

# Conceitos básicos de termodinâmica

CAPÍTULO

1

Todas as ciências têm um vocabulário associado a elas, e a termodinâmica não é exceção. Uma definição precisa dos conceitos básicos forma um alicerce sólido para o desenvolvimento da ciência e minimiza possíveis enganos. Neste capítulo far-se-á uma revisão dos sistemas de unidades a utilizar, dos conceitos básicos de termodinâmica, tais como energia, propriedades, estados, processos, pressão e temperatura. Uma compreensão profunda destes conceitos é essencial para a continuação do estudo dos capítulos seguintes. Finalmente, serão considerados os aspectos termodinâmicos dos sistemas biológicos, incluindo o exercício e o controlo de peso.

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**

## 1-1 ■ TERMODINÂMICA E ENERGIA

A termodinâmica pode ser definida como a ciência da energia. Embora se tenha a percepção do que é energia, é difícil defini-la com precisão. A energia pode ser vista como a capacidade de provocar alterações.

A palavra *termodinâmica* advém das palavras gregas *therme* (calor) e *dynamis* (potência), sendo a melhor descrição os primeiros esforços para converter calor em potência. Hoje em dia, este termo é utilizado para incluir todos os aspectos relacionados com a energia e suas transformações, incluindo a sua produção, refrigeração e relações existentes entre propriedades da matéria.

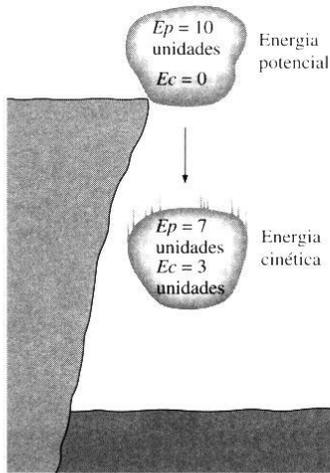
Uma das principais leis da natureza é o **princípio de conservação da energia**. Este estabelece que durante uma interação a energia pode mudar de forma, mas que a quantidade total permanece constante, ou seja, a energia não pode ser criada ou destruída. Uma pedra a cair ganha velocidade como resultado da conversão da energia potencial em cinética (Figura 1-1). O princípio de conservação da energia serve de base para a indústria alimentar: um indivíduo que recebe mais energia (alimento) do que gasta (exercício) irá aumentar o seu peso (armazena energia sob a forma de gordura), e outro que receba menos energia do que a que gasta irá perder peso (Figura 1-2).

A **primeira lei da termodinâmica** expressa o princípio de conservação da energia e estabelece que a energia é uma propriedade termodinâmica. A **segunda lei da termodinâmica** estabelece que a *energia* tem *qualidade* e *quantidade*, e que os processos reais ocorrem na direção da qualidade decrescente da energia. Por exemplo, uma chávena de café quente em repouso numa mesa irá eventualmente arrefecer, mas uma chávena fria na mesma mesa nunca irá aquecer por si só (Figura 1-3). A energia contida no café a uma temperatura elevada é degradada (transformada numa forma menos útil a uma baixa temperatura), uma vez que é transferida para o ar circundante.

Embora os princípios da termodinâmica existam desde a criação do universo, a termodinâmica só surgiu como ciência quando da construção das primeiras máquinas atmosféricas a vapor, em Inglaterra, por Thomas Savery em 1697 e Thomas Newcomen em 1712. Estas máquinas eram muito lentas e ineficientes mas abriram o caminho para o desenvolvimento desta ciência nova.

A primeira e segunda leis da termodinâmica surgiram simultaneamente por volta de 1850, principalmente através dos trabalhos de William Rankine, Rudolph Clausius e Lord Kelvin (anteriormente William Thompson). O termo *termodinâmica* foi usado pela primeira vez por Lord Kelvin numa publicação de 1849. O primeiro compêndio de termodinâmica foi escrito em 1859 por William Rankine, então professor na Universidade de Glasgow.

É sabido que uma substância é constituída por um grande número de partículas chamadas *moléculas*. As propriedades de uma substância dependem do comportamento dessas partículas. Por exemplo, a pressão de um gás contido num reservatório é o resultado da transferência do movimento entre as moléculas e as paredes do reservatório. No entanto, não é necessário conhecer o comportamento das partículas, de forma a determinar a pressão num reservatório. Seria suficiente colocar um manómetro de pressão no reservatório. Esta abordagem macroscópica para o estudo da termodinâmica que não requer o conhecimento do comportamento individual das partículas a nível macros-



**FIGURA 1-1**

A energia não pode ser criada ou destruída; só pode mudar de forma (1.ª lei).



**FIGURA 1-2**

Princípio de conservação da energia aplicado ao corpo humano.

cópico é chamada **termodinâmica clássica**. Esta permite a solução de problemas em engenharia de forma simples e directa. Uma abordagem mais elaborada, baseada no tratamento estatístico do comportamento de grandes grupos de partículas individuais, é chamada **termodinâmica estatística**. Esta abordagem a nível microscópico é mais complexa e é somente utilizada neste texto como suporte teórico.

### Áreas de aplicação da termodinâmica

Todas as actividades de engenharia envolvem uma interacção entre energia e matéria; assim, é difícil imaginar uma área que não esteja relacionada com a termodinâmica. Assim, o desenvolvimento da compreensão dos princípios da termodinâmica tem sido parte essencial no estudo da engenharia.

Não é necessário procurar muito para encontrar aplicações da termodinâmica. Estas estão inseridas nas nossas vidas quotidianas. Um lar comum é, em certos aspectos, um mostruário das maravilhas da termodinâmica. Muitos utensílios e electrodomésticos são desenhados, em parte ou como um todo, com base nos princípios termodinâmicos. Alguns exemplos são os electrodomésticos a gás ou eléctricos, aparelhos de aquecimento ou refrigeração, o frigorífico, o desumidificador, a panela de pressão, o esquentador, o chuveiro, o ferro de engomar, e até o computador, a televisão e o vídeo. Numa escala maior, a termodinâmica desempenha uma papel mais vasto no projecto e análise de motores de combustão interna, foguetes, motores a jacto e centrais eléctricas convencionais ou nucleares (Figura 1-4). Devemos também mencionar o corpo humano como uma área de aplicação interessante da termodinâmica.

## 1-2 ■ NOTA SOBRE UNIDADES E DIMENSÕES

Qualquer quantidade física pode ser caracterizada por **dimensões**. As magnitudes arbitrárias atribuídas às dimensões são chamadas **unidades**. Certas dimensões básicas como a massa  $m$ , o comprimento  $L$ , o tempo  $t$  e a temperatura  $T$  foram seleccionadas como **dimensões primárias** ou **fundamentais**, enquanto que as outras como a velocidade  $V$ , a energia  $E$  e o volume  $V$  são expressas em termos de unidades fundamentais e são chamadas **unidades secundárias** ou **derivadas**.

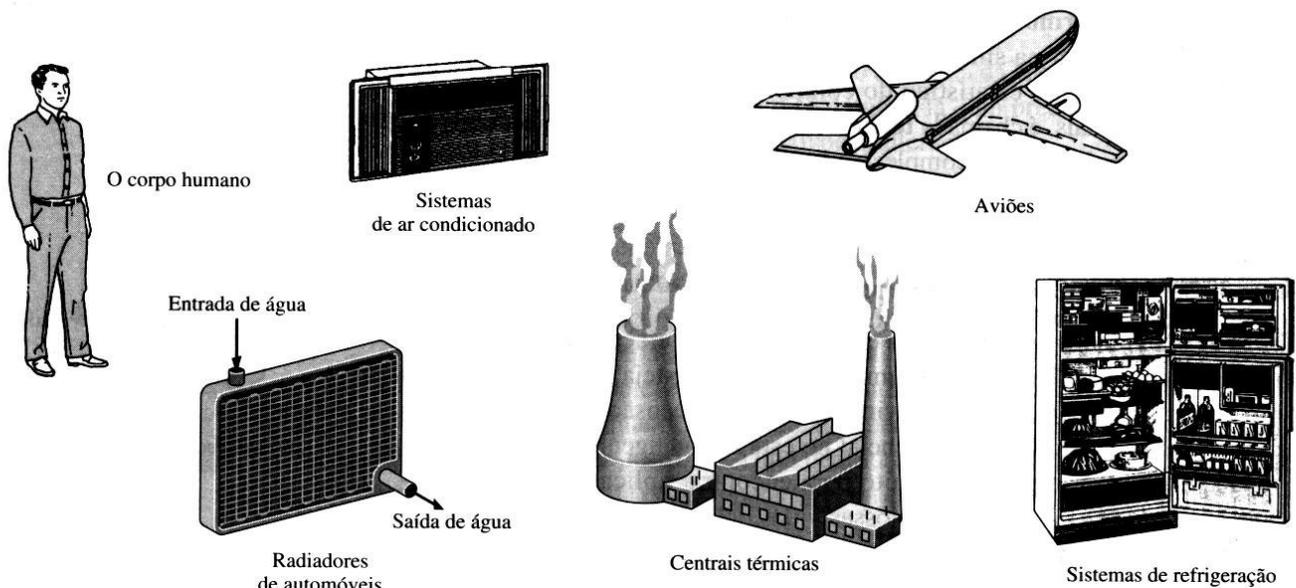
Ao longo dos anos foi desenvolvida uma série de sistemas de unidades. Embora a comunidade científica se tenha esforçado, de forma a estabelecer um único sistema, continuam a existir dois sistemas de unidades em prática: o **sistema inglês**, também conhecido pelo USCS (*United States Customary System*), e o sistema métrico **SI** (de *Le Système International d'Unités*) conhecido por *Sistema Internacional*. O SI é um sistema simples e lógico baseado na relação decimal entre as diversas unidades e é empregue em trabalhos científicos e de engenharia na maior parte das nações industrializadas, incluindo a Inglaterra. O sistema inglês não tem nenhuma base numérica, e diversas unidades são relacionadas entre si de forma arbitrária (12 in para 1 ft, 16 oz para 1 lb, 4 qt para 1 gal, etc.), que a torna confusa e de difícil aprendizagem. Os Estados Unidos são a única nação industrializada ainda não totalmente convertida ao sistema métrico.

Nota sobre unidades e dimensões



FIGURA 1-3

O calor escoá-se do corpo quente para o frio (2.ª lei).



**FIGURA 1-4**

Algumas áreas de aplicação da termodinâmica.

Os esforços sistemáticos para desenvolver a aceitação universal de um sistema de unidades data de 1790, quando a Assembleia Nacional Francesa encarregou a Academia Francesa de Ciências de desenvolver um sistema de unidades. Foi então desenvolvida uma versão inicial do sistema métrico, mas que não obteve grande aceitação até 1875, quando surgiu o *Tratado de Convenção Métrica* que foi assinado por 17 nações, incluindo os Estados Unidos da América. Neste tratado internacional, o metro e o grama foram estabelecidos como unidades métricas de comprimento e de massa respectivamente, e a *Conferência Geral de Pesos e Medidas* (CGPM) foi formada, devendo-se reunir todos os seis anos. Em 1960, a CGPM produziu o SI, que se baseia em seis quantidades fundamentais cujas unidades foram adoptadas em 1964 na 10.<sup>a</sup> Conferência Geral de Pesos e Medidas: *metro* (m) para comprimento, *quilograma* (kg) para massa, *segundo* (s) para tempo, *ampere* (A) para corrente eléctrica, grau *kelvin* (°K) para temperatura, e *candela* (cd) para intensidade luminosa (quantidade de luz). Em 1971, a CGPM adicionou uma sétima quantidade fundamental e a sua unidade, *mole* (mol), para quantidade de matéria.

Com base no esquema notacional introduzido em 1967, o símbolo de grau foi oficialmente abolido da unidade de temperatura absoluta, e todos os nomes das unidades seriam escritos sem letra maiúscula, independentemente de derivarem de nomes próprios (Tabela 1-1). Contudo, a abreviatura da unidade deveria ser com primeira letra maiúscula se esta era derivada de um nome próprio. Por exemplo, a unidade SI de força, nomeada em honra de Sir Isaac Newton (1647-1723), é o newton (não Newton) e é abreviada como N. O nome completo da unidade pode ser pluralizado, mas a sua abreviatura não. Por exemplo, o comprimento de um objecto pode ser 5 m ou 5 metros e não 5 ms ou 5 metro. Para finalizar, não se deve utilizar um ponto final na abreviatura, a menos que estejamos perante o fim de uma frase. Por exemplo, a abreviação apropriada de metro é m (não m.).

**TABELA 1-1**

As sete dimensões fundamentais e respectivas unidades SI

Dimensão	Unidade
Comprimento	metro (m)
Massa	quilograma (kg)
Tempo	segundo (s)
Temperatura	kelvin (K)
Corrente eléctrica	ampere (A)
Luminosidade	candela (c)
Quantidade de matéria	mole (mol)

Há pouco tempo, os Estados Unidos começaram, aparentemente, a voltar-se para o sistema métrico, quando o Congresso aprovou a Lei de Estudo Métrico, em 1968, em resposta ao que se passava no resto do mundo. O Congresso continuou a promover a conversão voluntária ao votar a Lei de Conversão Métrica em 1975. Em 1988, o Congresso decretou a data limite de 1992 para todas as agências federais realizarem a conversão para o sistema métrico, mas tal não foi aplicado.

As indústrias envolvidas no comércio internacional (tais como a do automóvel e a das bebidas) foram as mais rápidas na conversão, devido a motivos económicos. Hoje em dia, quase todos os automóveis produzidos nos Estados Unidos são baseados no sistema métrico, embora os utilizadores só se apercebam deste facto quando tentam utilizar ferramentas de medidas inglesas num componente métrico. Contudo, a maioria das indústrias tem resistido à conversão, atrasando o processo.

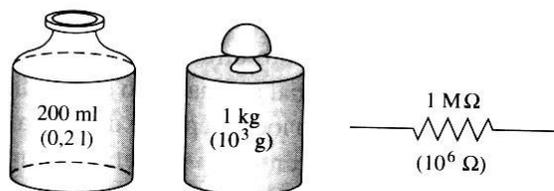
Presentemente, os Estados Unidos empregam ambos os sistemas de unidades, sobrecarregando os estudantes de Engenharia, visto que se espera que continuem a compreender o sistema inglês, à medida que aprendem o sistema métrico. Embora no resto do mundo se use preferencialmente o SI, inúmeros catálogos, tabelas e outra informação aparecem no sistema inglês, pelo que este livro contém os dois sistemas, embora se dê mais ênfase ao métrico.

O sistema internacional, como foi visto anteriormente, é baseado numa relação decimal entre as unidades. Os prefixos utilizados para expressar os seus múltiplos são apresentados na Tabela 1-2. São empregues para qualquer unidade e recomenda-se a sua memorização, visto serem de aplicação generalizada (Figura 1-5).

