{atm}} = \rho_m g L$ . Para colunas pequenas de líquidos,  $\rho$  e  $g$  podem ser tomados como constantes nas Eqs. 1.11 e 1.12.

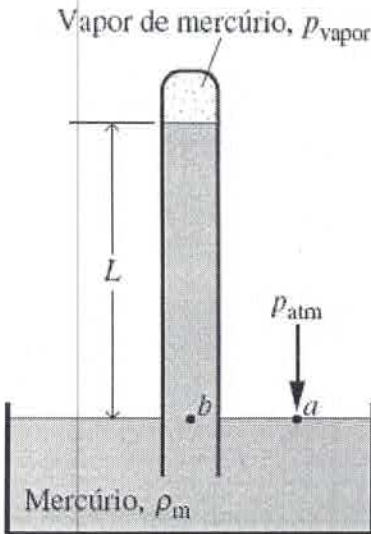


Fig. 1.8 Barômetro.

As pressões medidas com manômetros e barômetros são frequentemente expressas em termos do comprimento  $L$  em milímetros de mercúrio (mmHg), polegadas de mercúrio (inHg), polegadas de água (inH<sub>2</sub>O), e assim por diante.

► POR EXEMPLO um barômetro registra 750 mmHg. Se  $\rho_m = 13,59 \text{ g/cm}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , a pressão atmosférica, em  $\text{N/m}^2$ , é calculada como a seguir:

$$\begin{aligned} p_{\text{atm}} &= \rho_m g L \\ &= \left[ \left( 13,59 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \left| \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \right| \left| \frac{10^2 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right|^3 \right] \left[ 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \left[ (750 \text{ mmHg}) \left| \frac{1 \text{ m}}{10^3 \text{ mm}} \right| \right] \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right| \\ &= 10^5 \text{ N/m}^2 \lll \lll \lll \lll \lll \end{aligned}$$

Um manômetro do tipo tubo de Bourdon é mostrado na Fig. 1.9. A figura apresenta um tubo curvo, que possui uma seção reta elíptica com uma extremidade associada à pressão que se deseja medir e uma outra conectada a um ponteiro por um mecanismo. Quando o fluido sob pressão preenche o tubo, a seção elíptica tende a se tornar circular e o tubo a se tornar reto. Esse movimento é transmitido pelo mecanismo ao ponteiro. Calibrando-se a deflexão do ponteiro para pressões conhecidas, uma escala graduada pode ser elaborada através da qual uma pressão aplicada pode ser lida em unidades convenientes. Devido à sua construção, o tubo de Bourdon mede a pressão relativa às vizinhanças do instrumento. Conseqüentemente, o mostrador indica zero quando as pressões interna e externa ao tubo são as mesmas.

A pressão também pode ser medida por outros procedimentos. Uma classe importante de sensores utiliza o efeito *piezoelétrico*: uma carga é gerada no interior de materiais sólidos quando estes se deformam. Essa entrada mecânica/saída elétrica fornece a base para a medição de pressão, assim como medidas de deslocamento e de força. Outro tipo importante de sensor emprega um diafragma que se deflete quando uma força é aplicada, alterando uma indutância, resistência ou capacitância. A Fig. 1.10 mostra um sensor de pressão piezoelétrico juntamente com um

sistema automático de aquisição de dados.

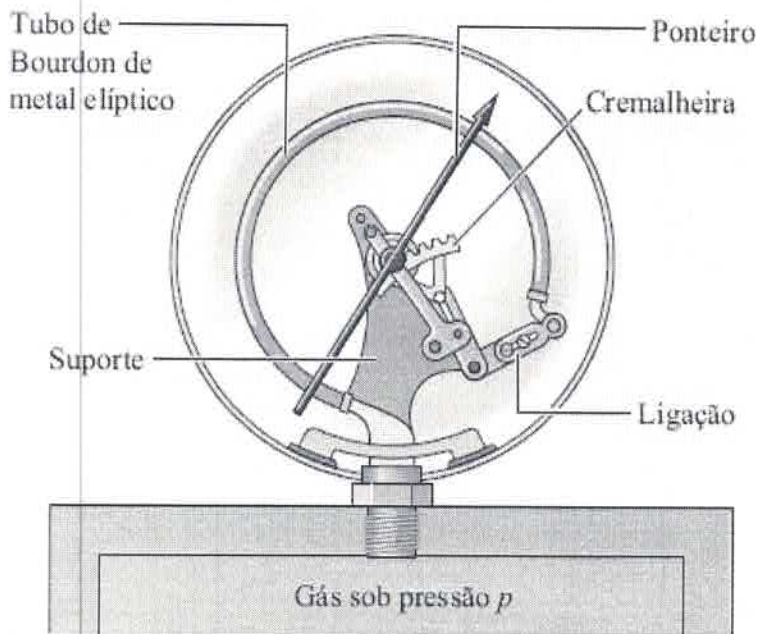


Fig. 1.9 Medição de pressão por um medidor do tipo tubo de Bourdon.

### 1.6.2 Empuxo

#### força de empuxo

Quando um corpo está completamente ou parcialmente submerso em um líquido, a força de pressão resultante que age sobre o corpo é chamada força de empuxo. Como a pressão aumenta com a profundidade a partir da superfície do líquido, as forças de pressão que agem de baixo para cima são maiores do que as forças de pressão que agem de cima para baixo, assim a força de empuxo age verticalmente para cima. A força de empuxo tem magnitude igual ao peso do líquido deslocado (*princípio de Arquimedes*).

► POR EXEMPLO aplicando a Eq.1.11 ao bloco retangular submerso ilustrado na Fig. 1.11, a magnitude da força de pressão resultante que age para cima, a força de empuxo, é dada por

$$\begin{aligned} F &= A(p_2 - p_1) = A(p_{\text{atm}} + \rho g L_2) - A(p_{\text{atm}} + \rho g L_1) \\ &= \rho g A(L_2 - L_1) \\ &= \rho g V \end{aligned}$$

sendo  $V$  o volume do bloco e  $\rho$  a massa específica do líquido circunvizinho. Assim, a magnitude da força de empuxo que age sobre o bloco é igual ao peso do líquido deslocado. ◀◀◀◀◀

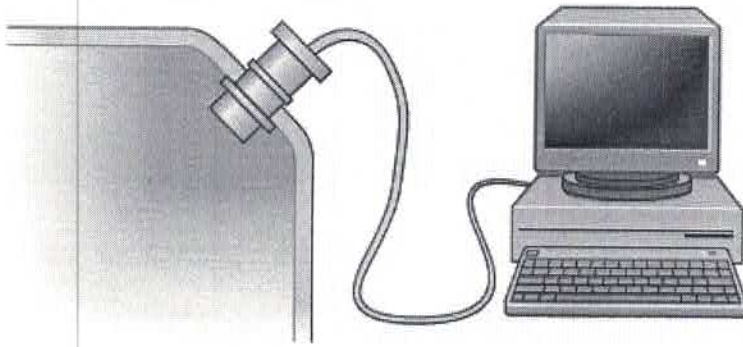


Fig. 1.10 Sensor de pressão com aquisição de dados automática.

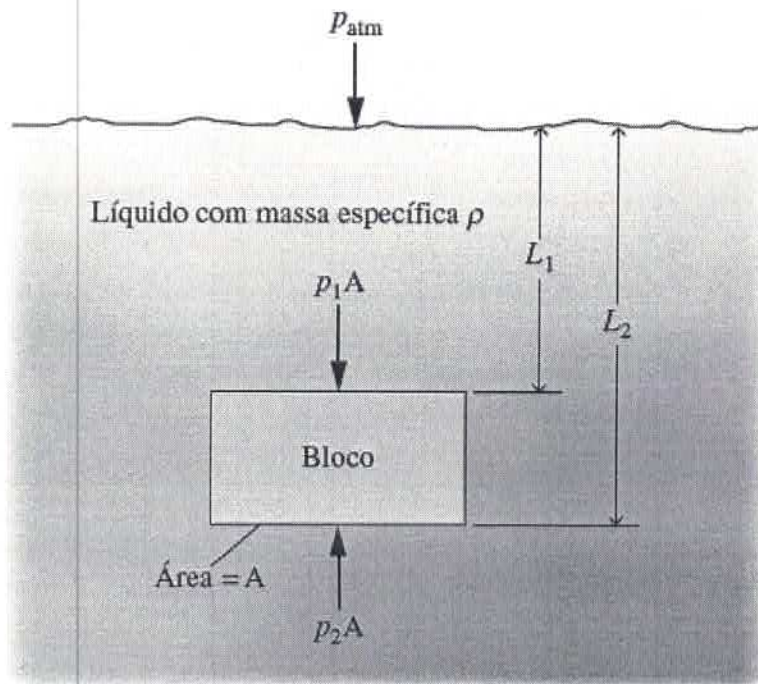


Fig. 1.11 Avaliação da força de empuxo para um corpo submerso.

### 1.6.3 Unidades de Pressão

A unidade de pressão e de tensão no SI é o pascal.

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ N/m}^2$$

Entretanto, múltiplos do pascal são frequentemente utilizados: o kPa, o bar e o MPa.

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$$

As unidades inglesas de uso corrente para a pressão e a tensão são a libra-força por pé quadrado, lbf/ft<sup>2</sup>, e a libra-força por polegada quadrada, lbf/in<sup>2</sup>.

Embora a pressão atmosférica varie com a localização na Terra, um valor-padrão de referência pode ser definido e utilizado para expressar outras pressões.

$$1 \text{ atmosfera padrão (atm)} = \begin{cases} 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ 14,696 \text{ lbf/in}^2 \\ 760 \text{ mmHg} = 29,92 \text{ inHg} \end{cases} \quad (1.13)$$

Como 1 bar (10<sup>5</sup> N/m<sup>2</sup>) é aproximadamente igual a uma atmosfera-padrão, pode-se considerá-lo uma unidade de pressão conveniente, apesar de não ser uma unidade-padrão SI. Quando se está trabalhando no SI, o bar, o MPa e o kPa são utilizados neste texto.

### pressão manométrica

### pressão de vácuo

Embora as pressões absolutas devam ser utilizadas nas relações termodinâmicas, dispositivos de medição de pressão frequentemente indicam a *diferença* entre a pressão absoluta de um sistema e a pressão absoluta da atmosfera existente, externa ao dispositivo de medida. A magnitude dessa diferença é chamada de pressão manométrica ou pressão de vácuo. O termo pressão manométrica é aplicado quando a pressão do sistema é maior do que a pressão atmosférica local,  $p_{\text{atm}}$ .

### TOME NOTA...

Neste livro, o termo pressão, a não ser que seja afirmado algo em contrário, refere-se à pressão absoluta.

$$p(\text{manométrica}) = p(\text{absoluta}) - p_{\text{atm}}(\text{absoluta}) \quad (1.14)$$

Quando a pressão atmosférica local é maior do que a pressão do sistema é utilizado o termo pressão de vácuo.

$$p(\text{vácuo}) = p_{\text{atm}}(\text{absoluta}) - p(\text{absoluta}) \quad (1.15)$$

Os engenheiros nos Estados Unidos frequentemente utilizam as letras a (absolute) e g (gage) para distinguir a pressão absoluta da manométrica. Por exemplo, as pressões absoluta e manométrica em libra-força por polegada quadrada são escritas como psia e psig, respectivamente. A relação entre os vários modos de expressar medidas de pressão é apresentada na [Fig. 1.12](#).



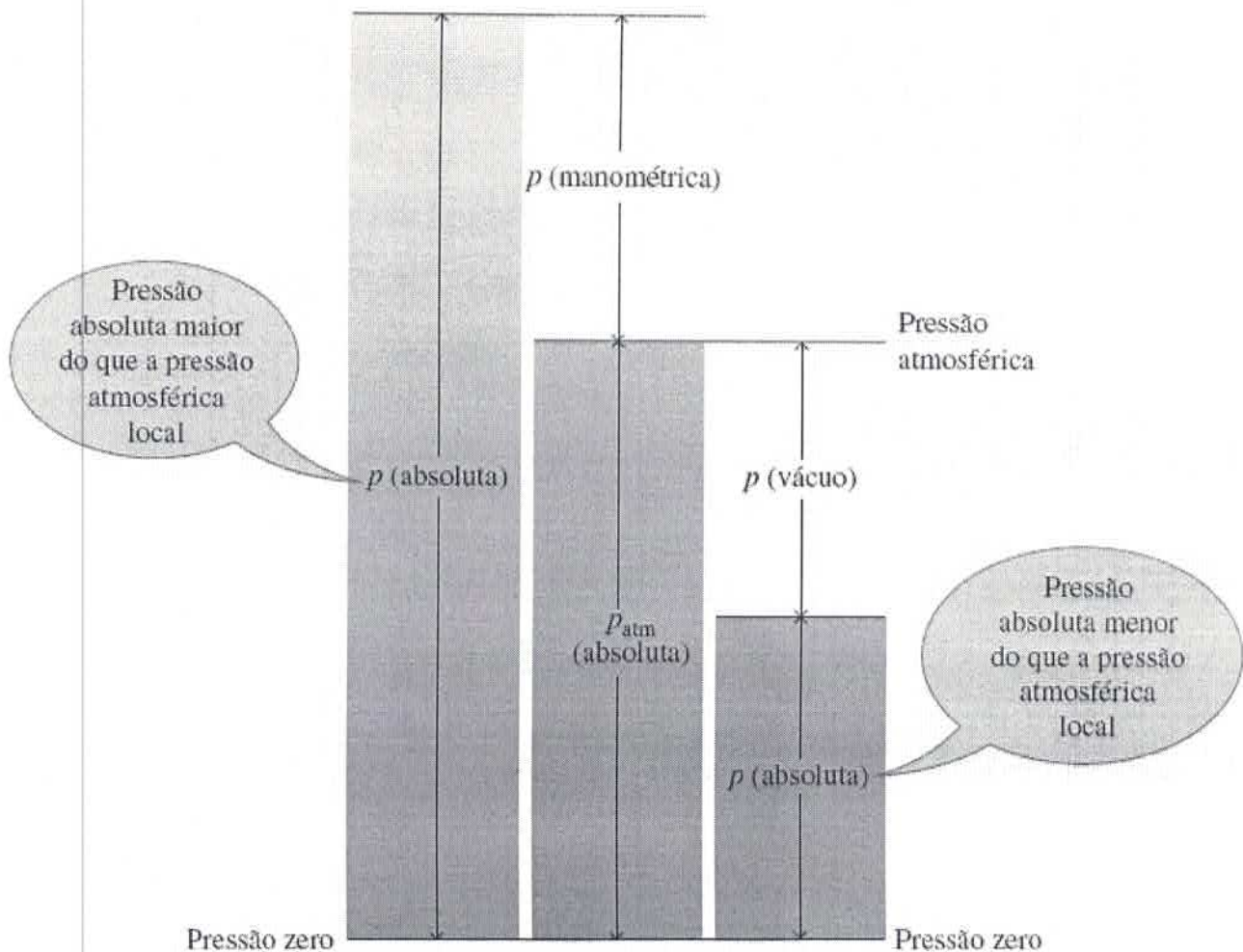


Fig. 1.12 Relação entre as pressões absoluta, atmosférica, manométrica e de vácuo.