### Algumas unidades SI e inglesas

No sistema internacional, as unidades de massa, comprimento e tempo são o quilograma (kg), o metro (m) e o segundo (s), respectivamente. As unidades correspondentes ao sistema inglês são a libra massa (lbm), o pé (ft) e o segundo (s). A unidade de libra corresponde à unidade romana de peso. Esta medida foi retida em Inglaterra, mesmo após a ocupação da Grã-Bretanha em 410. As unidades de massa e de comprimento dos dois sistemas são relacionados entre si por

$$\begin{aligned} 1 \text{ lbm} &= 0,45359 \text{ kg} \\ 1 \text{ ft} &= 0,3048 \text{ m} \end{aligned}$$



**TABELA 1-2**  
Prefixos padrões  
de unidades SI

Múltiplo	Prefixo
$10^{12}$	tera, T
$10^9$	giga, G
$10^6$	mega, M
$10^3$	quilo, k
$10^2$	hecto, h
$10^1$	deca, da
$10^{-1}$	deci, d
$10^{-2}$	centi, c
$10^{-3}$	mili, m
$10^{-6}$	micro, $\mu$
$10^{-9}$	nano, n
$10^{-12}$	pico, p

**FIGURA 1-5**

Os prefixos de unidades SI são utilizados em todos os ramos da engenharia.

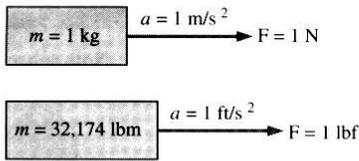


FIGURA 1-6

A definição de unidades de força.

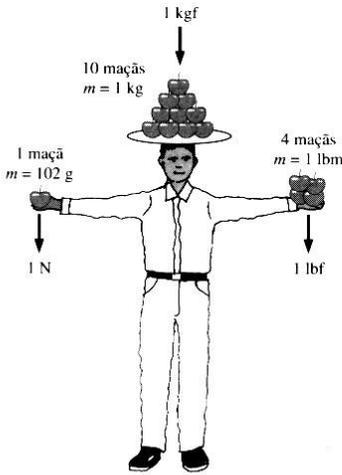


FIGURA 1-7

As magnitudes relativas das unidades de força: newton (N), quilograma força (kgf) e libra força (lbf).

No sistema inglês, a força é considerada geralmente como uma das dimensões primárias, sendo atribuída uma unidade não derivada. Isto é uma fonte de confusão e erro que necessita de um factor de conversão ( $g_c$ ) em diversas expressões. De forma a evitar este inconveniente, considera-se a força como dimensão secundária cuja unidade deriva da segunda lei de Newton:

$$\text{Força} = (\text{massa})(\text{aceleração})$$

ou

$$F = ma$$

(1-1)

No sistema internacional, a unidade de força é o newton (N), sendo definido como a força necessária para acelerar uma massa de 1 kg a 1 m/s<sup>2</sup>. No Sistema Inglês, a unidade de força é a **libra força** (lbf), sendo definida como a força necessária para acelerar uma massa de 32,174 lbm (1 slug) com 1 ft/s<sup>2</sup> (Figura 1-6). Isto é,

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

$$1 \text{ lbf} = 32,174 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2$$

A força de 1 newton é aproximadamente igual ao peso de uma pequena maçã ( $m = 102 \text{ g}$ ), enquanto que uma libra força é equivalente aproximadamente ao peso de 4 maçãs médias ( $m_{\text{total}} = 454 \text{ g}$ ), como mostra a Figura 1-7. Outra unidade de força comum em países europeus é o *quilograma força* (kgf), representando o peso de uma massa de 1 kg ao nível do mar ( $1 \text{ kgf} = 9,807 \text{ N}$ ).

O termo **peso** é vulgarmente utilizado de forma incorrecta para expressar a massa. Ao contrário da massa, o peso  $W$  é uma *força*, ou seja, a força da gravidade aplicada a um corpo, e a sua magnitude é determinada através da segunda lei de Newton:

$$P = mg \text{ (N)}$$

(1-2)

em que  $m$  é a massa do corpo e  $g$  a aceleração da gravidade local ( $g = 9,807 \text{ m/s}^2$  ou  $32,174 \text{ ft/s}^2$  ao nível do mar e 45° de latitude). O peso de um volume unitário de uma dada substância é chamado **peso específico**  $p$  e é determinado através de  $p = \rho g$ , em que  $\rho$  é a massa volúmica.

A massa de um corpo permanecerá inalterada, independentemente da sua localização no universo. Contudo, o seu peso depende da aceleração da gravidade. Um corpo pesará menos no topo de uma montanha, visto que  $g$  decresce com a altitude. Na superfície da Lua, um astronauta pesará cerca de 1/6 do que pesaria normalmente na Terra (Figura 1-8).

Ao nível do mar, uma massa de 1 kg pesa 9,807 N, como se ilustra na Figura 1-9. Contudo, uma massa de 1 lbm irá pesar 1 lbf, induzindo a uma interpretação errada dos conceitos que são susceptíveis de ser confundidos, sendo uma grande fonte de erro no Sistema Inglês.

A *força da gravidade* que actua directamente sobre uma massa é devida à *atração* entre massas, sendo portanto directamente proporcional às suas magnitudes e inversamente proporcional ao quadrado da sua distância. Assim, a aceleração da gravidade  $g$  num dado local depende da massa *volúmica local* da crosta terrestre, da *distância* ao centro do planeta e, com menor importância, das *posições* do Sol e da Lua. O valor de  $g$  varia, com a localização,



FIGURA 1-8

Um corpo que pesa 150 libras na Terra pesará apenas 25 libras na Lua.

desde  $9,8295 \text{ m/s}^2$  a  $4500 \text{ m}$  abaixo do nível do mar até  $7,3218 \text{ m/s}^2$  a  $100\,000 \text{ m}$  acima deste. Porém, a altitudes até  $30\,000 \text{ m}$ , a variação de  $g$ , desde o valor ao nível do mar, é inferior a  $1\%$ , podendo considerar-se, para a maior parte dos casos práticos, constante a  $9,8 \text{ m/s}^2$ . A variação de  $g$  abaixo do nível do mar apresenta uma evolução interessante: aumenta até  $4500 \text{ m}$ , decrescendo a partir daí. (Qual será o valor no centro do planeta?)

A principal causa da confusão entre peso e massa reside no facto de esta última ser medida de forma *indirecta*, através da *força da gravidade* exercida. Esta abordagem também admite que as forças devido a outros efeitos, tal como a flutuação e o movimento de fluidos, são desprezáveis. Isto aproxima-se de um velocímetro de um automóvel, que mede a velocidade através da multiplicação do número de rotações da roda pelo seu perímetro. A forma correcta de medição da massa consiste na comparação com uma outra de valor conhecido, sendo no entanto um processo trabalhoso, utilizado para calibração e medição de metais preciosos.

O *trabalho*, que é uma forma de energia, pode ser definido como a força vezes a distância, tendo então a unidade newton metro ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ) que se chama **joule (J)**. Isto é,

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Uma unidade SI mais comum para a energia é o quilojoule ( $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$ ). No sistema inglês, a unidade de energia é o **Btu** (British Thermal Unit), sendo definido como a energia necessária para elevar a temperatura de  $1 \text{ lbm}$  de água a  $68^\circ \text{ F}$  em  $1^\circ \text{ F}$ . No sistema métrico, a quantidade de energia para elevar em  $1^\circ \text{ C}$  a temperatura de  $1 \text{ g}$  de água a  $15^\circ \text{ C}$  chama-se **1 caloria (cal)**, sendo  $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$ . As magnitudes de quilojoules e de Btu são quase idênticas ( $1 \text{ Btu} = 1,055 \text{ kJ}$ ).

### Homogeneidade dimensional

Em engenharia, todas as equações têm de ser *dimensionalmente homogêneas*, ou seja, todos os termos de uma equação têm de ter as mesmas unidades (Figura 1-10). Se a dada altura depararmos com uma situação em que se têm de somar unidades diferentes, é sinal de que foi cometido algum erro. Assim, a verificação de unidades pode servir como um meio de detectar erros.

#### EXEMPLO 1-1 Detecção de erro por inconsistência de unidades

Numa dada resolução de um problema, obteve-se a seguinte equação:

$$E = 25 \text{ kJ} + 7 \text{ kJ/kg}$$

Em que  $E$  é a energia total cujas unidades são kJ. Determine o erro que este facto pode ter causado.

#### Nota sobre unidades e dimensões

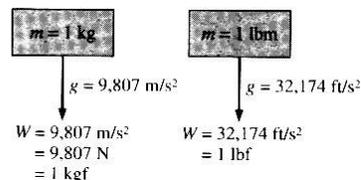


FIGURA 1-9

O peso ao nível do mar de uma unidade de massa.



FIGURA 1-10\*

De forma a estar dimensionalmente homogênea, todos os termos de uma equação devem ter a mesma unidade.

\* BLONDIE cartoons, reprodução autorizada por King Features Syndicate, Inc.

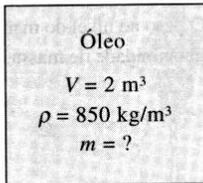


FIGURA 1-11

Esquema para o Exemplo 1-2.

**Solução** Os dois termos da direita não têm as mesmas unidades e, como tal, estas não podem ser adicionadas de forma a obter o valor da energia total. Se se multiplicar o valor da massa pelo segundo termo, elimina-se o denominador em quilogramas, tornando-se a equação toda homogénea, visto estar em unidades coerentes. Obviamente que o erro foi causado pelo esquecimento de efectuar este passo antes de se inserir o valor na expressão apresentada.

Todos sabemos por experiência própria que as unidades se devem utilizar de forma correcta, sob pena de se obterem resultados errados. No entanto, com um pouco de atenção e destreza, estas podem ser usadas a nosso favor para verificar expressões e até para derivar outras fórmulas, como o exemplo seguinte ilustra.

### EXEMPLO 1-2 Obtenção de fórmulas através de unidades

Um reservatório é cheio de óleo cuja massa volúmica é  $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ . Se o volume do reservatório for de  $V = 2 \text{ m}^3$ , determine a massa  $m$  no reservatório.

**Solução** Um esboço do sistema é apresentado na Figura 1-11. Supondo que não se encontra a fórmula que relaciona a massa com a massa volúmica e o volume mas se sabe que as unidades da massa são o quilograma. Por outras palavras, qualquer que seja o caminho escolhido para a resolução do problema, o resultado deverá ser expresso em quilogramas. Com base neste raciocínio, tem-se

$$\rho = 850 \text{ kg/m}^3 \quad V = 2 \text{ m}^3$$

É óbvio que se pode eliminar  $\text{m}^3$ , resultando  $\text{kg}$  ao multiplicarem-se estas duas quantidades. Assim, a expressão procurada é

$$m = \rho V$$

Então,

$$m = (850 \text{ kg/m}^3)(2 \text{ m}^3) = 1700 \text{ kg}$$

Um estudante deve ter em conta que uma fórmula que não seja dimensionalmente homogénea está certamente errada. No entanto, uma que seja homogénea pode não ser a correcta.

### 1-3 ■ SISTEMAS ABERTOS E SISTEMAS FECHADOS

Um **sistema termodinâmico**, ou simplesmente **sistema**, é definido por uma *quantidade de matéria ou região no espaço, escolhidas para serem estudadas*. A massa ou região exterior é denominada **vizinhança**. A superfície real ou imaginária que separa o sistema da vizinhança chama-se **fronteira**. Estes conceitos são ilustrados na Figura 1-12. A fronteira de um sistema pode ser *fixa* ou *móvel*. Note que esta é a superfície de contacto entre o sistema e a vizinhança. Em termos matemáticos, a fronteira tem uma espessura nula, não podendo conter massa nem ocupar qualquer volume.

Os sistemas podem ser classificados como *abertos* ou *fechados*, dependendo de se a escolha recair sobre um estudo de massa fixa ou um volume fixo.

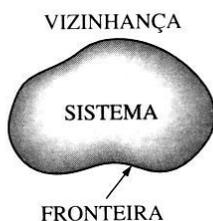


FIGURA 1-12

Sistema, vizinhança e fronteira.

Um **sistema fechado** (também denominado **massa de controlo**) consiste numa quantidade de massa fixa, não existindo trocas desta. Ou seja, a massa não pode atravessar a fronteira, como está ilustrado na Figura 1-13. No entanto, a energia, sob a forma de trabalho ou de calor, pode atravessar a fronteira, e o volume, neste tipo de sistemas pode variar. O caso especial, em que nem mesmo a energia atravessa a fronteira, denomina-se um **sistema isolado**.

Considere um dispositivo cilindro-êmbolo como o da Figura 1-14. O estudo irá recair sobre o gás contido no interior quando este aquece. Como o estudo recai sobre o comportamento do gás, este é o nosso sistema. As superfícies interiores do cilindro e do êmbolo constituem a fronteira e, visto que não é possível a troca de massa, este é um sistema fechado. Note que é permitida a troca de energia e que uma parte da fronteira (a superfície interior do êmbolo) pode mover-se. O exterior ao gás, incluindo o êmbolo e o cilindro, constituem a vizinhança.

Um **sistema aberto**, ou **volume de controlo**, consiste numa região do espaço bem definida. Esta geralmente envolve um dispositivo onde existem trocas de massa tal como num compressor, turbina ou difusor. O escoamento através destes é convenientemente estudado por meio da selecção da região que envolve o dispositivo, estabelecendo-se o volume de controlo. Tanto a massa como a energia podem atravessar a fronteira de um volume de controlo, denominado **superfície de controlo**, como se ilustra na Figura 1-15.

Como exemplo de um sistema aberto, considere-se um aquecedor de água como o da Figura 1-16. Pretende-se determinar quanto calor é necessário fornecer, de forma a obter um caudal de água quente. Visto que o sistema admite água fria e expela água quente, não é conveniente fixar-se um sistema fechado. Ir-se-á, então, fixar o estudo num determinado volume que é formado pelas superfícies interiores do aquecedor e considerar os escoamentos de água como troca de massa entre a vizinhança e o sistema. Assim, a superfície de controlo é formada pelas superfícies interiores do aquecedor e existe passagem de massa pela superfície em dois locais.

*As relações termodinâmicas que se utilizam para sistemas abertos e fechados são diferentes. Portanto, é extremamente importante reconhecer o tipo de sistema, antes de iniciar o seu estudo.*

Em todas as análises termodinâmicas, o sistema em estudo *deve* ser definido com cuidado. Na maioria dos casos, o sistema é simples e bastante óbvio e a sua definição pode parecer monótona e desnecessária. Contudo, noutros casos, o sistema em estudo pode ser bastante complexo e a escolha apropriada do sistema pode simplificar significativamente a sua análise.

## 1-4 ■ FORMAS DE ENERGIA

A energia pode existir sob diversas formas, tais como térmica, mecânica, cinética, potencial, eléctrica, química, magnética e nuclear, e a soma constitui a **energia total**  $E$  do sistema. Esta, dividida pela *unidade de massa*, denota-se por  $e$ , sendo definida por

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

### Sistemas abertos e sistemas fechados

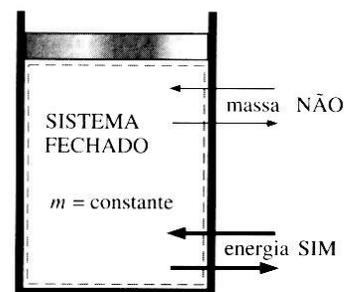


FIGURA 1-13

A massa não pode atravessar a fronteira de um sistema fechado, mas a energia pode.

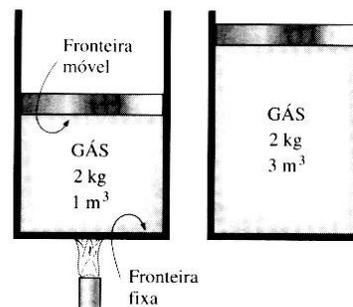


FIGURA 1-14

Um sistema fechado com fronteira móvel.

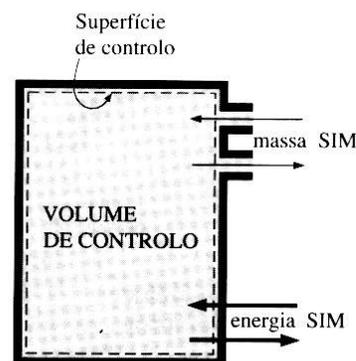
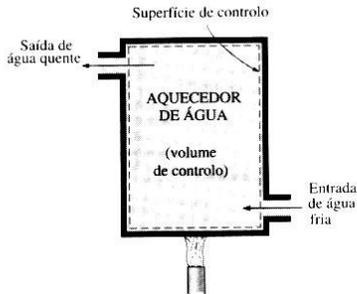


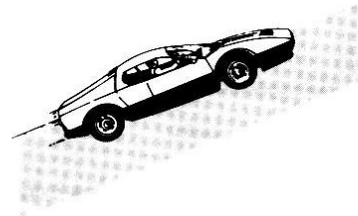
FIGURA 1-15

Tanto a massa como a energia podem atravessar a fronteira de um volume de controlo.

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**



**FIGURA 1-16**  
 Um sistema aberto (volume de controlo) com uma entrada e uma saída.



**FIGURA 1-17**  
 A energia macroscópica de um corpo varia com a sua velocidade e elevação.

A termodinâmica não permite obter o valor absoluto da energia total de um sistema. Consegue-se somente conhecer a *variação* desta, sendo o importante em problemas de engenharia. Assim, é possível num dado ponto de referência atribuir o valor zero à energia total de um sistema ( $E = 0$ ). A variação da energia total de um sistema é independente da escolha do ponto de referência. Por exemplo, o decréscimo de energia potencial de um objecto em queda livre depende somente da diferença de cotas e não da posição escolhida do referencial.

Numa análise termodinâmica é conveniente juntar em dois grupos as diversas formas de energia que compõem a energia total: *macroscópico* e *microscópico*. As formas de energia **macroscópicas** são aquelas que um sistema possui como um todo em relação a um referencial exterior, tal como as energias cinéticas e potenciais (Figura 1-17). As formas de energia **microscópicas** estão relacionadas com a estrutura molecular do sistema e o grau de actividade molecular e são independentes de referenciais exteriores. A soma de todas as formas de energia microscópica é denominada **energia interna** de um sistema, e a sua notação é  $U$ . O termo *energia* foi apresentado em 1807 por Thomas Young, e o seu uso em termodinâmica foi proposto em 1852 por Lord Kelvin. O termo *energia interna* e o símbolo  $U$  surgiram pela primeira vez nos trabalhos de Rudolph Clausius e William Rankine, na segunda metade do século XIX, substituindo os termos *trabalho interno* e *energia intrínseca*, até então usados.

A energia macroscópica de um sistema está relacionada com o movimento e a influência de certos factores externos tais como a gravidade, o magnetismo, a electricidade e a tensão superficial. A energia que um sistema possui como resultado do seu movimento em relação a um referencial é chamada **energia cinética**  $E_c$ . Quando todo o sistema se move com a mesma velocidade, a energia cinética é expressa como

$$E_c = \frac{m\mathcal{V}^2}{2} \text{ (kJ)} \quad (1-4)$$

ou, por unidade de massa,

$$e_c = \frac{\mathcal{V}^2}{2} \text{ (kJ/kg)} \quad (1-5)$$

em que  $\mathcal{V}$  representa a velocidade do sistema em relação a um referencial fixo.

A energia que um sistema possui como resultado da sua elevação num campo gravítico é chamada **energia potencial**  $E_p$  e é expressa como

$$E_p = mgz \text{ (kJ)} \quad (1-6)$$

ou, por unidade de massa,

$$e_p = gz \text{ (kJ/kg)} \quad (1-7)$$

em que  $g$  representa a aceleração da gravidade e  $z$  a elevação do centro de gravidade do sistema relativamente a um plano de referência seleccionado.

Os efeitos do magnetismo, da electricidade e da tensão superficial são significativos somente em certos casos, não sendo considerados neste texto. Na sua ausência, a energia total de um sistema consiste nas energias interna, potencial e cinética e é expressa por

$$E = U + E_c + E_p = U + \frac{mv^2}{2} + mgz \text{ (kJ)} \quad (1-8)$$

ou, por unidade de massa,

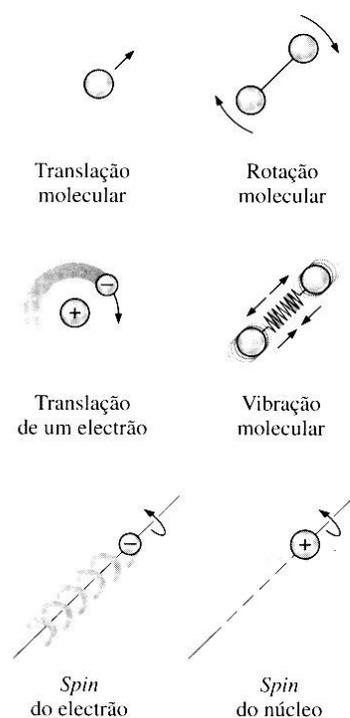
$$e = u + e_c + e_p = u + \frac{v^2}{2} + gz \text{ (kJ/kg)} \quad (1-9)$$

A maioria dos sistemas fechados permanece estacionária durante um processo, não sofrendo variações de energia cinética e potencial, sendo estes sistemas frequentemente chamados **sistemas estacionários**. A variação da energia total  $\Delta E$  de um sistema estacionário é idêntica à sua variação de energia interna  $\Delta U$ . Neste texto, se não for dito o contrário, um sistema fechado assume-se como estacionário.

### Algumas considerações físicas sobre energia interna

A energia interna foi definida acima como a soma de todas as formas de energia *microscópica* de um sistema. Está relacionada com a *estrutura* e o grau de *actividade molecular* e pode ser vista como a soma das energias *cinética* e *potencial* das moléculas.

Para melhor compreensão, examinemos um sistema ao nível molecular. As moléculas de um gás movem-se através do espaço, com velocidade, tendo portanto energia cinética, denominada *energia de translação*. Os átomos de moléculas poliatómicas rodam em torno de um eixo, possuindo *energia cinética rotacional*. Este tipo de átomos pode também vibrar em torno do seu centro de massa comum, contendo então *energia cinética vibracional*. Para o caso dos gases, a energia cinética é originada principalmente pelos movimentos de rotação e translação, sendo o de vibração significativo a temperaturas elevadas. Os electrões de um átomo possuem energia cinética rotacional ao moverem-se em torno do núcleo, aumentando o seu valor quanto mais distanciados estão deste. Os electrões e as outras partículas do núcleo rodam também em torno do seu eixo, possuindo *energia spin*. A fracção de energia interna de um sistema associada às energias cinéticas das moléculas denomina-se **energia sensível** (Figura 1-18). A velocidade média e o grau de actividade das moléculas são proporcionais à temperatura do gás. Assim, a temperaturas elevadas, as moléculas possuem maior energia cinética e, como resultado, o sistema irá ter maior energia interna.



**FIGURA 1-18**

As diversas formas de energia microscópica que constituem a energia sensível.

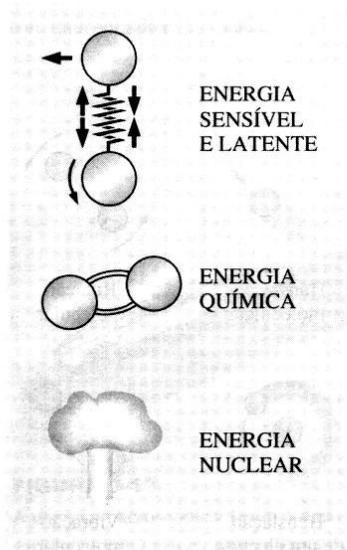
A energia interna também está associada às *forças de ligação intermoleculares*, que mantêm a sua coesão, e que, como se poderia esperar, são mais fortes nos sólidos e mais fracas nos gases. Ao fornecer-se energia suficiente às moléculas de um sólido ou líquido, estas irão superar as forças moleculares quebrando-as, convertendo a substância num gás. Isto representa o processo de mudança de fase. Devido à adição de energia, um sistema na fase gasosa está num nível energético superior comparativamente a um na fase sólida ou líquida. A energia interna associada à fase de um sistema é chamada **energia latente**. As mudanças mencionadas acima podem ocorrer sem alteração da composição química do sistema. A maioria dos problemas de termodinâmica está incluída nesta categoria, não sendo necessário considerar as forças de coesão dos átomos numa molécula.

Um átomo é composto por electrões que orbitam em torno de um núcleo constituído por protões com carga positiva e neutrões, ligados entre si por forças nucleares intensas. A energia interna associada com as ligações atómicas denomina-se **energia química**. Durante uma reacção química, como num processo de combustão, algumas ligações químicas são destruídas enquanto se formam outras, sendo o resultado uma variação de energia interna.

Deve-se indicar também a enorme quantidade de energia interna associada às ligações no interior do núcleo de um átomo (Figura 1-19), sendo esta chamada **energia nuclear**, que é libertada durante reacções nucleares. Obviamente que não necessitamos de nos preocupar com a energia nuclear em termodinâmica, a menos que estejamos perante uma reacção de fusão ou fissão. Uma reacção química envolve variações na estrutura dos electrões de um átomo, enquanto que uma reacção nuclear altera o seio do núcleo. Portanto, um átomo preserva a sua identidade durante uma reacção química, mas altera-se durante uma reacção nuclear.

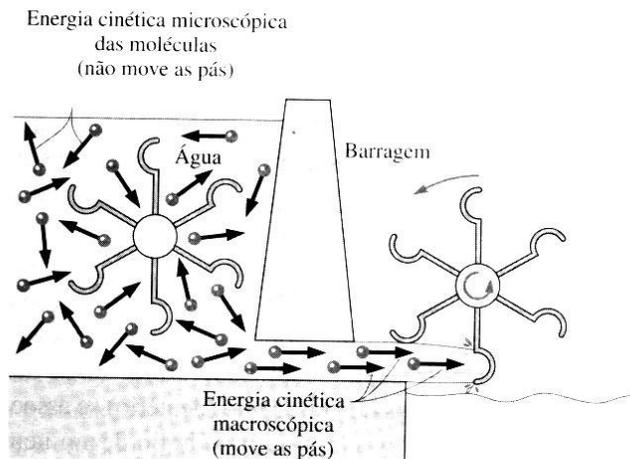
Os átomos podem também possuir *energias eléctrica e de momento de dipolo magnético* quando sujeitos a campos eléctricos ou magnéticos, devido à torção dos dipolos magnéticos produzidos pelas pequenas correntes eléctricas associadas à órbita dos electrões.

As formas de energia discutidas acima que constituem a energia total de um sistema podem ser *contidas* ou *armazenadas* num sistema, podendo ser vistas como formas *estáticas* de energia. As formas de energia que não são armazenadas no sistema podem ser vistas como formas *dinâmicas* ou como *interacções energéticas*. As formas dinâmicas são reconhecidas na fronteira do sistema, à medida que o atravessam, e representam a energia ganha ou perdida por um sistema durante um processo. As duas únicas formas de interacção energética associadas a um sistema fechado são a **transferência de calor** e o **trabalho**. Uma interacção de energia representa transferência de calor quando é provocada por uma diferença de temperatura, ou de outra forma, caracteriza-se por trabalho, como se expõe no Capítulo 3. Um volume de controlo pode também trocar energia através da transferência de massa, sempre que esta atravessa a fronteira do sistema, transportando a energia contida.



**FIGURA 1-19**

A energia interna de um sistema é dada pela soma de todas as formas de energia microscópicas.

**FIGURA 1-20**

A energia cinética macroscópica é uma forma organizada de energia e mais útil que as energias microscópicas desorganizadas cinéticas das moléculas.

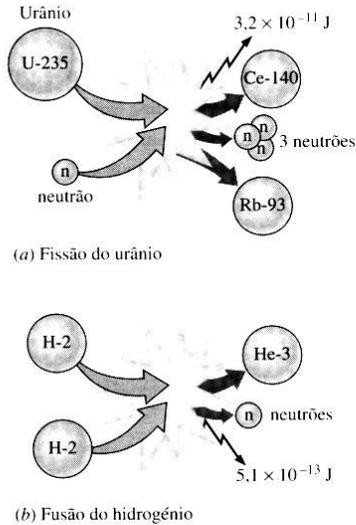
No dia-a-dia, as formas sensível e latente de energia interna são referidas, normalmente, como *calor*. Contudo, em termodinâmica, a estas formas de energia chama-se **energia térmica** para diferenciá-las da *transferência de calor*.

É necessário distinguir entre a energia cinética macroscópica de um corpo e a energia cinética microscópica das suas moléculas que constitui a energia interna sensível (Figura 1-20). A energia cinética de um corpo é uma forma *organizada* associada ao movimento ordenado de todas as moléculas numa *direcção* ao longo de uma linha recta ou em torno de um eixo. Por contraste, a energia cinética das moléculas é completamente *aleatória e desorganizada*. Como se verá nos capítulos seguintes, a energia organizada é muito mais valiosa do que a desorganizada, e a maior área de aplicação da termodinâmica é a conversão desta última (calor) em energia organizada (trabalho). Também se verá que a energia organizada pode ser toda convertida em desorganizada, mas somente uma fracção desta pode ser convertida em energia organizada, através de dispositivos especiais denominados *máquinas térmicas* (motores de automóveis e centrais térmicas). Um argumento semelhante pode ser dado para a energia potencial macroscópica de um corpo e as energias potenciais microscópicas.