## BIOCONEXÕES

Um em cada três americanos tem pressão alta. Como isso pode causar doenças do coração, derrames e outras complicações médicas sérias, os médicos recomendam a todos que a pressão sanguínea seja aferida de forma regular. A aferição da pressão consiste em determinar a pressão máxima (pressão sistólica) em uma artéria, quando o coração está bombeando sangue, e a pressão mínima (pressão diastólica), quando o coração está relaxado, cada uma expressa em milímetros de mercúrio, mmHg. As pressões sistólica e diastólica de pessoas saudáveis deveriam ser inferiores a cerca de 120 mmHg e 80 mmHg, respectivamente.

O aparato-padrão para aferir a pressão usado por décadas, envolvendo uma braçadeira inflável, um manômetro de mercúrio e um estetoscópio, está sendo gradualmente substituído devido à preocupação com a toxicidade do mercúrio em resposta às exigências especiais, incluindo o monitoramento durante o exercício clínico e durante a anestesia. Também para o uso domiciliar e o monitoramento próprio, muitos pacientes acham mais fácil usar dispositivos automáticos, que exibem os dados da pressão sanguínea de forma digital. Isso tem levado engenheiros biomédicos a repensar os equipamentos para aferir a pressão sanguínea e a desenvolver novas abordagens, livres de mercúrio e de estetoscópios. Uma delas utiliza um transdutor de pressão altamente sensível para detectar oscilações na pressão com uma braçadeira inflável colocada em torno do braço do paciente. O programa de monitoramento usa esses dados para calcular as pressões sistólica e diastólica, as quais são exibidas digitalmente.

## 1.7 Temperatura

Nesta seção a propriedade intensiva temperatura será considerada juntamente com as formas de mensurá-la. O conceito de temperatura, assim como o de força, se origina das nossas percepções sensoriais. Ele se encontra enraizado nas noções de corpo “quente” ou “frio”. Usamos nosso sentido do tato para distinguir corpos quentes de frios e organizar os corpos em uma escala em função da ordem em que ele é “mais quente”, decidindo que 1 é mais quente do que 2, que 2 é mais quente do que 3, e assim por diante. No entanto, por mais sensível que seja o tato humano, somos incapazes de avaliar essa qualidade de modo preciso.

É difícil estabelecer uma definição de temperatura em termos de conceitos que sejam definidos independentemente ou aceitos como básicos. Entretanto, é possível chegar a um objetivo entendendo a *igualdade* de temperatura levando em conta o fato de que, quando a temperatura de um corpo muda, outras propriedades também mudam.

Propriedades\_ Ext\_Int

A.3 – Aba e



## **interação térmica (calórica)**

### **equilíbrio térmico**

#### **temperatura**

Para ilustrar isso, considere dois blocos de cobre e suponha que nosso sentido nos diga que um é mais quente do que o outro. Se os blocos fossem colocados em contato e isolados de suas vizinhanças, eles iriam interagir de uma maneira que pode ser descrita como uma interação térmica (calórica). Durante essa interação seria observado que o volume do bloco mais aquecido decresceria um pouco com o tempo, enquanto o volume do bloco mais frio aumentaria com o tempo. No devido tempo não seriam observadas mudanças de volume, e os blocos quando sujeitos ao tato produziram a mesma sensação térmica. De modo similar, seríamos capazes de observar que a resistência elétrica do bloco mais quente decresce com o tempo e que aquela do bloco mais frio aumenta com o tempo; no devido tempo, as resistências elétricas tornar-se-iam também constantes. Quando todas as mudanças em tais propriedades observáveis cessarem, a interação termina. Os dois blocos estão, dessa forma, em equilíbrio térmico. Considerações desse tipo nos levam a concluir que os blocos possuem uma propriedade física que determina se eles estão em equilíbrio térmico. Essa propriedade é chamada temperatura, e podemos postular que, quando os dois blocos estão em equilíbrio térmico, suas temperaturas são iguais.

#### **lei zero da termodinâmica**

É tópicamente de experiência verificar que, quando dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro, eles estão em equilíbrio térmico entre si. Este enunciado, que algumas vezes é denominado lei zero da termodinâmica, é tacitamente admitido em toda medição de temperatura. Então, se desejamos saber se dois corpos apresentam a mesma temperatura não é necessário colocá-los em contato e verificar se suas propriedades observáveis mudam com o tempo, como foi descrito anteriormente. É apenas necessário verificar se eles estão individualmente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo. O terceiro corpo é usualmente um *termômetro*.

#### **1.7.1 Termômetros**

##### **propriedade termométrica**

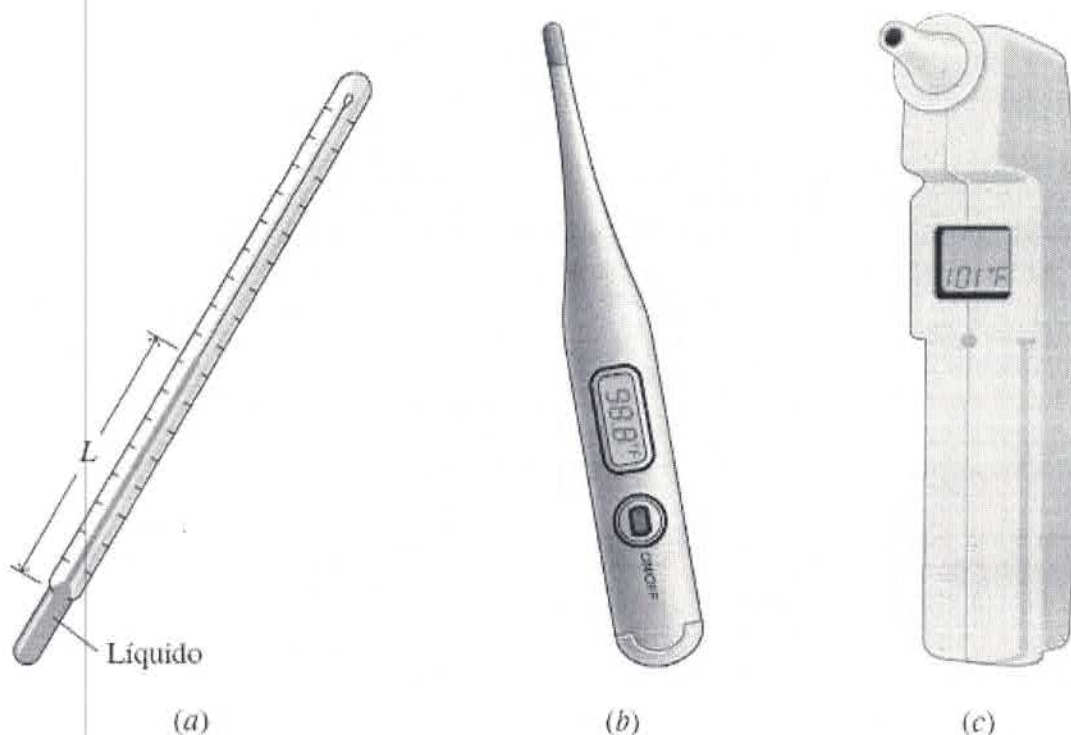
Qualquer corpo com pelo menos uma propriedade mensurável que varia conforme sua temperatura evolui pode ser usado como um termômetro. Tal propriedade é chamada de propriedade termométrica. A substância específica que exibe mudanças na sua propriedade termométrica é conhecida como *substância termométrica*.

Um dispositivo familiar para a medição da temperatura é o termômetro de bulbo, ilustrado na [Fig. 1.13a](#), que

consiste em um tubo de vidro capilar conectado a um bulbo cheio de um líquido, como o mercúrio ou o álcool, e selado na outra extremidade. O espaço acima do líquido é ocupado pelo vapor do líquido ou por um gás inerte. Conforme a temperatura aumenta, o líquido se expande em volume e se eleva no capilar. O comprimento  $L$  do líquido no capilar depende da temperatura. Consequentemente, o líquido é a substância termométrica e  $L$  é a propriedade termométrica. Embora esse tipo de termômetro seja geralmente utilizado para medições rotineiras de temperatura, ele não é muito adequado para aplicações em que uma precisão extrema é necessária.

Sensores mais precisos, conhecidos como *termopares*, estão baseados no princípio de que, quando dois metais distintos são unidos uma força eletromotriz (fem), que é basicamente função da temperatura, será estabelecida em um circuito. Em certos termopares um dos fios é feito de platina com uma pureza especificada e o outro é uma liga de platina e ródio. Os termopares também utilizam cobre e constantan (uma liga de cobre e níquel) e ferro e constantan, e vários outros conjuntos de materiais. Outra classe importante de dispositivos de medição de temperatura é a dos sensores eletroresistivos. Esses sensores são baseados no fato de que a resistência elétrica de uma série de materiais varia de uma maneira previsível com a temperatura. Os materiais usados com esse propósito são normalmente condutores (como platina, níquel ou cobre) ou semicondutores. Os dispositivos que usam condutores são conhecidos como *detectores termorresistivos*. Os que utilizam semicondutores são chamados de *termistores*. A [Fig. 1.13b](#) mostra um termômetro de resistência elétrica a bateria usado atualmente.

Uma variedade de instrumentos mede a temperatura através da radiação, tal como o termômetro de ouvido mostrado na [Fig. 1.13c](#). Eles são conhecidos pelos termos *termômetros de radiação* e *pirômetros ópticos*. Este tipo de termômetro difere daqueles considerados anteriormente, pois não é necessário que ele entre em contato com o corpo cuja temperatura deve ser determinada, o que é uma vantagem quando se lida com corpos em movimento ou corpos com temperaturas extremamente altas.



**Fig. 1.13** Termômetros. (a) De bulbo. (b) Resistência elétrica. (c) Termômetro infravermelho de ouvido.



## ENERGIA & MEIO AMBIENTE

Os termômetros de bulbo de mercúrio utilizados para a verificação de febre, antigamente usados por quase todos os

médicos, são coisa do passado. A *Academia Americana de Pediatria* considerou o mercúrio como uma substância muito tóxica para estar presente nos domicílios familiares. Famílias estão adotando alternativas mais seguras e se livrando dos seus termômetros de mercúrio. O próprio ato de descartar os termômetros cria um problema, afirmam os peritos.

Após 110 anos servindo como principal elemento de calibração para termometria, o Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos (*National Institute of Standards and Technology* — NIST) determinou o fim da utilização dos termômetros de mercúrio em 2011, a fim de estimular a busca de alternativas para medir a temperatura, como os eletrônicos, de bulbo de álcool e de outras misturas líquidas patenteadas.

O descarte apropriado de milhões de termômetros de mercúrio é hoje um problema ambiental, dada a alta toxicidade do elemento, bem como ao fato de não ser biodegradável. O destino desses termômetros deve ser a reciclagem, visando à separação do metal e dos demais componentes para posterior aproveitamento, e não o lixo comum, onde podem quebrar e liberar mercúrio. O mercúrio pode ser reaproveitado em lâmpadas fluorescentes, interruptores e termostatos.

### 1.7.2 Escalas de Temperatura Kelvin e Rankine

Formas empíricas de medir a temperatura, tais como as consideradas na Seção 1.7.1, possuem limitações inerentes.

► POR EXEMPLO a tendência de o líquido congelar em um termômetro de bulbo sujeito a baixas temperaturas impõe um limite inferior na gama de temperaturas que podem ser medidas. Em altas temperaturas os líquidos evaporam, e dessa forma essas temperaturas também não podem ser determinadas por um termômetro de bulbo. Consequentemente, diversos termômetros *diferentes* seriam necessários para cobrir um amplo intervalo de temperatura. ◀ ◀ ◀ ◀ ◀

#### escala Kelvin

Tendo em vista as limitações dos meios empíricos para a medição da temperatura é desejável ter-se um procedimento de atribuição de valores para a temperatura, independente das propriedades de qualquer substância em particular ou de classes de substâncias. Tal escala é denominada escala *termodinâmica* de temperatura. A escala Kelvin é uma escala termodinâmica absoluta que fornece uma definição contínua de temperatura, válida em todos os intervalos de temperatura. A unidade de temperatura na escala Kelvin é o kelvin (K). O kelvin é a unidade-base SI para a temperatura. O melhor valor possível de temperatura em uma escala absoluta é zero.

Para o desenvolvimento da escala Kelvin é necessário o uso do princípio da conservação de energia e da segunda lei da termodinâmica; assim, discussões adicionais sobre esse tópico serão adiadas para a Seção 5.8, depois que esses princípios tiverem sido apresentados. No entanto, podemos notar que a escala Kelvin parte de 0 K, e valores inferiores a este não são definidos.

#### escala Rankine

Por definição, a escala Rankine, cuja unidade é o grau Rankine (°R), é proporcional à temperatura Kelvin de acordo com

$$T(^{\circ}\text{R}) = 1,8T(\text{K}) \quad (1.16)$$

Conforme evidenciado pela Eq. 1.16, a escala Rankine também é uma escala termodinâmica absoluta, com um zero absoluto que coincide com o zero absoluto da escala Kelvin. Nas relações termodinâmicas a temperatura é sempre expressa em termos das escalas Rankine ou Kelvin, a não ser que seja estabelecido de outra forma. Ainda assim, as escalas Celsius e Fahrenheit, consideradas a seguir, são frequentemente utilizadas.

### 1.7.3 Escalas Celsius e Fahrenheit

A Fig. 1.14 mostra a relação entre as escalas Kelvin, Rankine, Celsius e Fahrenheit, assim como os valores de temperatura correspondentes a três pontos fixos: o ponto triplo, o ponto de gelo e o ponto de vapor.

#### ponto triplo

Com base em um acordo internacional, as escalas de temperatura são definidas por um valor numérico associado a um ponto fixo padrão, que é facilmente reproduzível. Trata-se do ponto triplo da água: o estado de equilíbrio entre vapor, gelo e água líquida (Seção 3.2). Por questão de conveniência, a temperatura neste ponto fixo padrão é definida como 273,16 kelvins, abreviado por 273,16 K. Isso faz com que o intervalo de temperatura entre o *ponto de gelo*<sup>1</sup> (273,15 K) e o *ponto de vapor*<sup>2</sup> seja igual a 100 K e, conseqüentemente, esteja em acordo com o intervalo na escala Celsius, que assinala 100 graus Celsius para essa diferença.