### Considerações sobre energia nuclear

A reacção de fissão mais conhecida envolve a partição de um átomo de urânio (isótopo U-235) em outros elementos, sendo geralmente utilizada para gerar electricidade em centrais nucleares (429 em 1990, produzindo 311 000 MW em todo o mundo), propulsar submarinos nucleares e porta-aviões e até naves espaciais ou bombas nucleares. A primeira reacção nuclear em cadeia foi realizada por Enrico Fermi em 1942, e o primeiro reactor nuclear grande foi construído em 1944 com o intuito de produzir material para armas nucleares. Quando um átomo de urânio-235 absorve um neutrão, separando-se durante o processo de

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**



**FIGURA 1-21**

A fissão do urânio e a fusão do hidrogénio durante as reacções nucleares e a libertação de energia nuclear.

fissão, produz-se um átomo de cézio 140, um átomo de rubídio 93, três neutrões e  $3,2 \times 10^{-11}$  kJ de energia. Em termos práticos, a fissão de 1 kg de urânio-235 liberta  $6,63 \times 10^{10}$  kJ de calor que representa mais calor do que o libertado pela queima de 3000 toneladas de carvão. Portanto, para a mesma quantidade de combustível, uma reacção nuclear de fissão liberta milhões de vezes mais energia do que uma reacção química. Contudo, o tratamento seguro de combustível nuclear usado permanece uma preocupação.

A energia nuclear é libertada através da fusão quando dois núcleos pequenos se combinam formando um de maiores dimensões. A enorme quantidade de energia radiada pelo sol e outras estrelas é originada por processos idênticos em que dois átomos de hidrogénio se combinam para formar um de hélio. Quando os núcleos de dois átomos pesados de hidrogénio (deutério) se associam durante uma reacção de fusão, produzem um átomo de hélio 3, um neutrão livre e  $5,1 \times 10^{-13}$  J de energia (Figura 1-21).

As reacções de fusão são muito mais difíceis de obter na prática, devido à forte repulsão entre os nucleões carregados positivamente, denominada *repulsão de Coulomb*. De forma a superar esta força e permitir a fusão de dois nucleões, o nível de energia destes deve ser aumentado pelo aquecimento até cerca de 100 000 000° C. Mas estas temperaturas encontram-se somente nas estrelas ou na explosão de bombas atómicas. De facto, a reacção de fusão incontrolada de uma bomba de hidrogénio é iniciada por uma pequena bomba atómica. A reacção de fusão incontrolada foi obtida no início dos anos 30 do século XX, mas os esforços para conseguir uma reacção controlada através de *laser*, campos magnéticos e correntes eléctricas têm falhado desde então.

**EXEMPLO 1-3 Um automóvel a combustível nuclear**

Um automóvel vulgar consome cerca 5 l de gasolina por dia e a capacidade do seu reservatório é de aproximadamente 50 l, sendo portanto necessário reabastecer cada 10 dias. A massa volúmica da gasolina compreende-se entre 0,72 a 0,78 kg/l e o poder calorífico inferior é cerca de 44 000 kJ/kg (libertam-se 44 000 kJ pela queima completa de 1 kg de gasolina). Supondo resolvidos todos os problemas com a radioactividade e o tratamento de combustível nuclear usado, pretende-se propulsar um automóvel com U-235. Sabendo que este automóvel vem equipado com 0,1 kg de combustível nuclear, determine se alguma vez este automóvel necessita de ser reabastecido (Figura 1-22).

**Solução** Considerando a massa volúmica média da gasolina como 0,75 kg/l, o consumo de combustível por dia é de

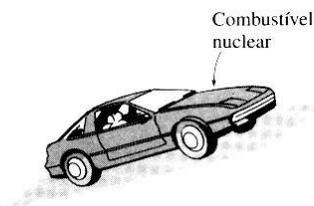
$$m_{\text{gasolina}} = (\rho V)_{\text{gasolina}} = (0,75 \text{ kg/l})(5 \text{ l/dia}) = 3,75 \text{ kg/dia}$$

tendo em conta que o poder calorífico da gasolina é de 44 000 kJ/kg, a energia fornecida ao automóvel por dia é

$$E_{\text{dia}} = (m_{\text{gasolina}})(\text{poder calorífico}) = (3,75 \text{ kg/dia})(44 \text{ 000 kJ/kg}) = 165 \text{ 000 kJ/dia}$$

A fissão completa de 0,1 kg de urânio-235 liberta

$$(6,73 \times 10^{10})(0,1 \text{ kg}) = 6,73 \times 10^9 \text{ kJ}$$



**FIGURA 1-22**

Esquema para o Exemplo 1-3.

de calor, sendo suficiente para cumprir com as necessidades de energia do automóvel em

$$N.º \text{ de dias} = \frac{\text{Conteúdo de energia do combustível}}{\text{Consumo diário de energia}} = \frac{6,73 \times 10^9 \text{ kJ}}{165\,000 \text{ kJ/dia}} = 40\,790 \text{ dias}$$

sendo equivalente a cerca de 112 anos. Considerando que nenhum automóvel irá durar mais do que 100 anos, um veículo deste tipo nunca necessitará de ser reabastecido.

## 1-5 ■ PROPRIEDADES DE UM SISTEMA

Qualquer característica de um sistema é chamada **propriedade**, e alguns exemplos desta são a pressão  $P$ , a temperatura  $T$ , o volume  $V$  e a massa  $m$ . Esta lista pode ser estendida de forma a incluir propriedades menos usuais, tais como a viscosidade, a condutividade térmica, o módulo de elasticidade, o coeficiente de expansão térmica, resistibilidade eléctrica e até a velocidade e elevação.

Contudo, nem todas as propriedades são independentes, sendo algumas definidas em função de outras. Por exemplo, a massa volúmica é caracterizada pela *massa por unidade de volume*:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1-10)$$

Por vezes, a massa volúmica de uma substância é dada em função de outra substância conhecida. Neste caso denomina-se **densidade**<sup>1</sup>, sendo definida como *a relação entre a massa volúmica de uma substância face a outra padrão, a uma dada temperatura* (geralmente água a 4° C, para a qual  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ )<sup>2</sup>. Isto é,

$$\rho_s = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (1-11)$$

Note que o valor da densidade é adimensional.

Uma propriedade mais comum em termodinâmica é o **volume específico**, recíproco da massa volúmica (Figura 1-23), definido como o *volume por unidade de massa*:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \text{ (m}^3\text{/kg)} \quad (1-12)$$

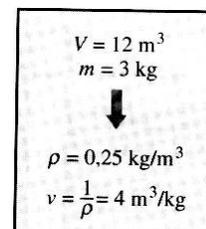
Note que, em termodinâmica clássica, a estrutura atómica de uma substância (e os espaços intermoleculares) não é considerada, sendo a substância tida como um **continuum**, sendo contínua, homogénea e não apresentando orifícios microscópicos. Esta idealização é válida desde que se trabalhe com volumes, áreas e comprimentos que se apresentem demasiado grandes em relação aos espaços intermoleculares.

As propriedades podem ser consideradas como *intensivas* ou *extensivas*. As **propriedades intensivas** são independentes da dimensão do sistema, tais como a temperatura, a pressão e a massa volúmica (Figura 1-24). Nas **propriedades extensivas**, o seu valor depende da dimensão — ou extensão — do sistema.

<sup>1</sup> N. T.: Nalgumas obras usa-se o termo «densidade» como sinónimo de «massa» e à relação entre massas volúmicas associa-se o termo «densidade relativa». Embora essa terminologia seja mais «semelhante» à inglesa, nesta tradução usar-se-á a denominação tradicional portuguesa.

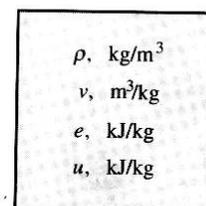
<sup>2</sup> N. T.: Isto é válido para sólidos e líquidos. Para gases, relaciona-se a massa volúmica do gás com a do ar nas mesmas condições de pressão e de temperatura.

### Propriedades de um sistema



**FIGURA 1-23**

A massa volúmica representa a massa por unidade de volume; o volume específico representa o volume por unidade de massa.

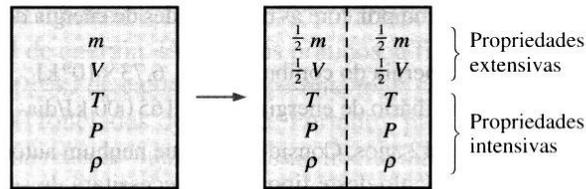


**FIGURA 1-24**

As propriedades intensivas são independentes da dimensão do sistema.

**FIGURA 1-25**

Critério de diferenciação de propriedades intensivas e extensivas.

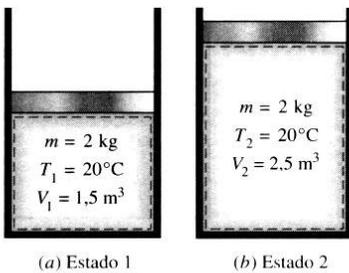


A massa  $m$ , o volume  $V$  e a energia total  $E$  são alguns exemplos de propriedades extensivas. Uma forma simples de determinar se uma propriedade é extensiva ou intensiva é dividir o sistema em duas partes iguais, como mostra a Figura 1-25. Cada parte irá ter o mesmo valor das propriedades intensivas, mas metade das propriedade extensivas.

Em geral, atribuem-se letras maiúsculas na notação de propriedades extensivas (sendo a massa  $m$  uma exceção) e letras minúsculas para denotar propriedades intensivas (sendo exceção a pressão  $P$  e temperatura  $T$ ). As propriedades extensivas por unidade de massa são chamadas **propriedades específicas**, sendo exemplos destas o volume específico ( $v = V/m$ ), a energia total específica ( $e = E/m$ ) e a energia interna específica ( $u = U/m$ ).

**1-6 ■ ESTADO E EQUILÍBRIO**

Considere um sistema em que não se verifica nenhuma alteração. Todas as propriedades podem ser medidas ou calculadas ao longo de todo o sistema, permitindo caracterizar um conjunto de propriedades que descrevem completamente a condição ou *estado* do sistema. Num dado estado, todas as propriedades do sistema têm valores fixos e, se um destes variar, verifica-se uma mudança de estado. A Figura 1-26 ilustra um sistema em dois estados diferentes.



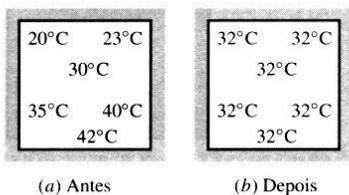
**FIGURA 1-26**

Um sistema em dois estados diferentes.

A termodinâmica estuda os estados de **equilíbrio**, sendo estes caracterizados pela inexistência de potenciais desequilibrados no seio do sistema. Um sistema em equilíbrio não sofre alterações quando está isolado da sua vizinhança.

Existem vários tipos de equilíbrio, e um sistema não está em equilíbrio termodinâmico, a menos que todas as condições relevantes deste sejam satisfeitas. Por exemplo, um sistema está em **equilíbrio térmico** se a temperatura for a mesma ao longo de todo o sistema, como ilustra a Figura 1-27b. Ou seja, o sistema não apresenta qualquer diferencial de temperatura que promova a transferência de calor.

O **equilíbrio mecânico** relaciona-se com a pressão, e um sistema encontra-se neste tipo de equilíbrio se não se verificar variação de pressão em qualquer ponto do sistema ao longo do tempo. Contudo, a pressão pode variar no interior, com a elevação, como resultado de efeitos gravitacionais. Mas uma pressão mais elevada numa camada inferior é equilibrada pelo peso adicional que tem de suportar, não havendo portanto desequilíbrio de forças. Na maior parte dos sistemas termodinâmicos, a variação de pressão devida ao efeito da gravidade é muito reduzida, não sendo portanto de grande relevância.



**FIGURA 1-27**

Um sistema fechado a alcançar o equilíbrio térmico.

Se um sistema incluir duas fases, este encontra-se em **equilíbrio de fase** quando a massa de cada fase atingir e manter um nível de equilíbrio. Finalmente, um sistema está em **equilíbrio químico** se a sua composição química

se mantiver constante ao longo do tempo, ou seja, se não ocorrerem reacções químicas. Um sistema não se encontra em equilíbrio, a menos que todos os critérios de equilíbrio relevantes sejam satisfeitos.

## 1-7 ■ PROCESSOS E CICLOS

Qualquer alteração que um sistema sofra desde um estado de equilíbrio para um outro denomina-se **processo**, e a série de estados pelos quais um sistema passa durante um processo chama-se **caminho** (Figura 1-28). Para descrever um processo na sua totalidade é necessário especificar os estados inicial e final, o caminho percorrido e as interacções com a vizinhança.

Quando um processo evolui de forma a que o sistema permaneça infinitesimalmente próximo do estado de equilíbrio, denomina-se processo **quase-estático** ou de **quase-equilíbrio**. Este pode ser visto como um processo suficientemente lento que permite ao sistema ajustar-se internamente, de forma a que as propriedades sejam homogéneas, como ilustra a Figura 1-29.

Quando um gás contido num dispositivo cilindro-êmbolo é comprimido rapidamente, as moléculas próximas da face do êmbolo não terão tempo suficiente para escapar e irão ser amontoadas numa pequena região em frente do êmbolo, criando uma zona de alta pressão. Devido a esta diferença de pressão, o sistema não se encontra em equilíbrio. Contudo, se o êmbolo for movido lentamente, as moléculas terão tempo suficiente para se redistribuir, não se acumulando, como no caso anterior. Como resultado, a pressão no interior do cilindro manter-se-á uniforme e irá aumentar da mesma forma em todos os locais. Este é um processo de quase-equilíbrio, visto que o equilíbrio é mantido ao longo do tempo.

Deve-se salientar que este tipo de processos é idealizado, não representando os casos reais. Contudo, muitos processos reais aproximam-se destes, podendo ser modelados como quase-equilíbrio, com erro insignificante. Em engenharia existe um interesse neste tipo de processos, por duas razões. A primeira é de que são de fácil análise, e a segunda é que as máquinas produzem mais trabalho quando operam com este tipo de processos (Figura 1-30). Assim sendo, os processos de quase-equilíbrio servem de base de comparação para processos reais.

Os diagramas de processos traçados com coordenadas de propriedades termodinâmicas são muito úteis, pois permitem a visualização destes. A temperatura  $T$ , a pressão  $P$  e o volume  $V$  (ou volume específico  $v$ ) são algumas propriedades mais usadas como coordenadas de diagramas. A Figura 1-31 mostra um diagrama  $P$ - $V$  de um processo de compressão de um gás.

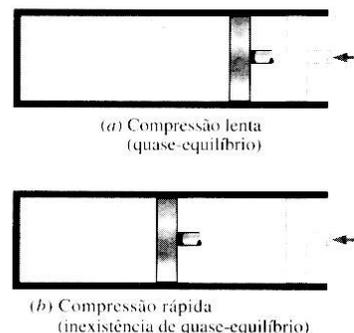
Note que o caminho do processo indica uma série de estados de equilíbrio pelos quais o sistema passa. Não é possível especificar um caminho nos outros tipos de processos, sendo estes representados por uma linha de traço interrompido.

### Processos e ciclos



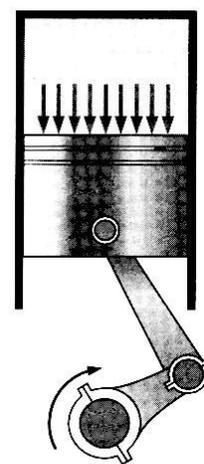
**FIGURA 1-28**

Um processo entre os estados 1 e 2 e o caminho percorrido.



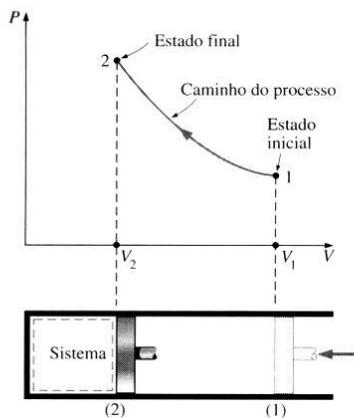
**FIGURA 1-29**

Processos de compressão de quase-equilíbrio e de inexistência de quase-equilíbrio.



**FIGURA 1-30**

Os dispositivos que funcionam segundo um processo de quase-equilíbrio são os que realizam mais trabalho.



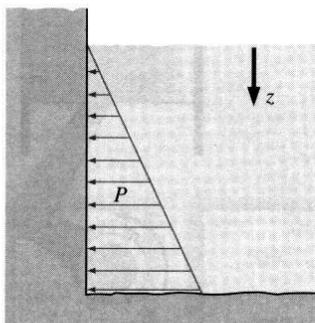
**FIGURA 1-31**

Diagrama  $P$ - $V$  de um processo de compressão.



**FIGURA 1-32**

O estado do azoto é estabelecido através de duas propriedades intensivas independentes.



**FIGURA 1-33**

A pressão de um fluido em repouso aumenta com a profundidade (devido ao peso adicional).

O prefixo *iso* é geralmente usado para designar um processo no qual uma propriedade particular permanece constante. Por exemplo, num **processo isotérmico**, a temperatura  $T$  permanece constante. Num **processo isobárico** é a pressão  $P$ , e num **processo isocórico** (ou **isométrico**) é o volume específico  $v$  que permanece constante.

Diz-se que um sistema completa um **ciclo** se no fim do processo retorna ao seu estado inicial. Isto é, num ciclo, o estado inicial e final são idênticos.

## 1-8 ■ POSTULADO DE ESTADO

Como foi mencionado anteriormente, o estado de um sistema é descrito pelas suas propriedades. Mas sabe-se que não é necessário especificar todas as propriedades, de forma a definir um estado, tomando as restantes valores automaticamente. O número de propriedades necessárias para caracterizar o estado de um sistema é dado pelo **postulado de estado**:

*O estado de um sistema simples compressível é completamente definido através de duas propriedades intensivas independentes.*

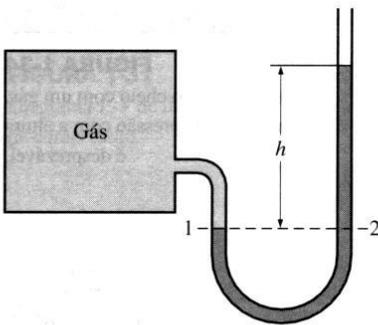
Denomina-se **sistema compressível simples** se não existirem efeitos externos eléctricos, magnéticos, gravíticos, de movimento e de tensão superficial. Estes efeitos são devidos a campos de forças externas e são insignificantes na maioria dos problemas de engenharia. Caso estes efeitos sejam representativos, é necessário especificar propriedades adicionais. Como exemplo, a elevação  $z$  é adicionalmente especificada se os efeitos da gravidade se apresentarem relevantes.

O postulado de estado necessita que sejam definidas duas propriedades **independentes**, de forma a estabelecer um estado. Duas propriedades são independentes se, ao variar-se uma, a outra se mantiver inalterada. Por exemplo, a temperatura e o volume específico são sempre propriedades independentes, e ambas permitem definir o estado de um sistema compressível simples (Figura 1-32). No entanto, a temperatura e a pressão são propriedades independentes somente para sistemas monofásicos, tornando-se dependentes no caso de existir mais que uma fase. Ao nível do mar ( $P = 1 \text{ atm}$ ), a água entra em ebulição a  $100^\circ \text{ C}$ . No entanto, no topo de uma montanha onde a pressão é inferior, a ebulição da água verifica-se a uma temperatura inferior. Assim,  $T = f(P)$  durante o processo de mudança de fase, não sendo suficientes para determinar o estado de um sistema bifásico. Os processos de mudança de fase serão descritos em pormenor no próximo capítulo.

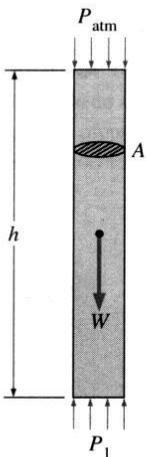
## 1-9 ■ PRESSÃO

A pressão é a *força exercida por um fluido por unidade de área*. Este termo só se aplica para gases ou líquidos. Para o caso de sólidos, denomina-se *tensão*. Num fluido estacionário, a pressão num dado ponto é a mesma em todas as direcções, aumentando proporcionalmente com a profundidade, como resultado de peso do fluido, como mostra a Figura 1-33. Isto deve-se ao facto de as camadas





**FIGURA 1-37**  
 Um manômetro básico.



**FIGURA 1-38**  
 Diagrama de corpo livre de uma  
 coluna de fluido de altura  $h$ .

#### EXEMPLO 1-4 Pressão absoluta de uma câmara de vácuo

Um manômetro de depressão está ligado a uma câmara indicando 5,8 psi num local onde a pressão atmosférica é de 14,5 psi. Determine a pressão absoluta no interior da câmara.

**Solução** A pressão absoluta é facilmente determinada através da Equação 1-14:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{depressão}} = (14,5 - 5,8) \text{ psi} = 8,7 \text{ psi}$$

Nas relações e tabelas termodinâmicas, a pressão absoluta é a mais usada. Ao longo deste texto, a pressão  $P$  irá referir-se à *pressão absoluta*, salvo se for indicado o contrário. Por vezes, juntam-se as notações «a» (para pressão absoluta) e «g» (para pressão manométrica) às unidades (tal como psia ou psig), de forma a indicar o tipo de valor.

#### Manómetro

Diferenças de pressão pequenas ou médias são medidas através de um **manómetro** que consiste num tubo em forma de U de vidro ou plástico transparente, contendo um fluido como mercúrio, água, álcool ou óleo. De forma a manter razoáveis as dimensões do aparelho, utilizam-se fluidos pesados, como o mercúrio, quando se pretendem medir valores de pressão consideráveis.

Considere o manómetro ilustrado na Figura 1-37 que está a ser usado para medir a pressão num reservatório. Como os efeitos de gravidade nos gases são desprezáveis, a pressão em qualquer ponto do reservatório e no local 1 é a mesma. Além disso, visto que a pressão num fluido não varia na horizontal, o valor desta em 2 é o mesmo que em 1. Logo,  $P_2 = P_1$ .

A altura da coluna diferencial do fluido,  $h$ , está em equilíbrio estático, e o diagrama de corpo livre é mostrado na Figura 1-38. A força de equilíbrio na direcção vertical é

$$AP_1 = AP_{\text{atm}} + W$$

em que

$$P = mg = \rho Vg = \rho Ahg$$

Assim,

$$P_1 = P_{\text{atm}} + \rho gh \text{ (kPa)} \quad (1-15)$$

Nas relações apresentadas acima,  $W$  representa o peso da coluna de fluido,  $\rho$  a massa volúmica do fluido, que se assume constante,  $g$  a aceleração da gravidade local,  $A$  a secção do tubo, e  $P_{\text{atm}}$  a pressão atmosférica local. A diferença de pressão pode ser expressa por

$$\Delta P = P_1 - P_{\text{atm}} = \rho gh \text{ (kPa)} \quad (1-16)$$

Note-se que a área da secção do tubo não tem qualquer efeito no diferencial de altura  $h$  e na pressão exercida pelo fluido.

#### EXEMPLO 1-5 Medição de pressão através de um manómetro

Um manómetro é utilizado para medir a pressão num reservatório. O fluido utilizado tem uma densidade específica de 0,85 e a altura da coluna do manómetro é de 55 cm, como

mostra a Figura 1-39. Sabendo que a pressão atmosférica local é de 96 kPa, determine a pressão absoluta no interior do reservatório.

**Solução** Não é especificado o valor da aceleração da gravidade. Assume-se que seja o valor padrão de  $9,807 \text{ m/s}^2$ . A massa volúmica do fluido é obtida pela multiplicação do valor da densidade específica pelo valor da massa volúmica da água, tida como  $1000 \text{ kg/m}^3$ :

$$\rho = (\rho_s)(\rho_{\text{H}_2\text{O}}) = (0,85)(1000 \text{ kg/m}^3) = 850 \text{ kg/m}^3$$

da Equação 1-15:

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{atm}} + \rho gh \\ &= 96 \text{ kPa} + (850 \text{ kg/m}^3)(9,807 \text{ m/s}^2)(0,55 \text{ m}) \left( \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ N/m}^2} \right) \\ &= \mathbf{100,6 \text{ kPa}} \end{aligned}$$

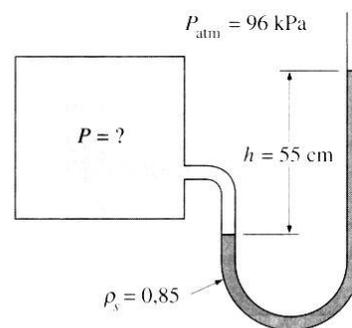
Um outro tipo de dispositivo mecânico de medição de pressão é o **tubo de Bourdon**, do inventor francês Eugene Bourdon, que consiste num tubo oco de metal em forma de gancho cuja extremidade é fechada e ligada à agulha de um mostrador (Figura 1-40). Quando o fluido no interior é pressurizado, o tubo estende-se, movendo a agulha proporcionalmente à pressão aplicada.

A electrónica está presente em todos os aspectos da nossa vida incluindo os dispositivos de medição de pressão. Os sensores modernos, denominados **transdutores de pressão**, são fabricados em material semiconductor, como o silício, convertendo o efeito da pressão num efeito eléctrico, como a variação da tensão, a resistência ou a capacitância. Os transdutores de pressão são mais pequenos, rápidos, sensíveis, fiáveis e precisos do que os mecânicos; podem medir desde 1 milionésimo a vários milhares de atmosferas.

Existe uma grande variedade de transdutores de pressão para medir valores manométricos, absolutos e diferenciais numa vasta gama de aplicações. Os transdutores manométricos utilizam a pressão atmosférica como referência, através da ligação de um dos lados do diafragma à atmosfera, dando um sinal de saída de zero para a pressão atmosférica, independentemente da altitude. Os transdutores de pressão absoluta são calibrados para indicar o valor zero em vácuo absoluto. Os de pressão diferencial medem a pressão entre dois locais, em vez de utilizar dois transdutores e calcular a diferença.

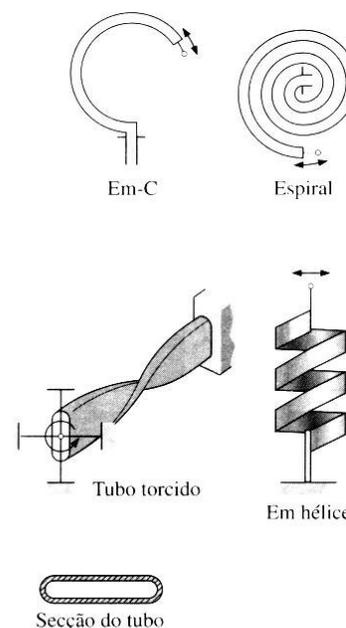
A criação de um potencial eléctrico de uma substância cristalina sujeita a pressão mecânica é o chamado efeito **piezoeléctrico** (ou **pressoeléctrico**). Este fenómeno foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880 e consiste no princípio de funcionamento das **células de carga**. Os sensores destes transdutores são constituídos por fios ou placas finas de metal cuja resistência eléctrica varia sob influência da pressão de um fluido. A variação da resistência é determinada, fazendo passar uma corrente eléctrica através do sensor, e a medição da variação de tensão resultante é proporcional à pressão aplicada.

## Pressão



**FIGURA 1-39**

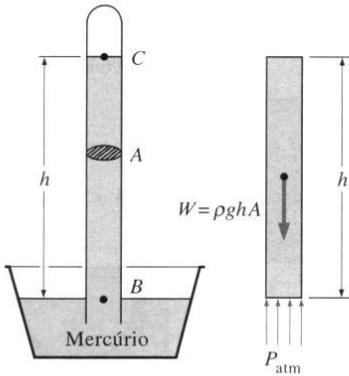
Esquema para o Exemplo 1-5.



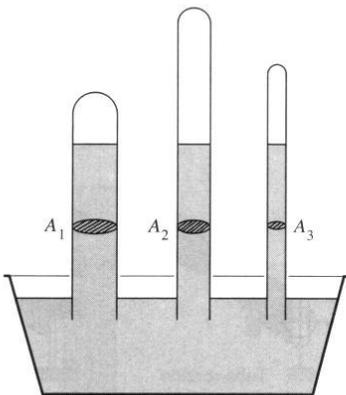
**FIGURA 1-40**

Diversos tipos de tubos de Bourdon empregues na medição de pressão.

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**



**FIGURA 1-41**  
 Um manômetro básico.



**FIGURA 1-42**  
 O comprimento, ou a área da secção transversal de um tubo, não tem qualquer efeito sobre a altura da coluna de fluido de um barômetro.

## Barômetro

Um **barômetro** é empregue na medição da pressão atmosférica, também chamada *pressão barométrica*.

Há alguns séculos atrás, Torricelli (1608-1647) descobriu que a pressão atmosférica pode ser medida pela colocação invertida de um tubo com mercúrio no seu interior sobre numa tina aberta, também contendo mercúrio, como se ilustra na Figura 1-41. A pressão no ponto B é igual à pressão atmosférica, e a pressão em C pode ser considerada zero, visto que existe somente vapor de mercúrio acima de C, e a pressão que este exerce é desprezável. Escrevendo o somatório de forças na direcção vertical, tem-se

$$P_{\text{atm}} = \rho gh \text{ (kPa)} \quad (1-17)$$

em que  $\rho$  representa a massa volúmica de mercúrio,  $g$  a aceleração da gravidade local e  $h$  a altura da coluna de mercúrio medida a partir da superfície livre. Note que o comprimento e secção do tubo não têm efeito sobre a altura da coluna do fluido num barômetro (Figura 1-42).