#### escala Celsius

A escala de temperatura Celsius usa como unidade o grau Celsius (°C), que possui a mesma magnitude do kelvin. Assim, as *diferenças* de temperatura em ambas as escalas são idênticas. No entanto, o ponto zero na escala Celsius é deslocado para 273,15 K, como ilustrado na seguinte relação entre a temperatura Celsius e a temperatura Kelvin

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (1.17)$$

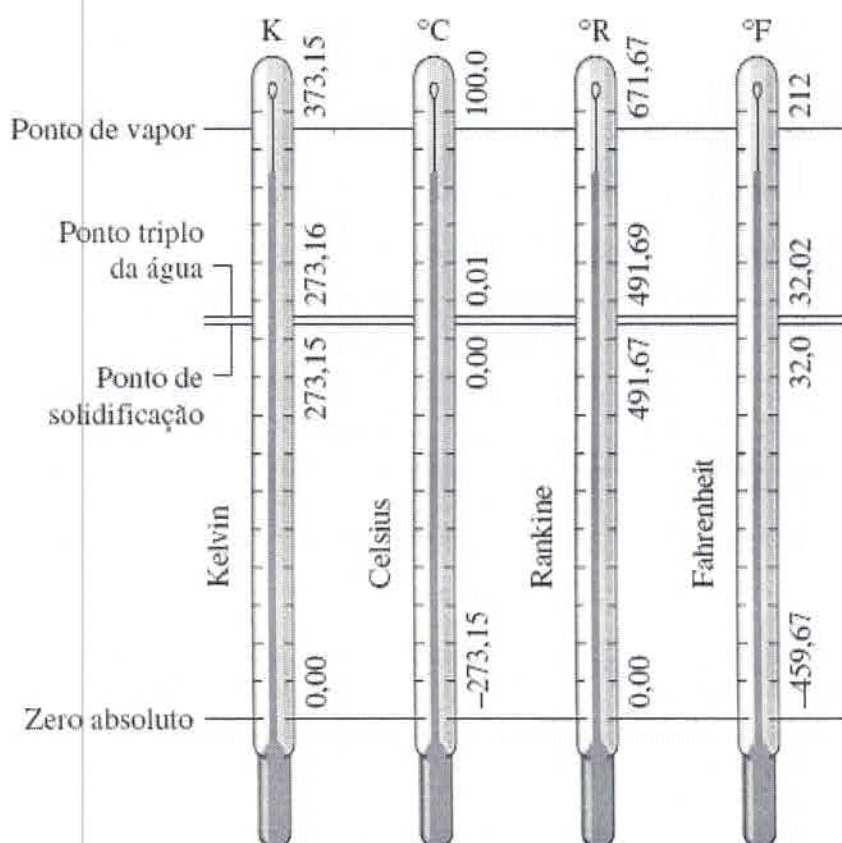


Fig. 1.14 Comparação entre escalas de temperaturas.

Disso pode-se concluir que na escala Celsius o *ponto triplo* da água é 0,01°C e que 0 K corresponde a -273,15°C. Esses valores estão apresentados na Fig. 1.14.

## escala Fahrenheit

Um grau com a mesma magnitude do utilizado na escala Rankine é usado na escala Fahrenheit, mas o ponto zero é transladado de acordo com a relação

$$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67 \quad (1.18)$$

Substituindo as Eqs. 1.17 e 1.18 na Eq. 1.16, obtém-se

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1.19)$$

Essa equação mostra que a temperatura Fahrenheit do ponto de solidificação ( $0^{\circ}\text{C}$ ) é  $32^{\circ}\text{F}$  e o do ponto de vapor ( $100^{\circ}\text{C}$ ) é  $212^{\circ}\text{F}$ . Os 100 graus Celsius ou Kelvin entre o ponto de gelo e o ponto de vapor correspondem a 180 graus Fahrenheit ou Rankine, como mostra a [Fig. 1.14](#).

### TOME NOTA...

Nos cálculos de engenharia é comum arredondar os últimos números das Eqs. 1.17 e 1.18 para 273 e 460, respectivamente. Isso é feito frequentemente neste livro.



## BIOCONEXÕES

A *criobiologia*, a ciência da vida a baixas temperaturas, compreende o estudo biológico de materiais e sistemas (proteínas, células, tecidos e órgãos) a temperaturas que vão desde a criogenia (abaixo de aproximadamente 120 K) até a hipotermia (temperatura baixa do corpo). Aplicações incluem liofilização na indústria farmacêutica, criocirurgias para remover tecido doente, estudo da adaptação de animais e plantas ao frio e armazenamento a longo prazo de células e tecidos (chamado de *criopreservação*).

A criobiologia possui aspectos desafiadores para a engenharia devido às necessidades de refrigeradores capazes de alcançar as baixas temperaturas requeridas pelos pesquisadores. Refrigeradores que suportem as temperaturas criogênicas requeridas pela pesquisa em ambiente de baixa gravidade da Estação Espacial Internacional, mostrada na [Tabela 1.1](#), são ilustrativos. Tais refrigeradores necessitam ser extremamente compactos e econômicos em termos de potência. Além do mais, eles não devem causar riscos. Pesquisas de ponta que requerem um congelador devem incluir o crescimento de cristais de proteína quase perfeitos, importante para a compreensão da estrutura e da função das proteínas e, por fim, para o projeto de novos medicamentos.

## 1.8 Projeto de Engenharia e Análise

A palavra *engenheiro* tem suas raízes no latim, em *ingeniare*, relativo à *invenção*. Hoje, a invenção continua a ser uma função fundamental para a engenharia, com muitos aspectos que vão desde o desenvolvimento de novos dispositivos até a abordagem de questões sociais complexas com o uso da tecnologia. Em busca de muitas dessas atividades, os engenheiros são chamados para projetar e analisar sistemas que tenham por objetivo atender às necessidades humanas. O projeto e a análise são considerados nesta seção.

### 1.8.1 Projeto

#### condicionantes de projeto

Um projeto de engenharia é um processo de tomada de decisão em que princípios extraídos da engenharia e de

outros campos, como economia e estatística, são aplicados, usualmente de forma interativa, de modo a planejar um sistema, um componente de um sistema ou um processo. Os elementos básicos de um projeto incluem o estabelecimento de objetivos, síntese, análise, construção, testes e avaliações. Os projetos normalmente estão sujeitos a uma variedade de condicionantes associados a fatores econômicos, de segurança, de impacto ambiental, entre outros.

Os projetos geralmente têm origem a partir do reconhecimento de uma necessidade ou de uma oportunidade que, no começo, é apenas parcialmente entendida. Assim, antes da busca de soluções é importante definir os objetivos de um projeto. Os primeiros passos em um projeto de engenharia incluem a determinação quantitativa do desempenho e a identificação de projetos alternativos *factíveis* que atendam às especificações. Entre esses projetos *factíveis* existem, geralmente, um ou mais que são “melhores” de acordo com alguns critérios: custo mais baixo, maior eficiência, menor tamanho, menor peso etc. Outros fatores importantes na seleção de um projeto final incluem a confiabilidade, a possibilidade de manufatura e de manutenção e as considerações de mercado. Consequentemente, deve ser buscado um compromisso entre os vários critérios, e podem existir soluções alternativas de projeto que são viáveis.<sup>3</sup>

### 1.8.2 Análise

Um projeto demanda uma síntese: a seleção e a reunião de componentes de modo a formar um conjunto coordenado. No entanto, como cada componente individual pode variar em tamanho, desempenho, custo etc., é geralmente necessário submeter cada componente a um estudo ou a uma análise considerável antes que seja feita a escolha final.

▶ POR EXEMPLO um projeto proposto para um sistema de prevenção de incêndio poderia exigir uma tubulação correndo pelo teto juntamente com numerosos *sprinklers*. Uma vez que uma configuração global tenha sido determinada, é necessária uma análise detalhada de engenharia para especificar o número e o tipo de *sprinklers*, o material da tubulação e os diâmetros dos tubos para os vários ramos do sistema. A análise também deve assegurar que todos os componentes formem um conjunto homogêneo de trabalho, ao mesmo tempo em que restrições importantes de custo, códigos e normas técnicas sejam atendidas. ◀ ◀ ◀ ◀ ◀

Os engenheiros frequentemente realizam análises, seja explicitamente, em função de um procedimento de projeto, seja por algum outro propósito. As análises envolvendo os tipos de sistemas considerados neste livro usam, direta ou indiretamente, uma ou mais de três leis básicas. Essas leis, que independem da substância ou do conjunto de substâncias em consideração, são:

1. princípio da conservação de massa
2. princípio da conservação de energia
3. segunda lei da termodinâmica

Além dessas leis, normalmente é necessário que se utilizem relações entre as propriedades da substância ou das substâncias em questão (Caps. 3, 6, 11 a 14). A segunda lei do movimento de Newton (Caps. 1, 2 e 9), relações como o modelo de Fourier para condução (Cap. 2) e os princípios de engenharia econômica (Cap. 7) também podem ser empregados.

### modelo de engenharia

Os primeiros passos em uma análise termodinâmica são a definição do sistema e a identificação das interações relevantes com as vizinhanças. O foco então se volta para as leis físicas pertinentes e para as relações que permitam que o comportamento do sistema seja descrito em termos de um modelo de engenharia. O objetivo da modelagem é o de obter uma representação simplificada do comportamento do sistema que seja suficientemente fiel para o propósito da análise, mesmo que muitos aspectos exibidos pelo sistema real sejam ignorados. Por exemplo, idealizações comumente usadas em mecânica para simplificar a análise e obter um modelo tratável incluem hipóteses de massas pontuais, polias sem atrito e vigas rígidas. Uma modelagem adequada demanda experiência, e é uma parte da *arte* da engenharia.

A análise de engenharia é mais eficiente quando é feita de forma sistemática. Isso será considerado a seguir.

## 1.9 Metodologia para a Solução de Problemas de Termodinâmica

A meta principal deste livro-texto é ajudá-lo a aprender a resolver problemas de engenharia que envolvam os princípios da termodinâmica. Para atingir esse objetivo são fornecidos numerosos exemplos resolvidos, assim como problemas propostos ao final dos capítulos. É extremamente importante que você estude os exemplos e resolva os problemas, já que o domínio dos fundamentos decorre unicamente da prática.

De modo a maximizar os resultados de seu esforço, é necessário desenvolver uma abordagem sistemática. Você deve pensar cuidadosamente sobre sua solução e evitar a tentação de começar os problemas *pele meio*, com a seleção de uma equação aparentemente apropriada, substituindo números de modo a “extrair” rapidamente um resultado com sua calculadora. Essa abordagem ao acaso de solução de problemas pode conduzir a dificuldades à medida que os problemas se tornarem mais complicados. Dessa forma, é fortemente recomendado que as soluções dos problemas sejam organizadas usando os *cinco passos* a seguir, que são empregados nos exemplos resolvidos deste texto.

① **Dado:** enuncie de forma sucinta, com suas próprias palavras, o que se conhece. Isto requer que você leia o problema cuidadosamente e pense sobre ele.

② **Pede-se:** enuncie concisamente, com suas próprias palavras, o que deve ser determinado.

③ **Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:** desenhe um esboço do sistema a ser considerado. Decida se a análise mais apropriada deve ser feita utilizando-se o conceito de sistema fechado ou de volume de controle, e identifique cuidadosamente a fronteira. Adicione ao diagrama informações do enunciado do problema que sejam relevantes.

Liste todos os valores de propriedades que são fornecidos ou antecipe aqueles que podem ser necessários para cálculos subsequentes. Esboce diagramas de propriedades apropriados (veja Seção 3.2), localizando pontos-chave de estado e indicando, se possível, os processos executados pelo sistema.

A importância de bons esboços do sistema e de diagramas de propriedades não deve ser subestimada. Frequentemente eles são instrumentos que o ajudam a pensar claramente sobre o problema.

④ **Modelo de Engenharia:** para formar um registro de como você modela o problema, liste todas as hipóteses simplificadoras e as idealizações feitas a fim de tornar o problema viável. Algumas vezes essa informação pode ser adicionada aos esboços do passo anterior. O desenvolvimento de um modelo apropriado é um aspecto-chave para o sucesso da solução do problema.

⑤ **Análise:** usando as hipóteses e idealizações adotadas, simplifique as equações e as relações adequadas, colocando-as nas formas que irão produzir os resultados desejados.

É aconselhável trabalhar com as equações o máximo possível antes de substituir os dados numéricos. Após as equações serem simplificadas e colocadas em suas formas finais, analise-as de modo a determinar quais informações adicionais podem ser necessárias. Identifique as tabelas, os gráficos ou as equações de propriedades que forneçam os valores desejados. Esboços de diagramas de propriedades adicionais podem ser úteis neste ponto para esclarecer estados e processos.

Quando todas as equações e dados estiverem disponíveis, substitua os valores numéricos nas equações. Cuidadosamente verifique se o sistema de unidades empregado é consistente e apropriado. Realize, então, os cálculos necessários.

Finalmente, avalie se as magnitudes dos valores numéricos são razoáveis e se os sinais algébricos associados aos



valores numéricos estão corretos.

O formato de solução de problemas usados neste texto tem por objetivo *guiar* o seu raciocínio, e não substituí-lo. Dessa forma, você deve evitar a aplicação mecânica desses cinco passos, já que somente isso traria poucos benefícios. Realmente, à medida que uma certa solução avança, você pode ter que retornar a um passo anterior e revisá-lo tendo em vista um melhor entendimento do problema. Por exemplo, poderia ser necessário adicionar ou suprimir uma hipótese, rever um esboço, determinar dados adicionais de propriedades, e assim por diante.

Os exemplos resolvidos fornecidos neste livro frequentemente possuem notas com vários comentários para ajudar na aprendizagem, inclusive comentários sobre o que foi aprendido, identificando aspectos-chave da solução e discutindo como resultados melhores podem ser obtidos mediante a eliminação de certas hipóteses.

Em alguns exemplos anteriores e problemas no final dos capítulos o roteiro de solução de problemas pode parecer desnecessário ou difícil. No entanto, à medida que os problemas se tornam mais complexos você verá que ele ajuda a reduzir erros, economiza tempo e fornece uma compreensão mais profunda do problema em questão.

O exemplo que se segue ilustra o uso dessa metodologia de solução, juntamente com importantes conceitos sobre sistema introduzidos previamente, incluindo a identificação das interações que ocorrem na fronteira.

### EXEMPLO 1.1 ▶

#### Usando a Metodologia de Solução e o Conceito de Sistemas

Um gerador eólico turboelétrico é montado no topo de uma torre. A eletricidade é gerada à medida que o vento incide constantemente através das pás da turbina. A saída elétrica do gerador alimenta uma bateria.

(a) Considerando apenas o gerador eólico turboelétrico como o sistema, identifique as posições nas fronteiras do sistema, onde o sistema interage com as vizinhanças. Descreva as mudanças que ocorrem no sistema com o tempo.

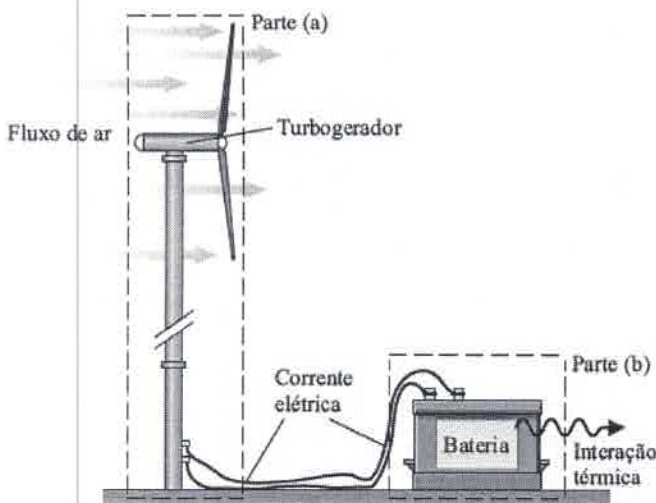
(b) Repita a análise para um sistema que inclui apenas a bateria.

### SOLUÇÃO

**Dado:** um gerador eólico turboelétrico fornece eletricidade para uma bateria.

**Pede-se:** para um sistema que consiste em (a) um gerador eólico turboelétrico, (b) uma bateria, identifique os locais onde o sistema interage com as vizinhanças e descreva as mudanças que ocorrem no sistema com o tempo.

#### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



#### Modelo de Engenharia:

1. Na parte (a), o sistema é o volume de controle mostrado pela linha tracejada na figura.
2. Na parte (b), o sistema é o sistema fechado mostrado pela linha tracejada na figura.
3. A velocidade do vento é constante.

Fig. E1.1

### Análise:

(a) Neste caso, a turbina eólica é estudada como um volume de controle, com fluxo de ar através da fronteira. Outra interação principal entre o sistema e as suas vizinhanças é a corrente elétrica que passa pelos fios. No entanto, sob um ponto de vista macroscópico essa interação não é considerada uma transferência de massa. Com um vento constante, o turbogerador possivelmente atingirá um regime permanente de operação, em que a velocidade de rotação das pás é constante e gera uma corrente elétrica constante.

① (b) Neste caso, a bateria é estudada como um sistema fechado. A principal interação entre o sistema e suas vizinhanças é a corrente elétrica que passa pela bateria através da fiação. Conforme discutido na parte (a), esta interação não é considerada uma transferência de massa. À medida que a bateria é carregada e ocorrem reações químicas em seu interior, a temperatura da superfície da bateria pode se tornar um pouco elevada, e uma interação térmica entre a bateria e suas vizinhanças pode ocorrer. Essa interação possui possivelmente uma importância secundária. Além disso, conforme a bateria é carregada, seu estado muda com o tempo. A bateria não está em regime permanente.

### Habilidades Desenvolvidas

#### Habilidades para...

- aplicar a metodologia de solução de problemas usada neste livro.
- definir um volume de controle e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- distinguir uma operação em regime permanente de uma operação em regime não permanente.

① Usando termos familiares vistos no curso de Física, o sistema da parte (a) envolve a *conversão* de energia cinética em eletricidade, enquanto o sistema da parte (b) envolve o *armazenamento* de energia no interior da bateria.

### Teste-Relâmpago

Pode-se considerar que um sistema *geral*, que consiste no turbogerador e na bateria, opera em regime permanente? Explique. **Resposta:** Não. Um sistema está em regime permanente apenas se nenhuma de suas propriedades varia com o tempo.

### ► RESUMO DO CAPÍTULO E GUIA DE ESTUDOS

Neste capítulo apresentamos alguns dos conceitos fundamentais e definições usados no estudo da termodinâmica. Os princípios da termodinâmica são aplicados por engenheiros para analisar e projetar uma grande variedade de dispositivos destinados a atender às necessidades humanas.

Um aspecto importante da análise termodinâmica é o de identificar sistemas e descrever o comportamento de sistemas em termos de propriedades e de processos. Três propriedades importantes discutidas neste capítulo são: o volume específico, a pressão e a temperatura.

Em termodinâmica consideramos sistemas em estados de equilíbrio e sistemas que passam por processos (mudanças de estado). Estudamos processos nos quais os estados intermediários não são estados de equilíbrio e processos em que o desvio do equilíbrio é desprezível.

Neste capítulo, introduzimos as unidades de massa, comprimento, tempo, força e temperatura no SI e no sistema inglês de engenharia. É necessário se familiarizar com ambos os sistemas de unidades durante o uso deste livro. Os *fatores de conversão* podem ser encontrados no início do livro.

O Cap. 1 foi finalizado com discussões sobre como a termodinâmica pode ser usada em um projeto de engenharia e como resolver problemas de termodinâmica de uma forma sistemática.

Este livro possui várias características que facilitam o estudo e contribuem para uma melhor compreensão. Para uma visão geral, veja *Como Usar Este Livro de Forma Eficaz*, no início do livro.

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.
- ▶ identificar uma fronteira apropriada de um sistema e descrever as interações entre o sistema e suas vizinhanças.
- ▶ trabalhar em uma base molar utilizando a Eq. 1.8.
- ▶ usar as unidades de massa, comprimento, tempo, força e temperatura no SI e no sistema inglês de engenharia e aplicar apropriadamente a segunda lei de Newton, Eqs. 1.16-1.19.
- ▶ aplicar a metodologia de solução de problemas discutida na Seção 1.9.

#### ▶ **CONCEITOS FUNDAMENTAIS NA ENGENHARIA**

**equilíbrio**

**escala Kelvin**

**escala Rankine**

**estado**

**fronteira**

**pressão**

**processo**

**propriedade**

**propriedade extensiva**

**propriedade intensiva**

**sistema**

**sistema fechado**

**temperatura**

**vizinhanças**

## volume de controle

## volume específico

### ► EQUAÇÕES PRINCIPAIS

$n = m/M$  (1.8) Relação entre quantidades de matéria em uma base mássica,  $m$ , e uma base molar,  $n$ .

$T(^{\circ}\text{R}) = 1,8T(\text{K})$  (1.16) Relação entre as temperaturas Rankine e Kelvin.

$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$  (1.17) Relação entre as temperaturas Celsius e Kelvin.

$T(^{\circ}\text{F}) = T(^{\circ}\text{R}) - 459,67$  (1.18) Relação entre as temperaturas Fahrenheit e Rankine.

$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8T(^{\circ}\text{C}) - 32$  (1.19) Relação entre as temperaturas Fahrenheit e Celsius.

### ► EXERCÍCIOS: PONTOS DE REFLEXÃO PARA OS ENGENHEIROS

1. Em 1998, devido a uma confusão envolvendo unidades, a sonda *Mars Climate Orbiter* lançada pela Nasa saiu de curso e se perdeu ao entrar na atmosfera de Marte. Que confusão foi essa?
2. Os centros cirúrgicos de hospitais normalmente têm uma *pressão positiva* em relação aos espaços adjacentes. O que isso significa e por que isso é feito?
3. O compartimento onde fica o piloto de carros de corrida pode alcançar  $60^{\circ}\text{C}$  durante uma corrida. Por quê?
4. O que causa alterações na pressão atmosférica?
5. Por que, em aeronaves comerciais, a cabine de passageiros é pressurizada durante o voo?
6. Laura toma o elevador no décimo andar do prédio em que trabalha para descer ao saguão. Ela deveria esperar que a pressão do ar entre os dois níveis fosse muito diferente?
7. Como fazem os dermatologistas para remover lesões pré-cancerosas na pele através da *criocirurgia*?
8. Quando se caminha com os pés descalços de um tapete para um piso com azulejos de cerâmica, os azulejos parecem *mais frios* do que o tapete mesmo que ambas as superfícies estejam na mesma temperatura. Explique.
9. Por que a temperatura da água do mar sofre variação com a profundidade?
10. As pressões *sistólica* e *diastólica* registradas na aferição da pressão sanguínea são absolutas, manométricas ou de vácuo?
11. Como funciona um termômetro infravermelho?
12. De que forma uma medida de pressão de 14,7 psig difere de uma medida de pressão de 14,7 psia?
13. O que é um *nanotubo*?

14. Se um sistema está em regime permanente, isso significa que suas propriedades intensivas são uniformes em relação à posição ao longo do sistema *ou* são constantes com o tempo? Tais propriedades apresentam ambos os comportamentos, são uniformes com a posição *e* constantes com o tempo? Explique.

► **VERIFICAÇÃO DE APRENDIZADO**

Nos problemas de 1 a 10, correlacione as colunas.

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| 1. __ Fronteira             | A. A condição de um sistema descrito por suas propriedades   |
| 2. __ Sistema fechado       | B. A região do espaço em que pode ocorrer fluxo de massa   |
| 3. __ Volume de controle    | C. Aquilo que está sob estudo  |
| 4. __ Propriedade extensiva | D. Uma transformação entre estados   |
| 5. __ Propriedade intensiva | E. Uma propriedade para a qual o valor em um sistema é a soma dos valores das partes nas quais ele pode ser dividido   |
| 6. __ Processo              | F. Tudo aquilo externo ao sistema  |
| 7. __ Propriedade           | G. Uma quantidade fixa de matéria  |
| 8. __ Estado                | H. Uma propriedade cujo valor independe do tamanho de um sistema e pode variar geometricamente a qualquer momento  |
| 9. __ Vizinhanças           | I. Distingue o sistema de suas vizinhanças   |
| 10. __ Sistema              | J. Uma característica macroscópica do sistema para a qual um valor numérico pode ser atribuído em um dado momento sem o conhecimento do comportamento anterior |

11. Um tipo especial de sistema fechado que não interage de forma nenhuma com as vizinhanças é um \_\_\_\_\_.

12. Descreva a diferença entre volume específico expresso em uma base *mássica* e *molar*.

13. Um sistema é dito em \_\_\_\_\_ se nenhuma das suas propriedades sofre alteração com o tempo.

14. Um volume de controle é um sistema que:

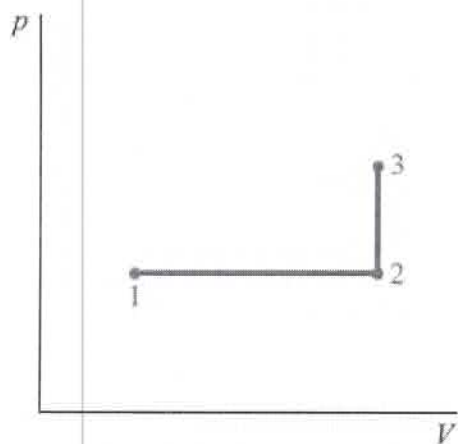
(a) sempre contém a mesma matéria.

- (b) permite a transferência de matéria através da fronteira.
- (c) não interage de forma alguma com as vizinhanças.
- (d) sempre possui volume constante.

15. Qual é o objetivo de um *modelo de engenharia* na análise termodinâmica?

16. \_\_\_\_\_ é a pressão referenciada à pressão zero do vácuo absoluto.

17. Um gás armazenado em um sistema pistão-cilindro passa pelo Processo 1-2-3 mostrado no diagrama *pressão-volume* na Fig. P1.17C. O Processo 1-2-3 é



**Fig. P1.17C**

- (a) um processo sob volume constante seguido de uma compressão sob pressão constante.
- (b) uma compressão sob pressão constante seguida de um processo sob volume constante.
- (c) um processo sob volume constante seguido de uma expansão sob pressão constante.
- (d) uma expansão sob pressão constante seguida de um processo sob volume constante.

18. A frase “Quando dois objetos estão em equilíbrio térmico com um terceiro objeto, eles estão em equilíbrio entre si” é chamada \_\_\_\_\_ .

19. Unidades SI incluem

- (a) kg, m, N.
- (b) K, m, s.
- (c) s, m, lbm.
- (d) K, N, s.

20. Explique por que a pressão *manométrica* apresenta sempre um valor menor aquele correspondente para a pressão *absoluta*.

21. Um sistema está em estado permanente se:

- (a) nenhuma de suas propriedades muda com o tempo.

- (b) nenhuma de suas propriedades muda com a localização no sistema.
- (c) nenhuma de suas propriedades muda com o tempo ou a localização no sistema.
- (d) nenhuma das anteriores.

22. Um sistema com uma massa de 150 lb passa por um processo no qual sua elevação em relação à superfície da Terra aumenta em 500 ft. Se a aceleração da gravidade é  $30 \text{ ft/s}^2$ , o peso desse sistema no estado final será de \_\_\_\_\_ lbf.

23. Classifique os itens mostrados na Fig. P1.23C (a-g), que mostra um diagrama pressão-volume específico, como *propriedade, estado ou processo*.

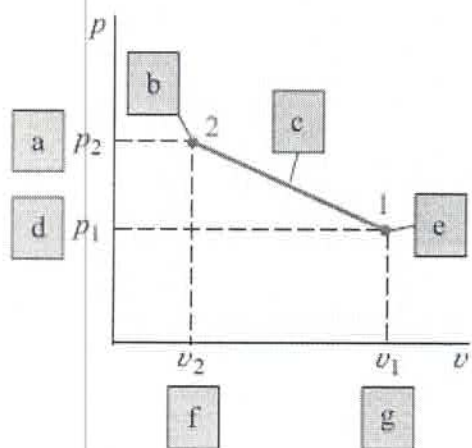


Fig. P1.23C

24. Quando um sistema é isolado,
- (a) sua massa permanece constante.
  - (b) sua temperatura pode mudar.
  - (c) sua pressão pode mudar.
  - (d) todas as anteriores.

25. A pressão resultante atuando sobre um corpo parcial ou totalmente submerso em um líquido é a \_\_\_\_\_.

26. A lista que contém somente propriedades intensivas é:

- (a) volume, temperatura, pressão.
- (b) volume específico, massa, volume.
- (c) pressão, temperatura, volume específico.
- (d) massa, temperatura, pressão.

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

27. A pressão manométrica indica a diferença entre a pressão do sistema e a pressão absoluta da atmosfera fora do

dispositivo de medida.

28. Sistemas podem ser estudados apenas sob um ponto de vista macroscópico.

29. Quilograma, segundo, pé e Newton são unidades do SI.

30. Temperatura é uma propriedade extensiva.

31. Massa é uma propriedade intensiva.

32. O valor da temperatura expresso em graus Celsius é sempre maior que aquele expresso na escala Kelvin.

33. Propriedades intensivas podem ser funções tanto da posição quanto do tempo, enquanto propriedades extensivas podem variar apenas com o tempo.

34. Dispositivos para determinação de pressão incluem barômetros e manômetros.

35. As escalas Kelvin e Rankine são, ambas, escalas absolutas de temperatura.

36. Se um sistema está isolado de suas vizinhanças e não ocorrem alterações nas suas propriedades observáveis, então o sistema estava em equilíbrio no momento em que foi isolado.

37. O volume específico é o inverso da densidade.

38. Volume é uma propriedade extensiva.

39. A libra-força (lbf) é igual à libra-massa (lbm).

40. O valor da temperatura expresso na escala Rankine é sempre maior que o correspondente na escala Fahrenheit.

41. Pressão é uma propriedade intensiva.

42. Um sistema fechado sempre contém a mesma matéria; não há transferência de matéria através da fronteira.

43. Um nanossegundo equivale a  $10^9$  segundos.

44. Um volume de controle é um tipo especial de sistema fechado o qual não interage de forma alguma com as vizinhanças.

45. Quando um sistema fechado é submetido a um processo entre dois estados, a variação na temperatura entre o estado final e inicial independe dos detalhes do processo.

46. Órgãos como o coração, que têm seu volume alterado durante o funcionamento normal, podem ser estudados como volumes de controle.

47. 1 N equivale a  $1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ , mas 1 lbf não equivale a  $1 \text{ lb}\cdot\text{ft}/\text{s}^2$ .

48. Um recipiente contendo 0,5 kg de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) contém 16 lb de  $\text{O}_2$ .

49. Volume específico, o volume por unidade de massa, é uma propriedade intensiva, mesmo sendo volume e massa propriedades extensivas.