Uma unidade de pressão frequentemente utilizada é a *atmosfera padrão*, definida como a pressão produzida por uma coluna de mercúrio com 760 mm de altura a 0° C ( $\rho_{\text{Hg}} = 13\,595 \text{ kg/m}^3$ ) sob influência da aceleração da gravidade padrão ( $g = 9,807 \text{ m/s}^2$ ). Se for utilizada água em vez de mercúrio, é necessária uma coluna de aproximadamente 10,3 m. Por vezes, a pressão é expressa em termos de altura da coluna de mercúrio. Por exemplo, a pressão atmosférica padrão é de 760 mm<sub>Hg</sub> (29,92 pol<sub>Hg</sub>) a 0° C.

A pressão atmosférica média  $P_{\text{atm}}$  varia de 101,325 kPa ao nível do mar para 89,88, 79,50, 54,05, 26,5 e 5,53 kPa às altitudes de 1000, 2000, 5000, 10 000 e 20 000 metros, respectivamente. A pressão atmosférica média em Denver (altitude = 1610 m) é de 83,4 kPa.

Lembre-se que a pressão atmosférica num local é apenas devida ao peso do ar por unidade de área. Assim, varia não só conforme a altitude, mas também consoante as condições meteorológicas.

### EXEMPLO 1-6 Medição da pressão atmosférica através de um manômetro

Determine a pressão atmosférica num local onde um barômetro indica 740 mm<sub>Hg</sub> e a aceleração gravítica é de  $g = 9,7 \text{ m/s}^2$ . Assume-se que a temperatura do mercúrio é de 10° C, sendo a sua massa volúmica de 13 570 kg/m<sup>3</sup>.

**Solução** Da Equação 1-17, a pressão atmosférica é determinada por:

$$P_{\text{atm}} = \rho gh = (13\,570 \text{ kg/m}^3)(9,7 \text{ m/s}^2)(0,74 \text{ m}) \left( \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left( \frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ N/m}^2} \right)$$

$$= 97,41 \text{ kPa}$$

### EXEMPLO 1-7 Efeito do peso de um êmbolo na pressão no interior de um cilindro

O êmbolo de um dispositivo cilindro-êmbolo, contendo um gás cuja massa é de 60 kg, tem uma secção 0,04 m<sup>2</sup>, como mostra a Figura 1-43. A pressão atmosférica local é de 0,97 bar e a aceleração da gravidade é de 9,8 m/s<sup>2</sup>.

(a) Determine a pressão no interior do cilindro. (b) Se for transferido calor para o gás e o seu volume duplicar, prevê alguma alteração na pressão interior?

**Solução** (a) A pressão do gás no interior do cilindro depende da pressão atmosférica e do peso do êmbolo. Pela esquematização do diagrama de corpo livre (Figura 1-44) obtém-se:

$$PA = P_{\text{atm}}A + W$$

$$P = P_{\text{atm}} + \frac{mg}{A}$$

$$= 0,97 \text{ bar} + \frac{(60 \text{ kg})(9,8 \text{ m/s}^2)}{0,04 \text{ m}^2} \left( \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left( \frac{1 \text{ bar}}{10^5 \text{ N/m}^2} \right)$$

$$= 1,117 \text{ bar}$$

(b) A variação de volume não terá qualquer efeito sobre o diagrama de corpo livre desenhado para a alínea (a). Assim, a pressão no interior manter-se-á constante.

## 1-10 ■ A TEMPERATURA E A LEI ZERO DA TERMODINÂMICA

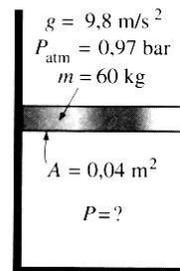
Embora estejamos familiarizados com a palavra **temperatura** como medida de «calor» e «frio», não é fácil estabelecer uma definição exacta desta propriedade. Com base nas nossas sensações fisiológicas, caracterizamos o nível de temperatura qualitativamente com expressões do tipo *gelado*, *frio*, *morno*, *quente* ou *a esquentar*. No entanto, não é possível atribuir valores à temperatura baseada somente nos nossos sentidos, pois estes podem ser enganosos. Por exemplo, uma cadeira de metal parece-nos mais fria do que uma de madeira, mesmo estando as duas à mesma temperatura.

No entanto, existem diversas propriedades dos materiais que variam consoante a temperatura de uma forma *previsível* e *repetível*, sendo a base de medição precisa da temperatura. O vulgar termómetro de mercúrio é baseado no princípio de expansão do mercúrio com a temperatura. A temperatura também pode ser medida através de outras propriedades dela dependentes.

É do conhecimento geral que uma chávena de café irá arrefecer e que uma bebida fresca irá aquecer com o tempo. Isto é, quando um corpo entra em contacto com outro que esteja a uma temperatura diferente, existe uma transferência de calor do corpo mais quente para o mais frio, até que ambos estejam à mesma temperatura (Figura 1-45). Nesse instante, a transferência de calor cessa e diz-se que ambos os corpos atingiram o **equilíbrio térmico**, sendo a igualdade de temperatura o único requisito para se estabelecer este equilíbrio.

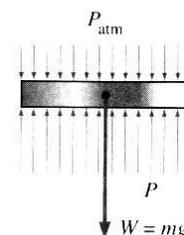
A **lei zero da termodinâmica** estabelece que, se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, eles estão também em equilíbrio térmico entre si. Pode parecer caricato que um facto tão simples seja estabelecido como uma das leis básicas da termodinâmica. No entanto, este princípio não pode ser derivado das outras leis e serve de base para a validade da medição da tempe-

### A temperatura e a lei zero da termodinâmica



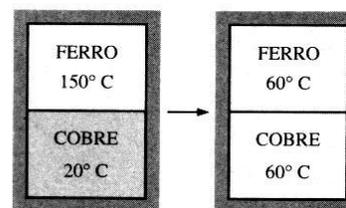
**FIGURA 1-43**

Esquema para o Exemplo 1-7.



**FIGURA 1-44**

Diagrama de corpo livre de um êmbolo.



**FIGURA 1-45**

Dois corpos que alcançam o equilíbrio térmico ao estarem em contacto num recinto isolado.

ratura. Ao substituir-se o terceiro corpo por um termómetro, a lei zero pode ser escrita como: *dois corpos estão em equilíbrio térmico se ambos apresentarem o mesmo valor de medição de temperatura, mesmo que não estejam em contacto.*

A lei zero foi formulada pela primeira vez por R. H. Fowler em 1931, e o seu valor, como princípio físico fundamental, foi reconhecido mais de meio século após a formulação da primeira e da segunda leis da termodinâmica, sendo portanto denominada lei zero, pois deveria precedê-las.

### Escalas de temperatura

As escalas de temperatura permitem aos cientistas utilizar uma base comum para medições, tendo sido desenvolvidas diversas ao longo do tempo. Todas estas escalas são baseadas em estados da matéria facilmente reproduzíveis, tais como os pontos de fusão e de ebulição da água, também denominados *ponto de gelo* e *ponto de vapor*, respectivamente. O ponto de gelo é definido como uma mistura de gelo e água em equilíbrio com ar saturado de vapor à pressão de 1 atm, e o ponto de vapor é definido pela mistura de água e vapor (sem ar) igualmente em equilíbrio e à pressão de 1 atm.

Presentemente, a escala de temperatura utilizada no SI e sistema inglês é a **escala Celsius** (anteriormente denominada *escala centígrada*; em 1948 foi alterada para o nome do astrónomo sueco que a desenvolveu, A. Celsius, 1701-1744) e a **escala Fahrenheit** (do fabricante de instrumentos alemão, G. Fahrenheit, 1686-1736), respectivamente. Na primeira escala, atribuíram os valores de 0 e 100° C para os pontos de fusão e ebulição da água, respectivamente. Os valores correspondentes na escala Fahrenheit são de 32 e 212° F. Estas escalas são por vezes classificadas como escalas de dois pontos, pois os valores da temperatura são atribuídos a dois pontos diferentes.

Em termodinâmica, é desejável conhecer uma escala de temperatura que seja independente das propriedades de uma dada substância. A esta chama-se **escala de temperatura termodinâmica** e irá ser desenvolvida no Capítulo 5 em conjunto com a segunda lei. No SI, a escala de temperatura termodinâmica é a **escala Kelvin**, cujo nome vem de Lord Kelvin (1824-1907), e a unidade é o **kelvin**, designado por K (e não °K; o símbolo de grau foi abolido do kelvin em 1967). O valor mais baixo desta escala é 0 K. Pelo uso de técnicas de refrigeração não convencionais, cientistas conseguiram aproximar-se de 0 K (alcançou-se em 1989 o valor de 0,000 000 002 K).

No sistema inglês, a escala de temperatura termodinâmica é a **escala Rankine**, derivada de William Rankine (1820-1872), sendo a unidade, o **rankine**, designada por R.

Uma escala de temperatura idêntica à de Kelvin é a **escala de temperatura de gás perfeito**. As temperaturas nesta escala são medidas através de um **termómetro de gás a volume constante** que é basicamente um reservatório rígido repleto de hidrogénio ou de hélio a uma baixa pressão. Este termómetro baseia-se no princípio de que, *a baixas pressões e a um volume constante, a temperatura de um gás é proporcional à sua pressão*. Isto é, a temperatura de um gás

a um volume constante varia *linearmente* com a pressão, se esta for suficientemente baixa. Assim, a relação entre temperatura e pressão pode ser expressa como

$$T = a + bP \quad (1-18)$$

em que os valores das constantes  $a$  e  $b$  são determinados experimentalmente. Conhecendo estes valores, a temperatura de um meio pode ser calculada através da relação anterior pela imersão do reservatório do termómetro de gás no meio e a subsequente medição da pressão após atingir o equilíbrio térmico.

A escala de temperatura de gás ideal pode ser desenvolvida através da medição das pressões no interior do reservatório em dois pontos de valor conhecido, permitindo o cálculo das variáveis  $a$  e  $b$  da Equação 1-18. Os valores das constantes diferem para cada termómetro, visto que dependem do tipo e da quantidade de gás contido no reservatório e dos valores das temperaturas dos dois pontos de referência. Se estes forem os pontos de gelo e de vapor e lhes forem atribuídos os valores de 0 e 100, então a escala de temperatura irá ser idêntica à de Celsius. Neste caso, a constante  $a$  (que corresponde à pressão absoluta de zero) toma o valor de  $-273,15^\circ\text{C}$  independentemente do tipo e da quantidade de gás contido no reservatório do termómetro, ou seja, num diagrama  $P$ - $T$ , todas as linhas rectas que passam pelos pontos de referência irão intersectar o eixo da temperatura em  $-273,15^\circ\text{C}$ , por extrapolação, como se ilustra na Figura 1-46. Esta é a temperatura mais baixa que pode obter-se através de um termómetro de gás. Assim, pode obter-se na *escala de temperatura de gás absoluta*, atribuindo o valor de zero à constante  $a$  da Equação 1-18, ficando esta reduzida a  $T = bP$ , sendo necessário um ponto de referência para definir a escala.

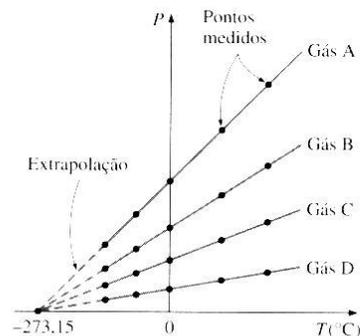
De notar que este tipo de escala não é uma escala de temperatura termodinâmica, visto que não pode ser usada em temperaturas muito baixas ou muito elevadas, devido à condensação ou à dissociação e à ionização, respectivamente. Contudo, a temperatura absoluta de gás é idêntica à temperatura termodinâmica na amplitude de medição do termómetro. Assim, pode encarar-se este tipo de escala como uma escala que se baseia num termómetro contendo um gás «perfeito» ou «imaginário» que se comporta como um gás de baixa pressão, independentemente da temperatura. Se tal gás existisse, o termómetro leria zero kelvins para a pressão absoluta de zero, que corresponderia a  $-273,15^\circ\text{C}$  na escala Celsius (Figura 1-47).

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (1-19)$$

A escala Rankine está relacionada com a de Fahrenheit através de

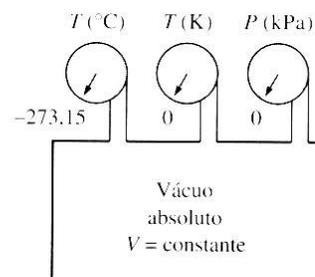
$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67 \quad (1-20)$$

### A temperatura e a lei zero da termodinâmica



**FIGURA 1-46**

Traçado de  $P$  vs.  $T$  de dados obtidos experimentalmente de um termómetro de gás a um volume constante, utilizando quatro gases a diferentes pressões baixas.



**FIGURA 1-47**

À pressão absoluta de zero, um termómetro de gás a um volume constante indicaria  $-273,15^\circ\text{C}$ .

## CAPÍTULO 1

## Conceitos básicos de termodinâmica

É prática comum arredondar os valores da constante na Equação 1-19 para 273, e na Equação 1-20 para 460.

As escalas de temperatura nos dois sistemas de unidades são relacionadas por

$$T(\text{R}) = 1,8 T(\text{K}) \quad (1-21)$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (1-22)$$

A comparação entre as diversas escalas de temperatura é ilustrada na Figura 1-48.

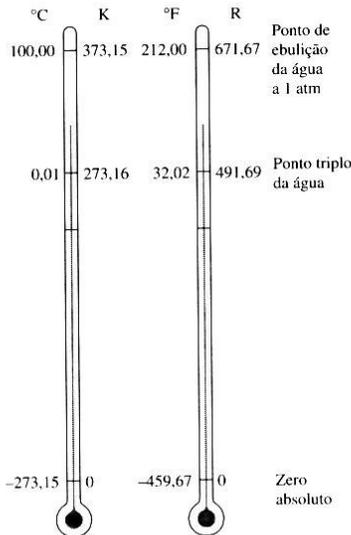


FIGURA 1-48

Comparação entre escalas de temperatura.

Na Décima Conferência de Pesos e Medidas de 1954, a escala Celsius foi redefinida como uma escala de temperaturas absoluta, baseada num único ponto de referência. Este é o *ponto triplo* da água (um estado em que coexistem as três fases em equilíbrio), tendo-lhe sido atribuído o valor de  $0,01^{\circ}\text{C}$ . A magnitude do grau é definida na escala de temperatura absoluta. Tal como antes, o ponto de ebulição da água à pressão de 1 atm tem o valor de  $100,00^{\circ}\text{C}$ . Assim, a escala Celsius antiga e a moderna são em tudo semelhantes.

Na escala Kelvin, a dimensão da unidade *kelvin* é definida como «a fracção  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água, a que se atribuiu o valor de  $273,16\text{ K}$ ». O ponto de gelo nas escalas Celsius e Kelvin é  $0^{\circ}\text{C}$  e  $273,15\text{ K}$ , respectivamente.

Note que as magnitudes de cada divisão de  $1\text{ K}$  e  $1^{\circ}\text{C}$  são idênticas (Figura 1-49). Assim, quando se trata de diferenças de temperatura,  $\Delta T$ , o intervalo de temperaturas em ambas as escalas é o mesmo. Ou seja, um aumento de temperatura de uma substância em  $10^{\circ}\text{C}$  é o mesmo que um aumento em  $10\text{ K}$ . Assim,

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) \quad (1-23)$$

$$\Delta T(\text{R}) = \Delta T(^{\circ}\text{F}) \quad (1-24)$$

Algumas relações termodinâmicas envolvem a temperatura  $T$  e por vezes surge a questão das unidades K ou  $^{\circ}\text{C}$ . Se a relação envolve diferenças de temperatura (tal como  $a = b \Delta T$ ), não existe diferença nenhuma, e qualquer uma pode ser empregue. No entanto, se for o caso de valores de temperatura absoluta (como  $a = bT$ ), deve utilizar-se K. Quando em dúvida, é aconselhável utilizar K, pois quase não existem situações em que o uso desta unidade seja incorrecta, enquanto que o uso de  $^{\circ}\text{C}$  pode implicar um resultado erróneo.

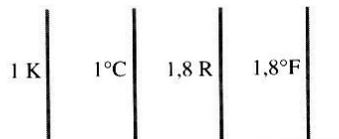


FIGURA 1-49

Comparação entre as magnitudes das várias unidades de temperatura.

### EXEMPLO 1-8 Expressão do incremento de temperatura nas diversas unidades

Durante um processo de aquecimento, a temperatura de um sistema aumenta em  $10^{\circ}\text{C}$ . Exprese este valor em K,  $^{\circ}\text{F}$  e R.

**Solução** Este problema trata de variações de temperatura que são idênticas nas escalas K e  $^{\circ}\text{C}$ . Então, da Equação 1-23,

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C}) = 10\text{ K}$$

A diferença de temperatura nas escalas Fahrenheit e Rankine também são idênticas e estão relacionadas com as variações nas escalas Celsius e Kelvin através das Equações 1-21 e 1-24:

$$\Delta T(\text{R}) = 1,8 \Delta T(\text{K}) = (1,8)(10) = 18 \text{ R}$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{F}) = \Delta T(\text{R}) = 18^{\circ} \text{ F}$$

## 1-11 ■ ASPECTOS TERMODINÂMICOS DE SISTEMAS BIOLÓGICOS

Uma área importante e interessante de aplicação da termodinâmica consiste nos sistemas biológicos, onde se verificam processos de transformação e transferência de energia bastante complexos e curiosos. Os sistemas biológicos não se encontram em equilíbrio termodinâmico, não sendo fácil a sua análise. Apesar da sua complexibilidade, são principalmente constituídos por quatro elementos básicos: hidrogénio, oxigénio, carbono e azoto. No corpo humano, estes elementos perfazem, respectivamente, 63, 25,5, 9,5 e 1,4% do total de átomos. Os restantes 0,6% são constituídos por 20 outros elementos essenciais para a vida. Em massa, cerca 62% do corpo humano é composto por água.

Os alicerces dos organismos vivos são as *células*, que se assemelham a fábricas miniaturizadas que desempenham funções vitais para a sobrevivência. Um sistema biológico pode ser tão simples como um organismo unicelular. O corpo humano contém aproximadamente 100 biliões de células com um diâmetro médio de 0,01 mm. As membranas que as constituem são paredes semipermeáveis que permitem a passagem de algumas substâncias enquanto que excluem outras.

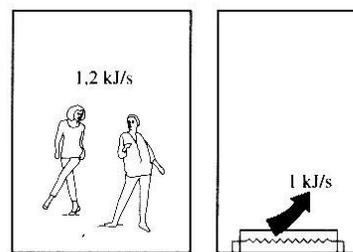
Numa célula típica, ocorrem milhares de reacções químicas em cada segundo durante o qual algumas moléculas são transformadas, libertando energia. Este elevado nível de actividade química, que mantém a temperatura do corpo humano a 37° C, denomina-se **metabolismo**. Em palavras simples, o metabolismo refere-se à queima dos alimentos como hidratos de carbono, gorduras e proteínas. A taxa de metabolismo numa condição de letargia denomina-se *taxa metabólica basal*, (ou, simplesmente, metabolismo basal) necessária para manter as funções (como respirar e circulação cardíaca) num estado de actividade exterior nulo. Esta taxa pode ser interpretada como a de consumo de energia do corpo. Para um homem comum (30 anos de idade, 70 kg e 1,8 m<sup>2</sup> de superfície de corpo), a taxa de metabolismo basal é de 84 W. Ou seja, o corpo dissipa energia para o ambiente a uma taxa de 84 W (joules por segundo), traduzido pela transformação da energia química dos alimentos (ou gordura armazenada) em energia térmica (Figura 1-50). O metabolismo aumenta com o nível de actividade, podendo ser 10 vezes superior à taxa basal durante a prática de exercício extenuante. Por exemplo, duas pessoas a realizarem esforço pesado num recinto podem estar a gerar mais calor que um aquecedor de 1 kW (Figura 1-51). A fracção de calor sensível varia de cerca de 40% para trabalho pesado até 70% para actividades leves. O restante é rejeitado pelo corpo através da transpiração, sob a forma de calor latente.

### Aspectos termodinâmicos de sistemas biológicos



**FIGURA 1-50**

Quando em repouso, um corpo humano dissipa 84 W de energia para o ambiente.



**FIGURA 1-51**

Dois pessoas a dançar fornecem mais energia para um recinto do que um aquecedor eléctrico de 1 kW.

O metabolismo basal varia consoante o sexo, a dimensão do corpo, as condições de saúde, etc., e decresce consideravelmente com a idade. Isto em parte explica a tendência de engordar aos vinte ou trinta anos, mesmo sem um aumento da quantidade de alimentos ingeridos. O cérebro e o fígado são os órgãos com maior actividade metabólica, sendo responsáveis por quase 50% do metabolismo basal num adulto, embora constituam apenas cerca de 4% da massa do corpo. Em crianças pequenas é de notar que cerca de metade do metabolismo basal ocorre no cérebro.

A taxa metabólica de um animal pode ser medida directamente (*calorimetria directa*) ou indirectamente (*calorimetria indirecta*). No primeiro caso, o animal é colocado numa caixa convenientemente isolada e munida de um sistema de circulação de água nas paredes. A energia metabólica libertada é transferida eventualmente para a água, e a taxa é determinada pelo acréscimo de temperatura durante o período de observação. Embora tenha um princípio simples, a calorimetria directa é uma prática difícil, sendo portanto todas as medições de metabolismo realizadas através do método indirecto, muito mais simples e com aproximadamente a mesma precisão.

Na calorimetria indirecta, a taxa de metabolismo é determinada pelo consumo de  $O_2$  e a produção de  $CO_2$ . A relação do número de moles de  $CO_2$  produzido em relação ao consumo de  $O_2$  denomina-se *quociente respiratório* (QR), e o seu valor depende do tipo de alimentos consumidos. Por exemplo,  $QR = 1,0$  para a glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) visto que o número de moles de  $O_2$  e  $CO_2$  produzidas é igual durante a sua oxidação. O QR é de 0,84 para as proteínas e 0,707 para as gorduras. Na prática, as proteínas de uma dieta são ignoradas no cálculo do metabolismo, sendo o erro desprezável, pois compõem uma pequena fracção da dieta. Sob condições basais, o RQ de um homem adulto comum é de 0,80, correspondendo a uma taxa de metabolismo de 20,1 kJ/l de  $O_2$  consumido. Então, uma boa estimativa do metabolismo basal médio pode ser realizada através da medição do volume de  $O_2$  consumido por unidade de tempo e multiplicando esse valor por 20,1 kJ/l  $O_2$ . Por exemplo, um adulto comum em repouso consome 0,250 l/min de  $O_2$ , que corresponde a uma taxa basal de 84 W. No caso de ausência de ingestão de alimentos, uma pessoa com fome consome as gorduras ou as proteínas do seu próprio corpo, sendo a taxa basal média de 21,3 kJ/l  $O_2$ .

As reacções biológicas nas células ocorrem essencialmente a uma temperatura, uma pressão e um volume constantes. A temperatura da célula tende a aumentar quando alguma energia química é convertida em calor, sendo rapidamente transferida para o sistema sanguíneo e eventualmente para o ambiente, através da pele.

As células musculares funcionam em tudo como um motor, convertendo energia química em mecânica (trabalho), com um rendimento de aproximadamente 20%. Quando um corpo não realiza qualquer trabalho na vizinhança (como transportar pelas escadas uma peça de mobiliário), todo o trabalho pode ser convertido em calor. Para este caso, toda a energia química libertada durante o metabolismo é eventualmente transferida para o ambiente. Um aparelho de televisão que consome 300 W de electricidade deve rejeitar os mesmos 300 W para o ambiente, independentemente do que se passa no seu interior. Ou seja,

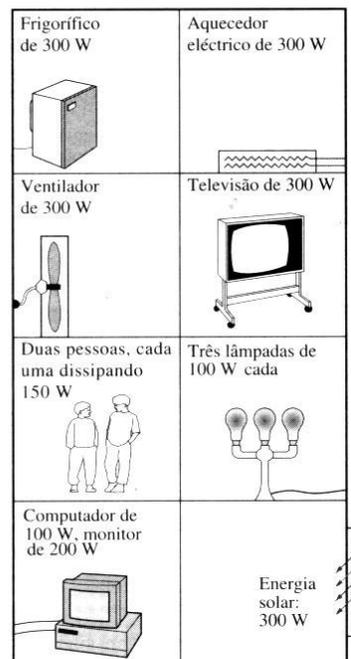
ligar-se um aparelho de televisão de 300 W, ou três lâmpadas de 100 W cada, terá o mesmo efeito que ligar um aquecedor com o mesmo valor (Figura 1-52). Esta é uma consequência do princípio de conservação da energia que estabelece que o consumo de energia por parte de um sistema deve ser idêntico ao seu débito quando o conteúdo de energia do sistema permanece constante durante o processo.

### Alimento e exercício

As necessidades energéticas do corpo humano são preenchidas pela ingestão de alimentos. Os nutrientes destes são distinguidos sob três grupos principais: hidratos de carbono, proteínas e gorduras. Os *hidratos de carbono* são caracterizados por possuir uma relação de 2:1 de átomos de hidrogénio e oxigénio nas suas moléculas. Estas podem ser muito simples (como no açúcar) ou complexas e longas (como no amido). O pão e o açúcar são as fontes principais de hidratos de carbono. As *proteínas* constituídas por moléculas grandes que contêm carbono, hidrogénio, oxigénio e azoto, são essenciais para a construção e reparação do corpo. As proteínas são constituídas por elementos básicos mais pequenos, denominados *aminoácidos*. As proteínas completas, tais como a carne, o leite e os ovos apresentam todos os aminoácidos necessários para a construção do corpo. As proteínas vegetais, encontradas nos frutos, nos legumes e nos cereais, denominam-se incompletas, pois faltam-lhes um ou mais aminoácidos. As *gorduras* são moléculas relativamente pequenas constituídas por carbono, oxigénio e hidrogénio, sendo os óleos vegetais e a gordura animal a maior fonte. A maioria dos alimentos contém os três grupos de nutrientes em variadas quantidades. Uma dieta típica de um indivíduo americano consiste em 45% de hidratos de carbono, 40% de gorduras e 15% de proteínas, embora seja recomendado que, numa dieta saudável, menos de 30% das calorias devem ser fornecidos por gordura.

O conteúdo de energia de um dado alimento é determinado pela queima de uma pequena amostra num interior de um dispositivo denominado *calorímetro de bomba*, sendo basicamente constituído por um reservatório rígido bem isolado (Figura 1-53). Este contém uma pequena câmara de combustão imersa em água. O alimento é queimado na câmara de combustão na presença de excesso de oxigénio, e a energia libertada é transferida para a água. O conteúdo energético do alimento é calculado com base no princípio de conservação de energia, medindo o aumento de temperatura da água. O carbono do alimento é transformado em  $\text{CO}_2$  e o hidrogénio em  $\text{H}_2\text{O}$ . Estas mesmas reacções químicas ocorrem no corpo, libertando a mesma quantidade de energia.

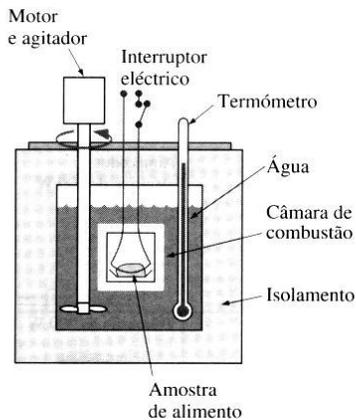
Utilizando amostras secas (sem água), o conteúdo de energia médio dos três grupos principais de alimentos é de 18,0 MJ/kg para os hidratos de carbono, 22,2 MJ/kg para as proteínas e 39,8 MJ/kg para as gorduras. Contudo, estes grupos de alimentos não são completamente metabolizados no corpo. A fracção do conteúdo de energia metabolizável é de 95,5% para os hidratos de carbono, 77,5% para as proteínas e 97,7% para as gorduras. Ou seja, as gorduras ingeridas são quase todas metabolizadas no corpo humano, mas perto de um



**FIGURA 1-52**

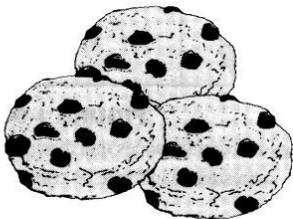
Algumas combinações que dissipam a mesma quantidade de energia.

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**



**FIGURA 1-53**

Esquema de um calorímetro utilizado para determinar o conteúdo de energia de alimentos.



3 bolachas (32 g)

Gordura: (8g)(9,3 Cal/g) = 74,4 Cal  
 Proteína: (2g)(4,1 Cal/g) = 8,2 Cal  
 Hidratos de carbono: (21 g)(4,1 Cal/g) = 86,1 Cal  
 Outros: (1g)(0 Cal/g) = 0

TOTAL (para 32 g): 169 Cal

**FIGURA 1-54**

Avaliação do conteúdo de calorias de 3 bolachas com chocolate (valores para bolachas "Chips Ahoy" da Nabisco).

quarto da proteína ingerida é rejeitada do corpo sem ser queimada. Isto corresponde a 4,1 Calorias/g, para proteínas e hidratos de carbono, e 9,3 Calorias/g, para gorduras (Figura 1-54), valores vistos vulgarmente em publicações sobre nutrição e nos rótulos de embalagens. O conteúdo de energia que normalmente se ingere é muito menor que os valores acima dados, devido ao elevado teor de água (esta aumenta a massa dos alimentos, não podendo ser metabolizada ou queimada, e não tendo portanto valor energético). Por exemplo, a maior parte dos vegetais, dos frutos ou da carne é constituída por água. O conteúdo de energia média metabolizável dos três grupos básicos é de 4,2 MJ/kg, para os hidratos de carbono, de 8,4 MJ/kg, para as proteínas, e de 33,1 MJ/kg, para as gorduras. 1 kg de gordura natural contém quase 8 vezes a energia metabolizável de 1 kg de hidratos de carbono naturais. Assim, um indivíduo que se alimenta com alimentos gordurosos consome muito mais energia do que se ingerisse hidratos de carbono, tais como pão ou arroz.