50. Um manômetro indicaria 0,2 atm para um sistema que estivesse sob 1,2 atm, se este sistema estivesse ao nível do mar.



51. O quilograma e o metro são exemplos de unidades SI baseadas em objetos fabricados.
52. Em graus Rankine, um valor de temperatura é menor que em graus Kelvin.
53. Se o valor de *qualquer* propriedade de um sistema muda com o tempo, este sistema não está em estado permanente.
54. De acordo com o princípio de Arquimedes, a magnitude da força de empuxo atuando sobre um corpo submerso é igual ao peso do corpo.
55. A composição de um sistema fechado não muda.
56. Temperatura é a propriedade igual entre dois sistemas que se encontram em equilíbrio térmico.
57. O volume de um sistema fechado pode variar.
58. A unidade de pressão psia indica a pressão absoluta expressa em lbf/in<sup>2</sup>.

## ► PROBLEMAS: DESENVOLVENDO HABILIDADES PARA ENGENHARIA

### Explorando Conceitos sobre Sistemas

1.1 Usando a Internet, obtenha informações sobre a operação de uma aplicação listada na [Tabela 1.1](#). Obtenha informações suficientes para fornecer uma descrição completa da aplicação, juntamente com os aspectos relevantes da termodinâmica. Apresente os resultados de sua pesquisa em um memorando.

1.2 Conforme ilustrado na Fig. P1.2, água circula através de um sistema de tubulação, suprindo várias necessidades domésticas. Considerando o aquecedor de água como um sistema, identifique os locais na fronteira do sistema, onde o sistema interage com suas vizinhanças e descreva as ocorrências significativas no interior do sistema. Repita a análise para a lavadora de louças e para o chuveiro. Apresente suas conclusões em um memorando.

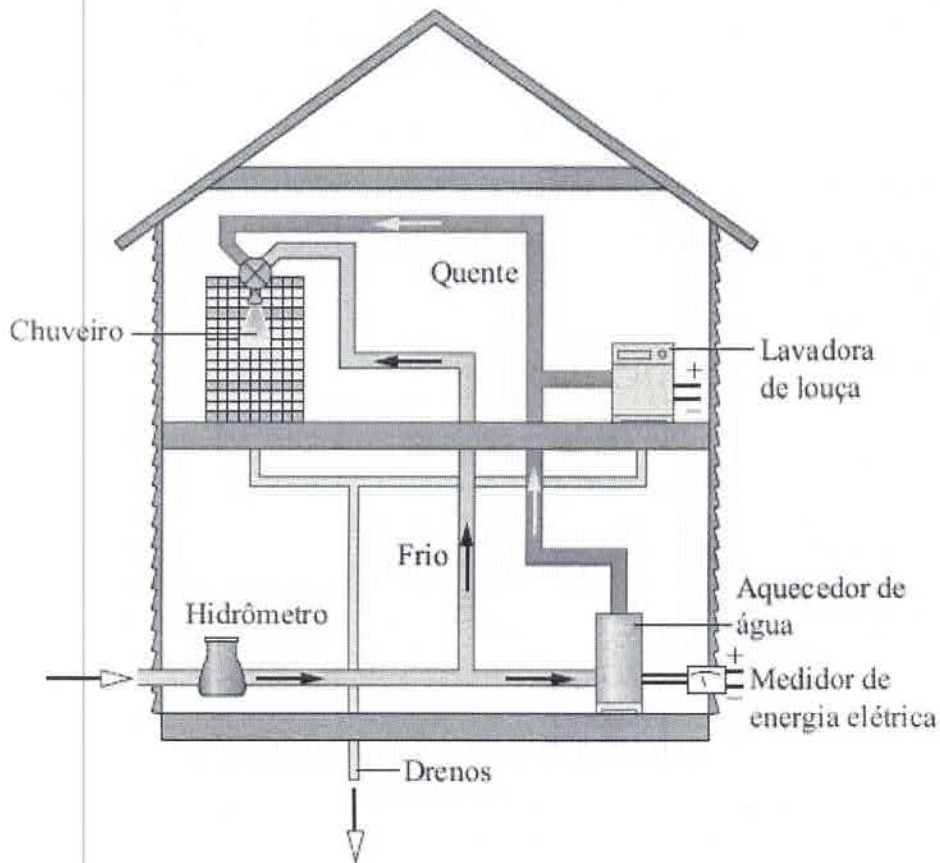
1.3 Muitos monumentos e praças incluem instalações como fontes, lagos artificiais (ou naturais), quedas d'água, espelhos d'água etc. Escolha um monumento ou uma praça. Pesquise na internet a história desse lugar e sua estrutura e desenho arquitetônico. Identifique uma fronteira adequada para a água e determine se a água deve ser tratada como um sistema fechado ou um volume de controle. Descreva os dispositivos necessários para conseguir o efeito desejado e para manter a qualidade da água. Prepare uma apresentação de 5 minutos resumindo sua pesquisa e apresente para sua turma.

### Trabalhando com Unidades

1.4 Realize as seguintes conversões de unidades:

- (a) 1 L para in<sup>3</sup>
- (b) 650 J para Btu
- (c) 0,135 kW para ft · lbf/s
- (d) 378 g/s para lb/min
- (e) 304 kPa para lbf/in<sup>2</sup>
- (f) 55 m<sup>3</sup>/h para ft<sup>3</sup>/s
- (g) 50 km/h para ft/s

(h) 8896 N para tonelada (= 2000 lbf)



**Fig. P1.2**

1.5 Realize as seguintes conversões de unidades:

- (a) 122 in<sup>3</sup> para L
- (b) 778,17 ft · lbf para kJ
- (c) 100 HP para kW
- (d) 1000 lb/h para kg/s
- (e) 29,392 lbf/in<sup>2</sup> para bar
- (f) 2500 ft<sup>3</sup>/min para m<sup>3</sup>/s
- (g) 75 milhas/h para km/h
- (h) 1 tonelada (= 2000 lbf) para N

1.6 Qual dos seguintes objetos pesa aproximadamente 1 N?

- a. um grão de arroz.
- b. um morango pequeno.

c. uma maçã de tamanho médio.

d. uma melancia grande.

### Trabalhando com Força e Massa

**1.7** Uma pessoa cuja massa é 150 lb (68,0 kg) pesa 144,4 lbf (642,3 N). Determine (a) a aceleração local da gravidade em  $\text{ft/s}^2$  e (b) a massa da pessoa, em lb, e o peso, em lbf, se  $g = 32,174 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

**1.8** A espaçonave *Phoenix*, com massa de 350 kg, foi usada na exploração de Marte. Determine o peso da *Phoenix*, em N, (a) na superfície de Marte, onde a aceleração da gravidade é  $3,73 \text{ m/s}^2$ , e (b) na Terra, onde a aceleração da gravidade é  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

**1.9** Os pesos atômico e molecular de algumas substâncias de uso corrente estão listados nas tabelas do Apêndice A-1 e A-1E. Usando os dados da tabela apropriada, determine

(a) a massa, em kg, de 20 kmol de cada uma das seguintes substâncias: ar, C,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ .

(b) o número de lbmol em 50 lb (22,7 kg) de cada uma das seguintes substâncias:  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , e  $\text{C}_3\text{H}_8$ .

**1.10** Em vários acidentes frontais severos de automóveis uma desaceleração de 60  $g$  ou mais ( $g = 32,2 \text{ ft/s}^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$ ) frequentemente resulta em uma fatalidade. Que força, em lbf, age sobre uma criança cuja massa é de 50 lb (22,7 kg), quando sujeita a uma desaceleração de 60  $g$ ?

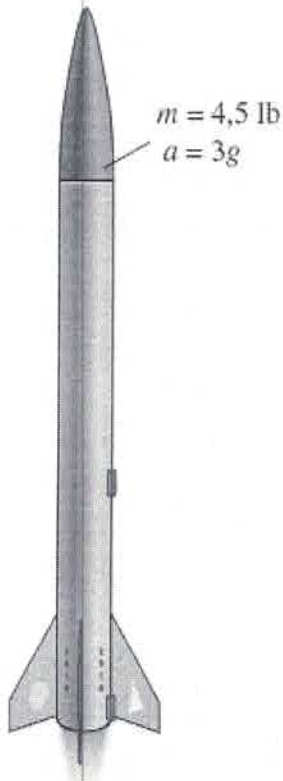
**1.11** No supermercado você coloca uma abóbora com uma massa de 12,5 lb (5,7 kg) em uma balança de mola para produtos. A mola da balança opera de tal forma que para cada 4,7 lbf (20,9 N) aplicada, a mola alonga uma polegada. Se a aceleração local da gravidade é de  $32,2 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ), que distância, em polegadas, a mola alongou?

**1.12** Uma mola se comprime de 0,14 in (0,004 m) para cada 1 lbf (4,4 N) de força aplicada. Determine a massa de um objeto, em libras, que causa uma deflexão da mola de 1,8 in (0,05 m). A aceleração local da gravidade é dada por  $g = 31 \text{ ft/s}^2$  ( $9,4 \text{ m/s}^2$ ).

**1.13** Em uma certa altitude, o piloto de um balão tem uma massa de 120 lb (54,4 kg) e um peso de 119 lbf (529,3 N). Qual é a aceleração local da gravidade, em  $\text{ft/s}^2$ , nesta altitude? Se o balão flutuar para uma outra altitude, onde  $g = 32,05 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ), qual será seu peso, em lbf, e a massa, em lb?

**1.14** Estime a magnitude da força, em lbf, exercida sobre um gancho de 12 lb (5,4 kg), em uma colisão de  $10^{-3} \text{ s}$  de duração com um avião decolando a 150 milhas por hora.

**1.15** Determine a força aplicada para cima, em lbf, necessária para acelerar um modelo de foguete de 4,5 lb (2,0 kg) verticalmente para cima, conforme ilustrado na Fig. P1.15, com uma aceleração de 3  $g$ . A única outra força significativa que atua no foguete é a gravidade, e  $1 g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).



**Fig. P1.15**

**1.16** Um objeto cuja massa é de 50 lb (22,7 kg) é projetado para cima por uma força de 10 lbf (44,5 N). A única força que atua sobre o objeto é a força da gravidade. A aceleração da gravidade é  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ). Determine a aceleração resultante do objeto, em  $\text{ft/s}^2$ . A aceleração resultante é para cima ou para baixo?

**1.17** Um satélite de comunicação pesa 4400 N na Terra, onde  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Qual o peso do satélite, em N, quando em órbita em torno da Terra, em uma posição onde a aceleração da gravidade é  $0,224 \text{ m/s}^2$ ? Expresse cada peso em lbf.

**1.18** Usando os dados da aceleração local da gravidade da Internet, determine o peso, em N, de uma pessoa cuja massa é de 80 kg morando em:

- (a) Cidade do México, México
- (b) Cape Town, África do Sul
- (c) Tóquio, Japão
- (d) Chicago, IL
- (e) Copenhague, Dinamarca

**1.19** Uma cidade tem uma torre de água com uma capacidade de 1 milhão de galões de armazenamento. Se a massa específica da água é  $62,4 \text{ lb/ft}^3$  ( $999,5 \text{ kg/m}^3$ ) e a aceleração local da gravidade é de  $32,1 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ), qual é a força, em lbf, que a base estrutural deve apresentar para suportar a água na torre?

**Usando Volume Específico, Volume e Pressão**

- 1.20 Um sistema fechado que consiste em 0,5 kmol de amônia ocupa um volume de  $6 \text{ m}^3$ . Determine (a) o peso do sistema, em N, e (b) o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kmol}$  e  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Considere  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .
- 1.21 Uma amostra de 2 lb de um líquido desconhecido ocupa um volume de  $62,6 \text{ in}^3$ . Determine (a) o volume específico, em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ , e (b) a densidade, em  $\text{lb}/\text{ft}^3$ .
- 1.22 Um recipiente fechado com volume de 1 litro contém  $2,5 \cdot 10^{22}$  moléculas de vapor de amônia. Determine para a amônia (a) a quantidade presente, em kg e kmol, e (b) o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kg}$  e  $\text{m}^3/\text{kmol}$ .
- 1.23 O volume específico de 5 kg de vapor d'água a 1,5 MPa e  $440^\circ\text{C}$  é  $0,2160 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Determine (a) o volume, em  $\text{m}^3$ , ocupado pelo vapor, (b) a quantidade presente, em mol, e (c) o número de moléculas.
- 1.24 A pressão do gás contido no conjunto cilindro-pistão da Fig. 1.1 varia com seu volume de acordo com  $p = A + (B/V)$ , onde A e B são constantes. Se a pressão está em  $\text{lb}/\text{ft}^2$  e o volume está em  $\text{ft}^3$ , quais são as unidades de A e B?
- 1.25 Conforme ilustrado na Fig. P1.25, um gás está contido em um conjunto cilindro-pistão. A massa do pistão e a área transversal estão indicados por  $m$  e  $A$ , respectivamente. A única força agindo sobre o topo do pistão é devida à pressão atmosférica,  $p_{\text{atm}}$ . Considerando que o pistão se move suavemente no cilindro e que a aceleração local da gravidade  $g$  é constante, mostre que a pressão do gás que age na parte inferior do pistão permanece constante conforme o volume do gás varia. O que faria com que o volume do gás variasse?

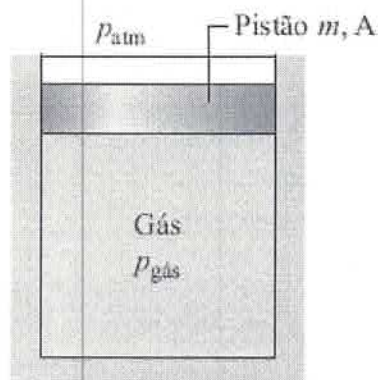
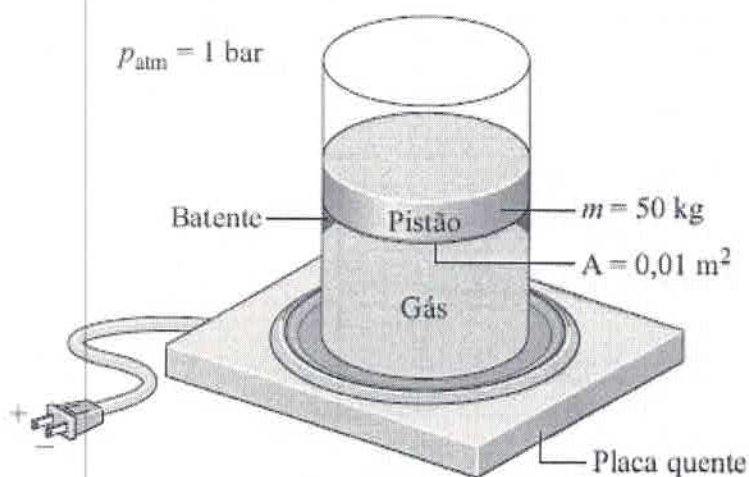


Fig. P1.25

- 1.26 Um conjunto cilindro-pistão vertical, como ilustrado na Fig. P1.26, contendo um gás é colocado sobre uma placa quente. O pistão inicialmente repousa sobre os batentes. Com o início do aquecimento, a pressão do gás aumenta. Em que pressão, em bar, o pistão começa a subir? Considere que o pistão se move suavemente no cilindro e que  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .



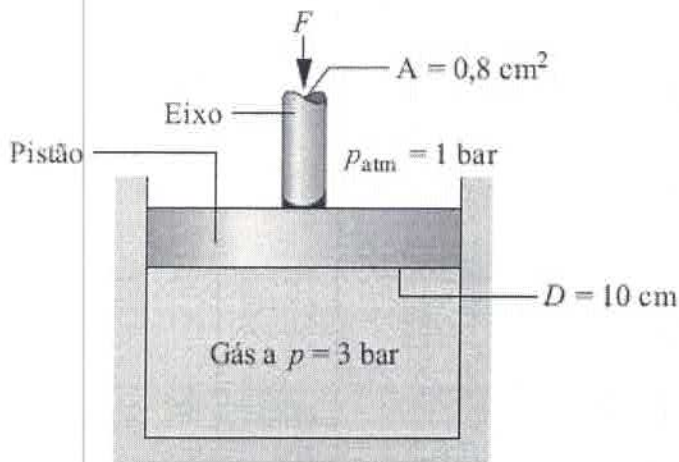
**Fig. P1.26**

**1.27** Um sistema que consiste em 3 kg de um gás em um conjunto cilindro-pistão sofre um processo durante o qual a relação entre a pressão e o volume específico é dada por  $p v^{0,5} = \text{constante}$ . O processo inicia com  $p_1 = 250 \text{ kPa}$ ,  $V_1 = 1,5 \text{ m}^3$  e termina com  $p_2 = 100 \text{ kPa}$ . Determine o volume específico final, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Represente o processo em um gráfico de pressão *versus* o volume específico.

**1.28** Um sistema fechado que consiste em 4 lb (1,814 kg) de um gás sofre um processo durante o qual a relação entre a pressão e o volume é dada por  $p V^n = \text{constante}$ . O processo se inicia com  $p_1 = 15 \text{ lbf/in}^2$  (103.421 Pa),  $v_1 = 1,25 \text{ ft}^3/\text{lb}$  (0,28  $\text{m}^3$ ) e termina com  $p_2 = 53 \text{ lbf/in}^2$  (365.422 Pa),  $v_2 = 0,5 \text{ ft}^3/\text{lb}$  (0,08  $\text{m}^3$ ). Determine (a) o volume, em  $\text{ft}^3$ , ocupado pelo gás nos estados 1 e 2, e (b) o valor de  $n$ . Esboce os Processos 1-2 em um gráfico pressão-volume.

**1.29** Um sistema que consiste em monóxido de carbono (CO) em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a  $p_1 = 200 \text{ lbf/in}^2$  (1379, 0 kPa), ocupa um volume de  $2,0 \text{ m}^3$ . O monóxido de carbono é expandido para  $p_2 = 40 \text{ lbf/in}^2$  (275,8 kPa) e um volume final de  $3,5 \text{ m}^3$ . Durante o processo, a relação entre a pressão e o volume é linear. Determine o volume, em  $\text{ft}^3$ , em um estado intermediário em que a pressão é de  $150 \text{ lbf/in}^2$  (1034, 2 kPa), e esboce o processo em um gráfico de pressão *versus* volume.

**1.30** A Fig. P1.30 ilustra um gás contido em um conjunto cilindro-pistão pistão vertical. Um eixo vertical, cuja área transversal é de  $0,8 \text{ cm}^2$  é preso no topo do pistão. Determine a magnitude da força  $F$ , em N, que age sobre o eixo, necessária se a pressão do gás for de 3 bar. As massas do pistão e do eixo são 24,5 kg e 0,5 kg, respectivamente. O diâmetro do pistão é de 10 cm. A pressão atmosférica local é 1 bar. Considere que o pistão se move suavemente no cilindro e que  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .



**Fig. P1.30**

**1.31** Um gás contido em um conjunto cilindro-pistão sofre três processos em série:

**Processo 1-2:** Expansão sob pressão constante a 1 bar de  $V_1 = 0,5 \text{ m}^3$  até

$$V_2 = 2 \text{ m}^3$$

**Processo 2-3:** Volume constante até 2 bar

**Processo 3-4:** Compressão sob pressão constante até  $1 \text{ m}^3$

**Processo 4-1:** Compressão com  $pV^{-1} = \text{constante}$

Represente esquematicamente o processo em um diagrama p-V mostrando cada processo.

**1.32** Considere a [Fig. 1.7](#),

(a) para a pressão no tanque de 1,5 bar e a pressão atmosférica de 1 bar, determine  $L$ , em metros, para a água com massa específica de  $997 \text{ kg/m}^3$ , como o líquido do manômetro. Considere  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

(b) determine  $L$ , em cm, se o líquido do manômetro for o mercúrio com massa específica de  $13,59 \text{ g/cm}^3$  e a pressão do gás for 1,3 bar. Um barômetro indica que a pressão atmosférica local é 750 mmHg. Considere  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

**1.33** A Fig. P1.33 mostra um tanque de armazenamento de gás natural. Em uma sala de instrumentação ao lado, um manômetro de tubo em U de mercúrio em comunicação com o tanque de armazenamento indica uma leitura  $L = 1,0 \text{ m}$ . Considerando que a pressão atmosférica é 101 kPa, a massa específica do mercúrio é  $13,59 \text{ g/cm}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , determine a pressão do gás natural, em kPa.

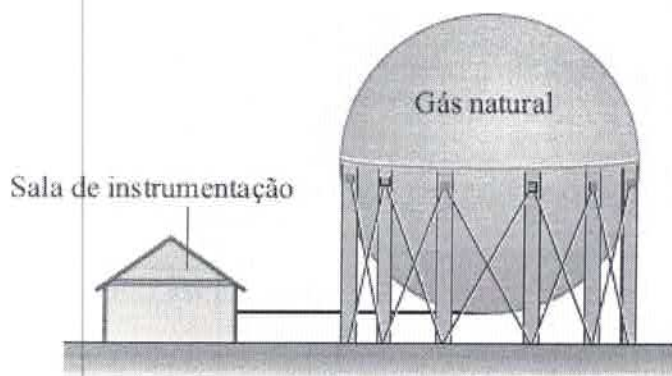


Fig. P1.33

1.34 Conforme ilustrado na Fig. P1.34, a saída de um compressor de gás está ligada a um tanque receptor, mantendo o conteúdo do tanque a uma pressão de 200 kPa. Para a pressão atmosférica local de 1 bar, qual é a leitura do manômetro de Bourdon montado na parede do tanque, em kPa? Esta é uma pressão de *vácuo* ou uma pressão *manométrica*? Explique.

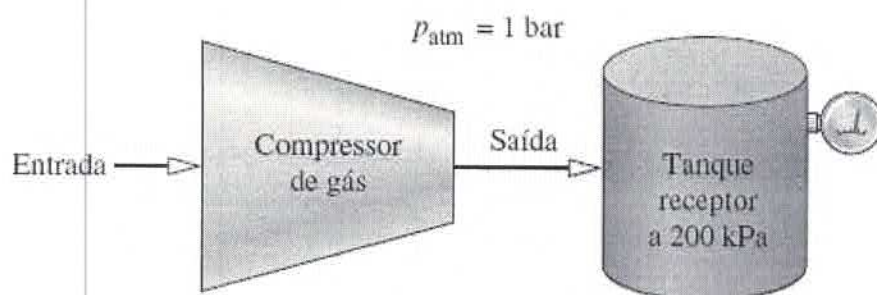


Fig.P1.34

1.35 O barômetro apresentado na Fig. P1.35 contém mercúrio ( $\rho = 13,59 \text{ g/cm}^3$ ). Se a pressão atmosférica local é de 100 kPa e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , determine a altura da coluna de mercúrio,  $L$ , em mmHg e inHg.

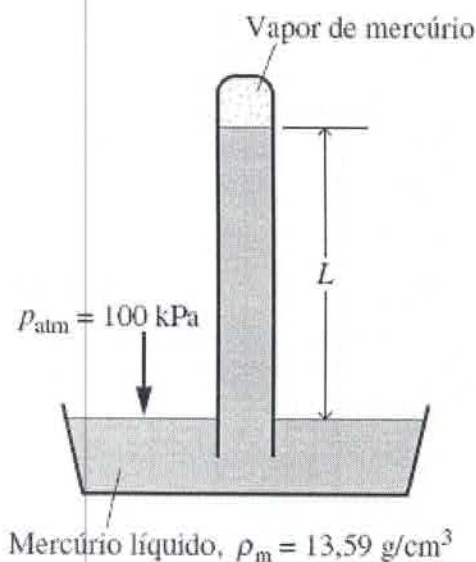


Fig. P1.35

1.36 Querosene líquido escoia através de um *medidor Venturi*, conforme ilustrado na Fig. P1.36. A pressão do



querosene no tubo suporta colunas de querosene que diferem de 12 cm de altura. Determine a diferença de pressão entre os pontos a e b, em kPa. A pressão aumenta ou diminui enquanto o querosene escoava do ponto a para o b e o diâmetro do tubo diminui? A pressão atmosférica é de 101 kPa, o volume específico do querosene é de  $0,00122 \text{ m}^3/\text{kg}$  e a aceleração da gravidade é  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

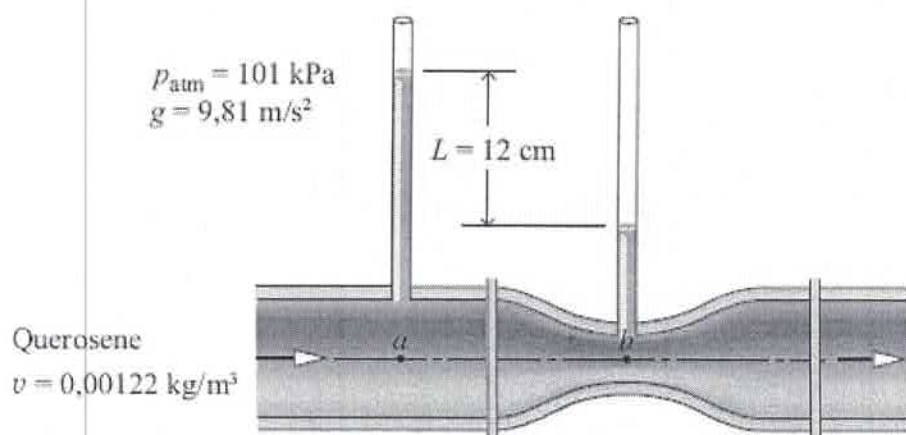


Fig. P1.36

1.37 A Fig. P1.37 mostra um tanque no interior de um outro, cada um contendo ar. O manômetro de pressão A, que indica a pressão no tanque A, está localizado no interior do tanque B e registra 5 psig (vácuo). O manômetro de tubo em U conectado ao tanque B contém uma coluna de água  $L = 10 \text{ in}$ . Usando os dados do diagrama, determine as pressões absolutas do ar dentro do tanque B e dentro do tanque A, ambas psia. A pressão atmosférica nas vizinhanças do tanque B é 14,7 psia. A aceleração da gravidade é  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ .

1.38 Conforme ilustrado na Fig. P1.38, um veículo de exploração submarina submerge de uma profundidade de 1000 ft (304,8 m). Considerando que a pressão atmosférica na superfície é de 1 atm, a massa específica da água é de  $62,4 \text{ lb/ft}^3$  ( $999,5 \text{ kg/m}^3$ ) e  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ), determine a pressão sobre o veículo em atm.

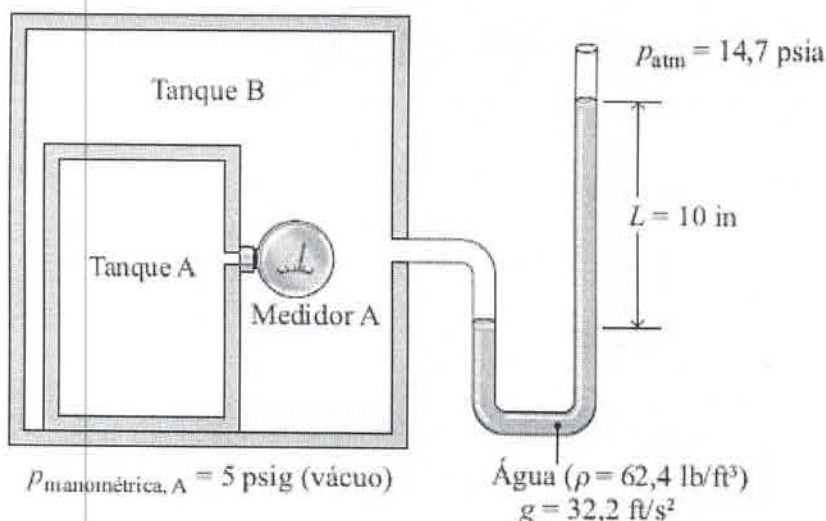
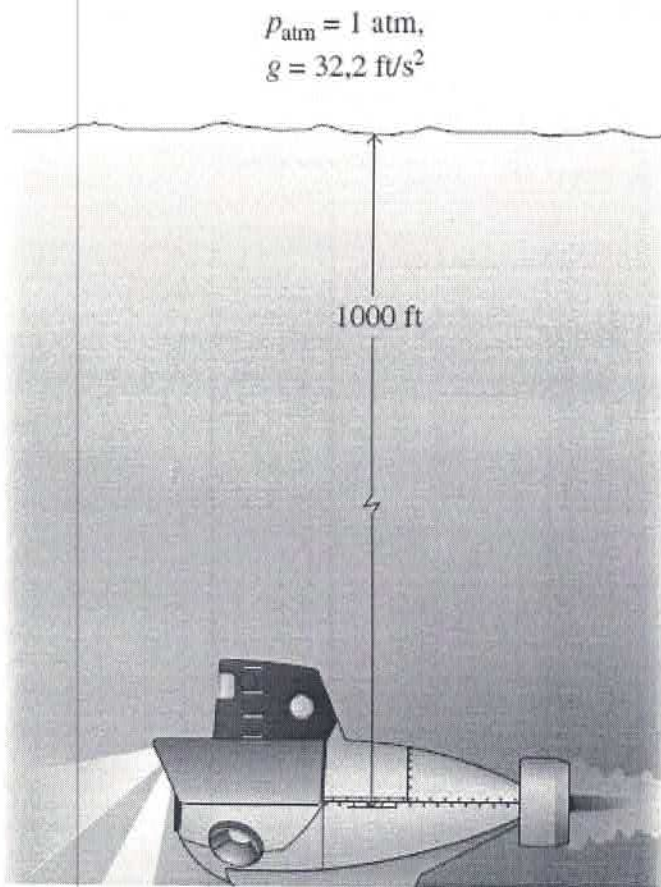


Fig. P1.37

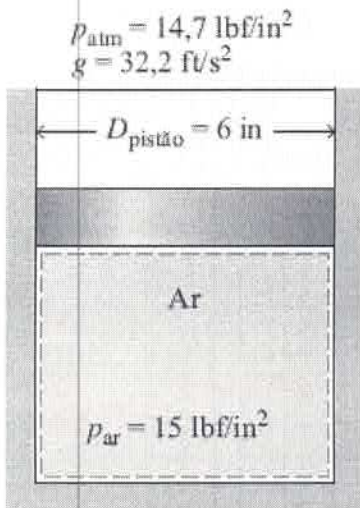


**Fig. P1.38**

**1.39** Mostre que a pressão atmosférica padrão de 760 mmHg equivale a 101,3 kPa. A densidade do mercúrio é  $13.590 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

**1.40** Um gás entra em um compressor que proporciona uma razão de pressão (entre a pressão de saída e a de entrada) igual a 8. Considerando que um manômetro indica que a pressão do gás na entrada é de 5,5 psig (37.921 Pa), qual a pressão absoluta, em psia, do gás na saída? Considere que a pressão atmosférica é  $14,5 \text{ lbf/in}^2$  (99.975 Pa).

**1.41** Como mostrado na Fig. P1.41, um conjunto pistão-cilindro orientado verticalmente contendo ar encontra-se em equilíbrio estático. A atmosfera exerce uma pressão de  $14,7 \text{ lbf/in}^2$  no topo do pistão, que tem 6 in de diâmetro. A pressão absoluta do ar dentro do cilindro é de  $16 \text{ lbf/in}^2$ . A aceleração local da gravidade é  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ . Determine (a) a massa do pistão, em lb, e (b) a pressão manométrica do ar no cilindro, em psig.



**Fig. P1.41**

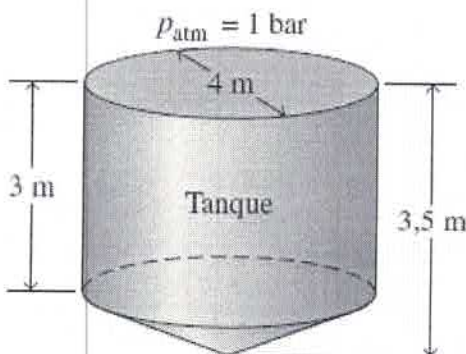
**1.42** Um conjunto pistão-cilindro orientado verticalmente, contendo ar, encontra-se em equilíbrio estático. A atmosfera exerce uma pressão de 101 kPa sobre o pistão, que tem 0,5 m de diâmetro. A pressão manométrica do ar no interior do cilindro é 1,2 kPa e a aceleração da gravidade é  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Um peso é adicionado ao topo do pistão, causando movimento até que o sistema alcance um novo equilíbrio. Nesta posição, a pressão manométrica do ar no interior do cilindro é 2,8 kPa. Determine (a) a massa do pistão em kg e (b) a massa do peso adicionado, também em kg.

**1.43** A pressão da água em um encanamento geral de água localizado no nível da rua pode ser insuficiente para que a água alcance os andares superiores de edifícios altos. Nesse caso, a água pode ser bombeada para cima, em direção a um tanque que abastece o edifício de água por gravidade. Para um tanque de armazenamento aberto, no topo de um edifício de 300 ft (91,4 m) de altura, determine a pressão, em  $\text{lbf/in}^2$ , no fundo do tanque quando contém água até uma profundidade de 20 ft (6,1 m). A massa específica da água é de  $62,2 \text{ lb/ft}^3$  ( $996,3 \text{ kg/m}^3$ ),  $g = 32,0 \text{ ft/s}^2$  ( $9,7 \text{ m/s}^2$ ), e a pressão atmosférica local é de  $14,7 \text{ lbf/in}^2$  (101.354 Pa).

**1.44** A Fig. P1.44 mostra um tanque de 4 m de diâmetro usado para coletar água da chuva. Como ilustrado na figura, a profundidade do tanque varia linearmente de 3,5 m em seu centro a 3 m ao longo do perímetro. A pressão atmosférica local é de 1 bar, a aceleração da gravidade é de  $9,8 \text{ m/s}^2$  e a massa específica da água é  $987,1 \text{ kg/m}^3$ . Considerando que o tanque está cheio de água, determine

(a) a pressão, em kPa, na parte inferior central do tanque.

(b) a força total, em kN, que age sobre o fundo do tanque.



**Fig. P1.44**

1.45 Considerando que a pressão da água na base da torre de água ilustrada na Fig. P1.45 é de 4,15 bar, determine a pressão do ar aprisionado acima do nível da água, em bar. Considere a massa específica da água como  $10^3 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

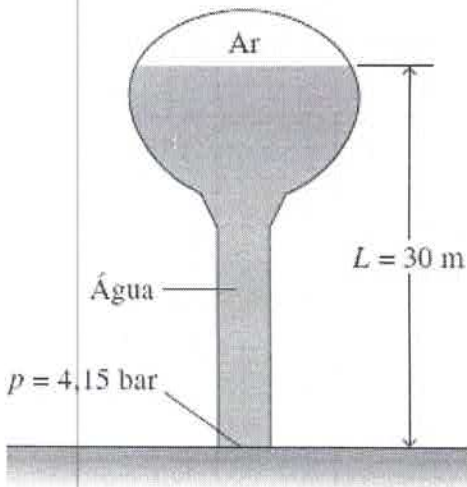


Fig. P1.45

1.46 A Fig. P1.46 ilustra um manômetro *inclinado* usado para medir a pressão de um gás em um reservatório. (a) Usando os dados da figura, determine a pressão do gás em  $\text{lbf/in}^2$ . (b) Expresse a pressão manométrica ou a pressão de vácuo, conforme apropriado, em  $\text{lbf/in}^2$ . (c) Qual a vantagem que o manômetro inclinado apresenta sobre o manômetro do tipo tubo em U mostrado na Fig. 1.7?

1.47 A Fig. P1.47 mostra uma boia esférica com 8500 N de peso e um diâmetro de 1,5 m, ancorada no fundo de um lago por meio de um cabo. Determine a força exercida pelo cabo, em N. Considere a massa específica da água como  $10^3 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

1.48 Em virtude de uma ruptura em um tanque de armazenamento de óleo enterrado, águas subterrâneas entraram no tanque até a profundidade ilustrada na Fig. P1.48. Determine a pressão na interface óleo-água e no fundo do tanque, ambas em  $\text{lbf/in}^2$  (pressão manométrica).

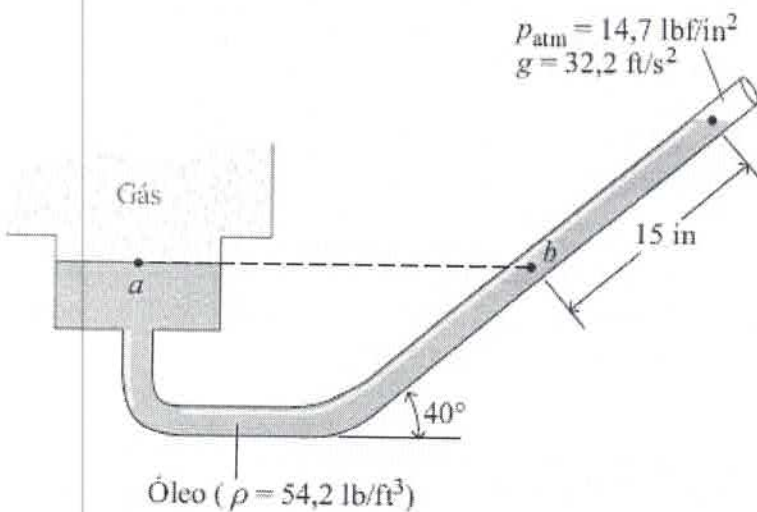


Fig. P1.46

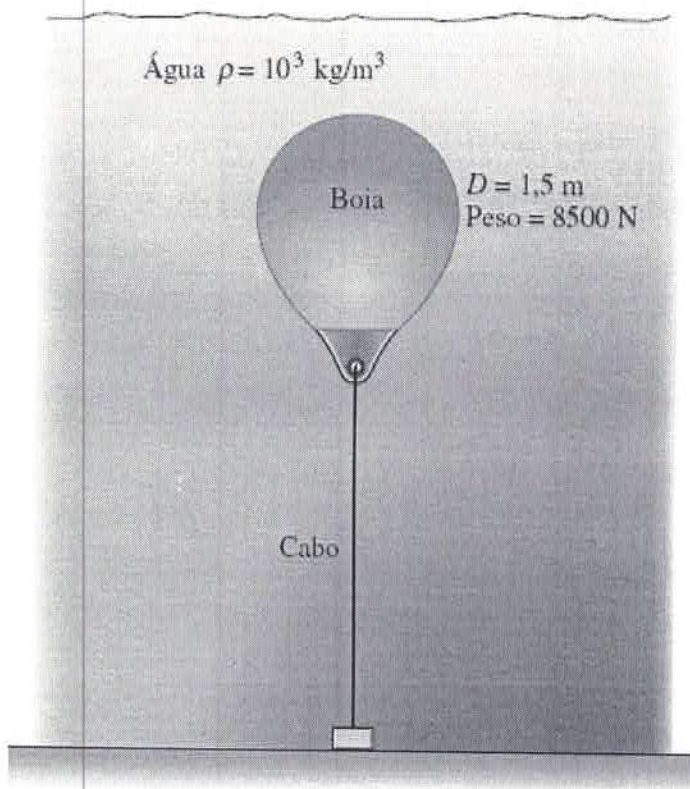
## CONVERSÃO

$$p_{\text{atm}} = 14,7 \text{ lbf/in}^2 = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$g = 32,2 \text{ ft/s}^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$15 \text{ in} = 0,38 \text{ m}$$

$$\rho = 845 \text{ lb/ft}^3 = 1,3 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$



**Fig. P1.47**

As massas específicas da água e do óleo são, respectivamente, 62 (993,1) e 55 (881,0), ambas em  $\text{lb/ft}^3$  ( $\text{kg/m}^3$ ). Faça  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

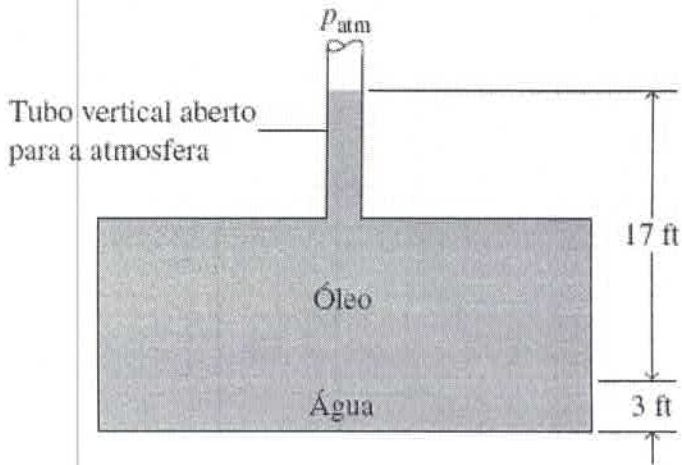


Fig. P1.48

1.49 A Fig. P1.49 mostra um tanque fechado contendo ar e óleo, ao qual está conectado um manômetro de tubo em U de mercúrio e um manômetro de pressão. Determine a leitura indicada no manômetro de pressão, em  $\text{lbf/in}^2$  (pressão manométrica). As massas específicas do óleo e do mercúrio são, respectivamente, 55 ( $881,0$ ) e 845 ( $135,4 \times 10^2$ ), ambas em  $\text{lb/ft}^3$  ( $\text{kg/m}^3$ ). Faça  $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$  ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).

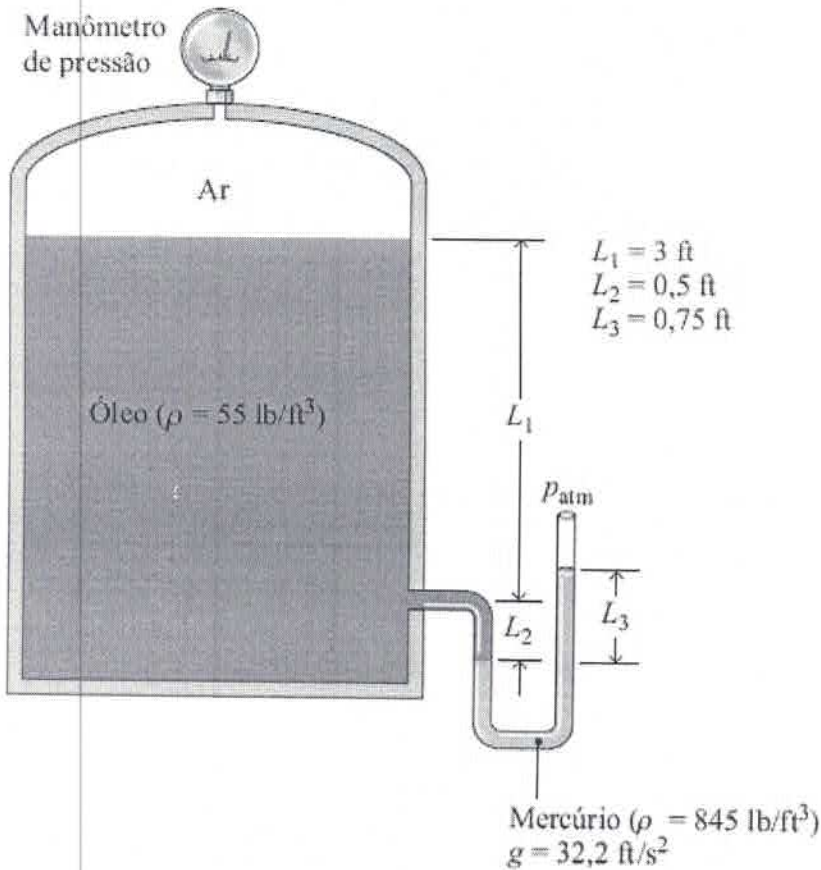


Fig. P1.49

CONVERSÃO

$$L_1 = 3 \text{ ft} = 0,91 \text{ m}$$

$$L_2 = 0,5 \text{ ft} = 0,15 \text{ m}$$

$$L_3 = 0,75 \text{ ft} = 0,23 \text{ m}$$

$$\rho = 55 \text{ lb/ft}^3 = 881,0 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 845 \text{ lb/ft}^3 = 1,3 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 32,2 \text{ ft/s}^2 = 9,8 \text{ m/s}^2$$

### Explorando a Temperatura

1.50 Há 30 anos, a temperatura média em Toronto, Canadá, durante o verão é de  $19,5^\circ\text{C}$  e durante o inverno é de  $-4,9^\circ\text{C}$ . Quais são as temperaturas médias equivalentes de verão e de inverno em  $^\circ\text{F}$  e em  $^\circ\text{R}$ ?

1.51 Converta as seguintes temperaturas de  $^\circ\text{F}$  para  $^\circ\text{C}$ :

(a)  $86^\circ\text{F}$ , (b)  $-22^\circ\text{F}$ , (c)  $50^\circ\text{F}$ , (d)  $-40^\circ\text{F}$ , (e)  $32^\circ\text{F}$ , (f)  $-459,67^\circ\text{F}$ . Converta cada temperatura para K.

1.52 A temperatura da água de uma piscina é  $24^\circ\text{C}$ . Expresse esta temperatura em K,  $^\circ\text{F}$  e  $^\circ\text{R}$ .

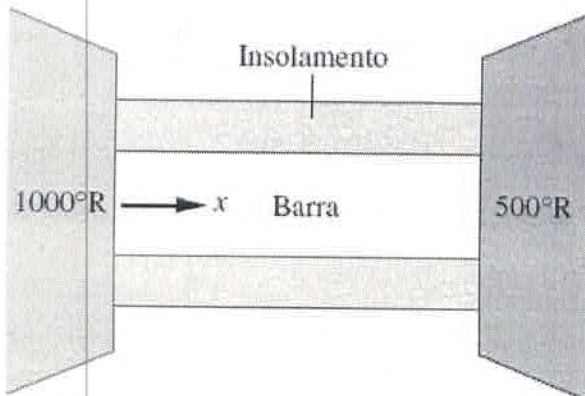
1.53 Uma receita de bolo especifica a temperatura do forno em  $350^\circ\text{F}$ . Expresse esta temperatura em  $^\circ\text{R}$ , K e  $^\circ\text{C}$ .

1.54 O grau Rankine representa uma unidade de temperatura menor ou maior do que o grau Kelvin? Explique.

1.55 A Fig. P1.55 mostra um sistema que consiste em uma barra cilíndrica de cobre isolada em sua superfície lateral, enquanto suas extremidades estão em contato com paredes quentes e frias nas temperaturas de  $1000^\circ\text{R}$  ( $282,4^\circ\text{C}$ ) e  $500^\circ\text{R}$  ( $4,6^\circ\text{C}$ ), respectivamente.

(a) Esboce a variação de temperatura com a posição  $x$  ao longo da barra.

(b) A barra está em equilíbrio? Explique.



### Fig. P1.55

1.56 Qual é (a) a temperatura mais baixa registrada na Terra, que ocorre *naturalmente*, (b) a temperatura mais baixa registrada em um laboratório na Terra? (c) a temperatura mais baixa registrada no sistema solar da Terra, e (d) a temperatura do espaço profundo, cada uma em K?

1.57 A temperatura do ar aumenta de 42°F pela manhã até 70°F ao meio-dia.

(a) Expresse esta temperatura em °R, K e °C. (b) Determine a variação de temperatura em °F, °R, K e °C. (c) Que conclusão pode ser estabelecida a partir da variação de temperatura nas escalas °F e °R? (d) Que conclusão pode ser estabelecida a partir da variação de temperatura nas escalas K e °C?

1.58 Para termômetros de bulbo, a propriedade *termométrica* corresponde à variação no comprimento do líquido no termômetro com a temperatura. Entretanto, outros efeitos presentes podem afetar a temperatura lida em tais termômetros. Quais são alguns deles?

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

1.1P Atualmente, nos Estados Unidos quase toda a eletricidade é produzida por usinas alimentadas com combustíveis fósseis a partir da queima do carvão ou do gás natural, usinas nucleares e hidrelétricas. Usando a Internet, determine as porcentagens das contribuições desses tipos de geração de eletricidade para os EUA, considerando o total. Para cada um dos quatro tipos mencionados, determine pelo menos três considerações ambientais associadas importantes e como tais aspectos ambientais afetam o projeto, a operação e o custo da respectiva usina. Escreva um relatório com pelo menos três referências.

1.2P Câmaras hiperbáricas são utilizadas no tratamento médico de diversas enfermidades. Pesquise como uma câmara hiperbárica funciona e identifique ao menos três enfermidades que podem ser tratadas com esta técnica. Descreva como o tratamento atua na condição do paciente. Organize sua pesquisa em forma de um relatório.

1.3P A medida da *pegada ecológica* da humanidade é um indicador de sustentabilidade ambiental. Usando a Internet, estime a quantidade de terra e água necessários anualmente para sustentar o seu consumo de bens e serviços e para absorver seus desperdícios. Prepare um relatório com suas estimativas e liste pelo menos três coisas que você pode fazer para reduzir sua pegada.

1.4P Um tipo de prótese depende de sucção para ficar presa ao membro residual amputado. O engenheiro deve considerar a diferença necessária entre a pressão atmosférica e a pressão no soquete protético para desenvolver a sucção suficiente para manter a ligação. Que outras considerações são importantes para os engenheiros projetarem este tipo de prótese? Escreva um relatório com suas conclusões, incluindo pelo menos três referências.

1.5P Projete uma bomba de ar de potência humana, de baixo custo, compacta, de baixo peso, portátil, capaz de direcionar uma corrente de ar para limpar teclados de computadores, placas de circuitos e alcançar locais de difícil acesso em dispositivos eletrônicos. A bomba não pode usar eletricidade, incluindo baterias, nem empregar quaisquer propelentes químicos. Todos os materiais devem ser recicláveis. Devido à proteção das patentes existentes, a bomba deve ser uma *alternativa distinta* para a bomba familiar, a bomba de ar para a bicicleta, os produtos existentes destinados a limpar o computador mencionado e as tarefas de limpeza eletrônica.

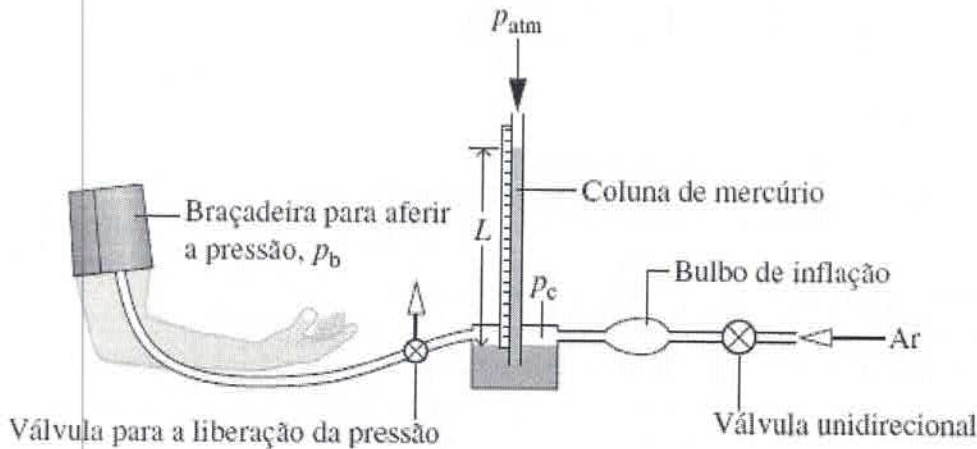
1.6P Projete um experimento para determinação do volume específico da água. Descreva os procedimentos e equipamentos necessários e todos os cálculos a serem realizados. Execute o procedimento proposto e compare seus resultados com dados obtidos a partir de tabelas de vapor, apresentando seus resultados como um relatório.

1.7P A principal barreira para uma maior implantação de sistemas de energia solar em imóveis e pequenas empresas é o custo inicial para adquirir e instalar os componentes do telhado. Atualmente, alguns municípios e serviços públicos dos Estados Unidos estão desenvolvendo planos para ajudar proprietários de imóveis a adquirir tais componentes através de empréstimos e *leasing*. Investigue e avalie de forma crítica essas e outras opções para



promover a implantação de sistemas de energia solar descobertos por meio de grupos de discussões e da utilização da Internet. Descreva suas impressões em um poster para apresentação.

**1.8P** O *esfigmomanômetro* normalmente usado para medir a pressão sanguínea está ilustrado na Fig. P1.8P. Durante o teste a braçadeira é colocada em volta do braço do paciente e é completamente inflada, por meio de repetidas compressões no bulbo de inflação. Então, à medida que a braçadeira é gradualmente reduzida, os sons das artérias, conhecidos como sons *Korotkoff*, são monitorados com um estetoscópio. Usando esses sons como parâmetro, as pressões *sistólica* e *diastólica* podem ser identificadas. Essas pressões são registradas em termos do comprimento da coluna de mercúrio. Investigue a base física para os sons Korotkoff, sua função na identificação das pressões sistólica e diastólica e por que essas pressões são significativas na prática da medicina. Escreva um relatório com no mínimo três referências.



**Fig. P1.8P**

**1.9P** Fotografe uma torre de água municipal próxima a sua residência. Determine a população atendida pela torre de água e como ela opera e faça considerações sobre a localização da torre. Investigue por que as torres de água municipais são economicamente vantajosas e se existem alternativas viáveis. Faça uma apresentação em PowerPoint sobre os dados reunidos, pensando em uma aula a estudantes do ensino médio sobre as torres de água.

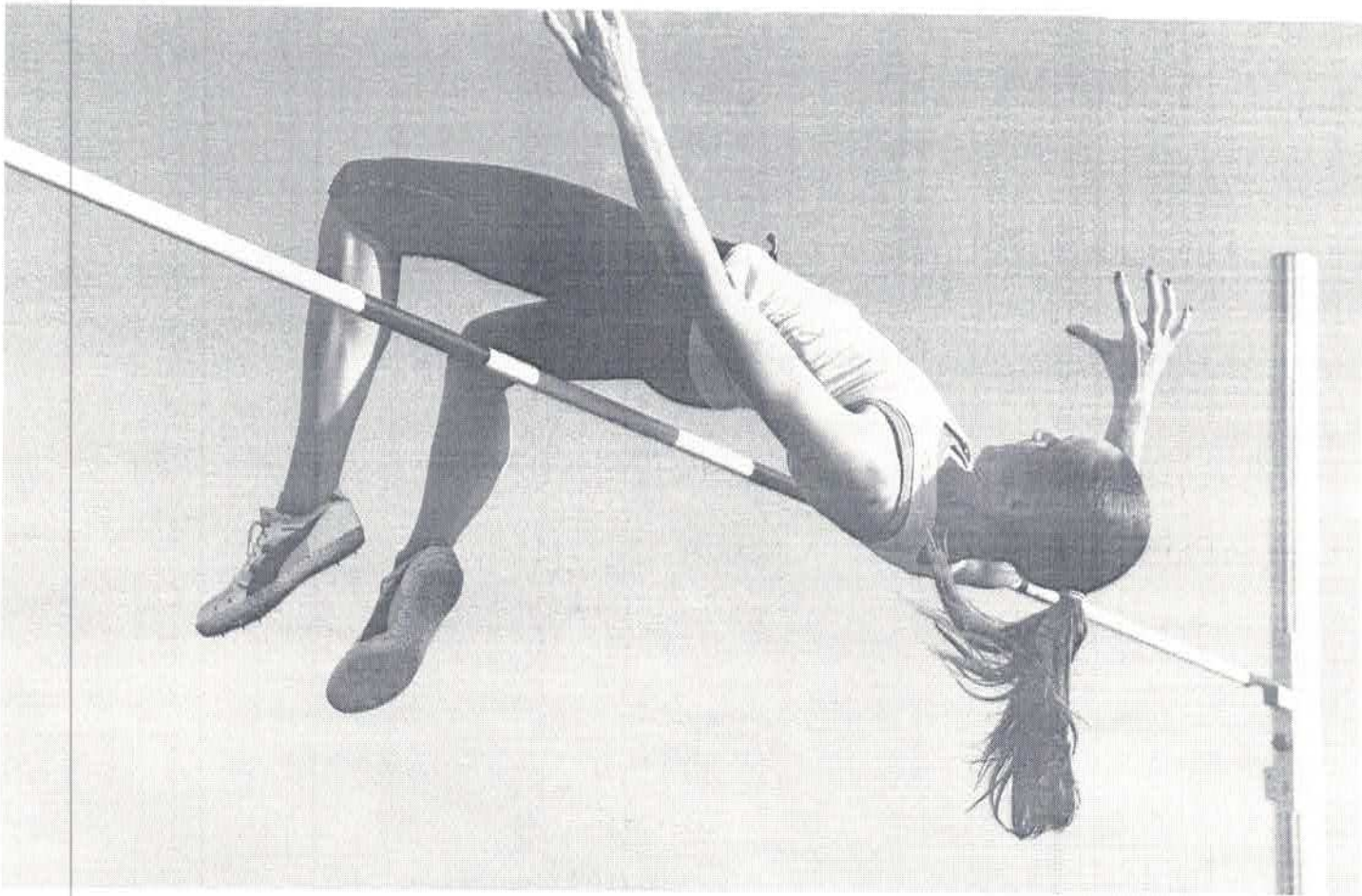
**1.10P** Conduza um projeto com prazo estabelecido no ramo da bioengenharia que pode ser realizado de forma independente ou em um pequeno grupo. O projeto envolve um dispositivo ou técnica para cirurgias minimamente invasivas, um dispositivo implantável para administrar medicamentos, um biossensor, sangue artificial ou algo de interesse especial para você ou seu grupo de projeto. Você pode levar vários dias para pesquisar sobre a sua ideia de projeto e, então, preparar uma breve proposta escrita, incluindo diversas referências que forneçam uma declaração geral do conceito-base, além de uma lista de objetivos. Durante o projeto, observe os procedimentos para um bom projeto, tais 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 três referências.

**1.11P** Conduza um projeto com prazo estabelecido envolvendo a Estação Espacial Internacional, ilustrada na Tabela 1.1, que pode ser realizado de forma independente ou em um grupo pequeno. O projeto pode envolver um experimento cujo comportamento é melhor em um ambiente com baixa gravidade, um dispositivo para o conforto ou uso dos astronautas ou algo de interesse especial para você ou seu grupo de projeto. Você pode levar diversos dias para pesquisar sobre a sua ideia de projeto e, então, preparar uma breve proposta escrita, incluindo várias referências que forneçam uma declaração geral do conceito-base, além de uma lista de objetivos. Durante o projeto, observe os procedimentos para um bom projeto, tais 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 três referências.

<sup>1</sup>O estado de equilíbrio entre gelo e água saturada à pressão de 1 atm.

<sup>2</sup>O estado de equilíbrio entre vapor e água líquida à pressão de 1 atm.

<sup>3</sup>Para discussões adicionais, veja A. Bejan, G. Tsatsaronis e M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 1996, Cap. 1.



A relação entre as energias *cinética* e *potencial gravitacional* é considerada na Seção 2.1. © technotr/iStockphoto

**CONTEXTO DE ENGENHARIA** O conceito de energia é um conceito fundamental em termodinâmica, e um dos aspectos mais significativos de análise em engenharia. Neste capítulo discutimos energia e desenvolvemos equações para a aplicação do princípio da conservação de energia. A análise em questão é restrita a sistemas fechados. No Cap. 4 a discussão é estendida a volumes de controle.

A noção de energia é familiar, e você já conhece bastante sobre ela. No presente capítulo, vários aspectos importantes acerca do conceito de energia são desenvolvidos. Você já se deparou com alguns desses aspectos anteriormente. Uma ideia básica é a de que energia pode ser *armazenada* no interior de sistemas de várias maneiras. A energia também pode ser *convertida* de uma forma em outra e *transferida* entre sistemas. Para sistemas fechados, a energia pode ser transferida por meio do *trabalho* e da *transferência de calor*. A quantidade total de energia é *conservada* em todas as transformações e transferências.

O **objetivo** deste capítulo é o de organizar essas ideias sobre energia de modo apropriado para uma análise de engenharia. A apresentação começa com uma revisão dos conceitos de energia oriundos da mecânica. O conceito termodinâmico de energia é então introduzido como uma extensão do conceito de energia em mecânica.