O conteúdo de energia metabolizável é geralmente expresso por nutricionistas em termos de *Calorias* capitalizáveis. Uma Caloria é equivalente a uma *quilocaloria* (1000 calorias), sendo equivalente a 4,1868 kJ. Ou seja,

$$1 \text{ Cal (Caloria)} = 1000 \text{ calorias} = 1 \text{ kcal (quilocaloria)} = 4,1868 \text{ kJ}$$

A notação de caloria pode causar confusão, pois nem sempre é seguida em tabelas ou artigos sobre nutrição. Quando o tópico se refere a alimentos ou a condições físicas, a caloria quer geralmente significar quilocaloria, capitalizável ou não.

A **necessidade diária de calorias** varia com a idade, o sexo, as condições físicas, o nível de actividade, o peso e outros factores. Para o mesmo sexo e idade, um indivíduo de constituição fraca necessita de menos calorias do que um indivíduo de constituição forte. Um homem comum necessita de cerca 2400 a 2700 Calorias por dia. Para o caso de uma mulher, este valor varia entre 1800 a 2200 Calorias. A necessidade diária é de cerca de 1600 para mulheres sedentárias e idosas, 2000 para homens sedentários e idosos, 2200 para a maior parte das crianças, mulheres jovens ou activas, 2800 para homens jovens, homens activos e mulheres muito activas e acima de 3000 para homens muito activos. O valor *médio* diário de ingestão energética é de aproximadamente de 2000 Calorias, sendo este valor calculado pela multiplicação do peso corporal em kg por 24, para indivíduos sedentários, por 29, para indivíduos relativamente activos, por 33, para o caso de se exercer trabalho físico ou actividade física moderada, e, por 40, para indivíduos que tenham uma actividade extenuante ou realizem trabalhos pesados. As calorias ingeridas em excesso são geralmente armazenadas no corpo sob a forma de gordura, servindo como reserva para os casos em que a alimentação não é suficiente.

Tal como qualquer outra gordura natural, 1 kg de gordura de um corpo humano contém cerca de 33,1 MJ de energia metabolizável. Assim, uma pessoa sem se alimentar (ingestão nula de energia), que necessite de 2000 Calorias (9211 kJ) por dia, pode cumprir esta exigência através da utilização de apenas  $9211/33100 = 0,28$  kg da sua gordura armazenada. Portanto, é eventualmente possível sobreviver sem se alimentar durante 100 dias. (Necessita-se, no entanto, de beber água para compensar a perda através da respiração e da transpiração,

evitando a desidratação que pode ocorrer em alguns dias.) Embora haja pessoas que desejam fortemente perder peso, a fome não é recomendada, porque o corpo inicia o consumo de massa muscular além de gordura. Uma dieta saudável deve ser acompanhada de exercício regular permitindo uma ingestão de calorias razoável.

O conteúdo metabolizável de alguns alimentos e a energia consumida durante certas actividades são dados nas Tabelas 1-3 e 1-4. Tendo em conta que não existem duas pessoas nem dois alimentos iguais, os valores apresentados são generalizados e indicativos, existindo a possibilidade de encontrar dados diferentes em outras publicações.

As taxas de consumo de energia listadas na Tabela 1-4 referem-se a um indivíduo adulto de 68 kg. A energia consumida por indivíduos diferentes pode ser determinada utilizando um factor de proporcionalidade que relaciona o metabolismo e o tamanho do corpo. Por exemplo, a taxa de energia consumida por um ciclista de 68 kg é, segundo a Tabela 1-4, de 639 Calorias/h. Para o caso de um outro ciclista, mas com 50 kg, tem-se

$$(50 \text{ kg}) \frac{639 \text{ Cal/h}}{68 \text{ kg}} = 470 \text{ Cal/h}$$

Para um indivíduo de 100 kg, este valor seria de 960 Cal/h.

A análise termodinâmica de um corpo humano é bastante complicada, pois envolve transferência tanto de massa (durante a respiração, na transpiração, etc.) como de energia. Assim, o corpo deveria ser encarado como um sistema aberto. Mas a quantificação da transferência de energia contida na massa é um processo difícil, optando-se por vezes pela modelação como um sistema fechado, considerando a energia contida na massa apenas como energia. Por exemplo, a alimentação é modelada como a transferência da energia metabolizável contida na massa do alimento.

### EXEMPLO 1-9 Queima das calorias ingeridas numa refeição

Um homem de 90 kg ingeriu ao almoço dois hambúrgueres, um pacote médio de batatas fritas e 200 ml de refrigerante (Figura 1-55). Determine quanto demorará a consumir as calorias ingeridas se (a) passar o tempo a ver televisão ou (b) a praticar natação. Qual seria a sua resposta para um indivíduo de 45 kg?

**Solução** (a) Considera-se o corpo humano como o sistema, sendo tratado como fechado, cujo conteúdo de energia durante o processo é constante. Assim, segundo o princípio de conservação de energia, a energia admitida deverá ser igual à rejeitada. O balanço de energia admitida representa o conteúdo de energia metabolizável da refeição ingerida. Este é determinado através da Tabela 1-3:

$$\begin{aligned} E_{\text{adm}} &= 2 \times E_{\text{hamb}} + E_{\text{batatas}} + E_{\text{refrigerante}} \\ &= 2 \times 275 + 250 + 87 \\ &= 887 \text{ Cal} \end{aligned}$$

Então,  $E_{\text{sai}} = E_{\text{adm}} = 887$  Calorias. A taxa de energia rejeitada por um homem de 68 kg a ver televisão é dada pela Tabela 1-4 como sendo de 72 Calorias/h. Para o caso de um indivíduo de 90 kg, tem-se

$$\dot{E}_{\text{sai}} = (90 \text{ kg}) \frac{72 \text{ Cal/h}}{68 \text{ kg}} = 95,3 \text{ Cal/h}$$

**TABELA 1-3**

Energia metabolizável aproximada  
de alguns alimentos comuns  
(1 Caloria = 4,1868 kJ)

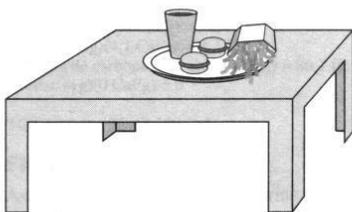
Alimento	Calorias
Maçã (média)	70
Batata assada (simples)	250
Batata assada com queijo	550
Pão (de trigo, uma fatia)	70
Manteiga (uma colher de chá)	35
Hambúrguer de queijo	325
Chocolate (20 g)	105
Refrigerante (200 ml)	87
Ovo	80
Sanduíche de peixe	450
Batatas fritas	250
Hambúrguer	275
Cachorro quente	300
Gelado (100 ml, 10% gordura)	110
Salada de alface temperada com azeite e vinagre	150
Leite magro (200 ml)	76
Leite gordo (200 ml)	136
Pêssego (médio)	65
Tarte (1 fatia)	300
Piza (1 fatia grande, com queijo)	350

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**

**TABELA 1-4**

**Consumo de energia aproximado de um indivíduo de 68 kg durante certo tipo de actividades (1 Cal = 4,1868 kJ)**

Actividade	Cal/h
Metabolismo basal	72
Basquetebol	550
Ciclismo (21 km/h)	639
Esqui de fundo (13 km/h)	936
Conduzir	180
Comer	99
Dançar	600
Correr (13 km/h)	936
Correr (8 km/h)	540
Nadar (rápido)	860
Nadar (lento)	288
Tênis (avançado)	480
Tênis (iniciado)	288
Caminhar (7,2 km/h)	432
Ver televisão	72



**FIGURA 1-55**

Um almoço típico como o do Exemplo 1-9.

Portanto, demorará

$$\Delta t = \frac{887 \text{ Cal}}{95,3 \text{ Cal/h}} = 9,3 \text{ h}$$

para queimar as calorias ingeridas durante a refeição a ver televisão.

(b) Com base em cálculos idênticos, demorará apenas **47 min** para queimar as calorias ingeridas através da natação.

Um homem de 45 kg apresenta metade da dimensão de um de 90 kg. Portanto, a queima da mesma quantidade de energia demorará o dobro do tempo para cada caso: **18,6 h** a ver televisão e **94 min** a praticar natação.

A maioria das dietas são baseadas na *contagem de calorias*; ou seja, no princípio de conservação de energia: um indivíduo que consome mais calorias do que as que o seu corpo queima irá ganhar peso, enquanto que o contrário implicará uma perda de peso. Porém, pessoas que comem o que quer que seja a qualquer altura sem aumentar o seu peso são prova de que somente a técnica de contagem de calorias não é suficiente em dietética. Obviamente que a dietética não é unicamente composta pela técnica anterior. Deve-se frisar que as frases *perda e ganho de peso* são incorrectas. Um astronauta no espaço perde todo o seu peso mantendo no entanto a sua massa inalterada. Os termos correctos deveriam ser perda e ganho de massa. Em dietética e forma física, o *peso* traduz-se por *massa*, empregando as unidades desta última.

Os investigadores da nutrição têm proposto diversas teorias sobre dietética. Um delas sugere que alguns indivíduos possuem corpos eficientes do ponto de vista dietético. Para a mesma actividade, estes precisam de menos calorias tal como um automóvel de elevado rendimento necessita de menos gasolina para percorrer uma dada distância. É caricato o facto de se pretender um elevado rendimento dos automóveis enquanto que se aspira a possuir o contrário no corpo humano. Um factor que ilude os nutricionistas é o facto de o corpo humano interpretar uma dieta como *escassez*, processando as reservas de forma mais racional. A passagem de uma dieta de 2000 Calorias para uma de 800, sem exercício, provoca a redução do metabolismo basal em 10 a 20%. O prolongamento desta dieta sem a realização de exercício físico traduz-se numa perda de tecido muscular e de gordura, embora a taxa de metabolismo retorne ao normal, uma vez cessada a dieta. Com menos massa muscular para queimar calorias, a taxa metabólica diminui e permanece abaixo do valor normal, mesmo após a retoma dos hábitos alimentares anteriores. Como resultado, o indivíduo ganha o peso perdido sob a forma de gordura e ainda uma quantidade adicional. O metabolismo basal mantém-se aproximadamente o mesmo em indivíduos que praticam exercício, à medida que fazem dieta.

O exercício físico moderado regular faz parte de qualquer programa saudável de dieta: constrói ou mantém o tecido muscular que permite queimar calorias mais rapidamente. É interessante o facto de o exercício aeróbico permitir a queima de calorias durante várias horas após ter efectuado o treino, elevando consideravelmente a taxa de metabolismo global.

Outra teoria estabelece que indivíduos que possuem *demasiadas células de gordura* geradas durante a infância ou adolescência, apresentam maior tendência para engordar. Algumas pessoas acreditam que o conteúdo de gordura

dos corpos é controlado através do despoletar de um mecanismo de controlo de gordura, em tudo semelhante ao controlo termostático da temperatura de uma residência.

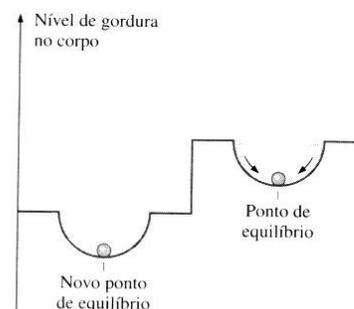
Algumas pessoas culpam os *genes* pelos problemas de peso. Considerando que 80 % das crianças, cujos pais apresentam excesso de peso, possuem também problemas deste tipo, a hereditariedade pode realmente ter efeito na forma como um corpo armazena gordura. Investigadores das Universidades de Washington e de Rockefeller identificaram um gene, denominado RIIbeta, que controla, aparentemente, o metabolismo. O corpo tenta manter o seu teor de gordura a um dado nível chamado **ponto de equilíbrio**, sendo diferente para cada indivíduo (Figura 1-56). Isto é realizado pela queima *mais* ou *menos rápida* de calorias, consoante a situação de ganho ou de perda de peso, através da variação do metabolismo. Assim, uma pessoa que emagreceu recentemente irá queimar calorias a uma taxa inferior à de uma outra que sempre o foi. Este facto não é aparentemente alterado pela prática de exercício. De forma a que a pessoa que emagreceu mantenha o seu novo peso, deverá consumir apenas as calorias que irá queimar. Note-se que, em pessoas com elevadas taxas de metabolismo, o corpo rejeita as calorias sob a forma de calor, em vez de as armazenar como gordura, não violando o princípio de conservação da energia.

Pensa-se que em algumas pessoas existe uma *falha genética* responsável pelo metabolismo extremamente baixo. Diversos estudos concluíram que a perda de peso nestas pessoas é praticamente impossível, podendo-se dizer que a obesidade é um fenómeno biológico. Portanto, essas pessoas devem comer pouco, de forma a manter o peso e conformar-se com o facto de nunca poderem comer «normalmente». Na maior parte dos casos, os factores genéticos determinam a gama de pesos normal, podendo um indivíduo situar-se num dos extremos, consoante os hábitos alimentares e o exercício físico. Este facto explica a desigualdade existente entre alguns gémeos idênticos que apresentam pesos diferentes. Crê-se que o *desequilíbrio hormonal* é também responsável pelo ganho e perda de peso excessivos.

Com base na sua experiência, o primeiro autor deste livro desenvolveu uma dieta, denominada «*dieta racional*», que consiste em duas regras simples: (1) não se deve comer, a menos que se tenha fome, e (2) pára-se de comer, antes de estar cheio. Por outras palavras, deve ter-se em conta a *vontade do nosso corpo, e não o contrariar*. Não espere ver esta proposta não científica publicitada em qualquer lado, pois não existe nada para vender e portanto nada a ganhar. Esta dieta não é tão fácil como aparenta, visto que a alimentação é o centro de muitas actividades sociais de entretenimento, tornando o comer e beber bem um sinónimo de uma boa vida. Porém, é bom saber que o corpo humano permite alguns excessos ocasionalmente.

As discussões acima sugerem que a primeira lei da termodinâmica não permite a visualização completa dos processos de conversão de energia, sendo necessário outro princípio fundamental para a complementar. Este princípio é a segunda lei que será estudada em capítulos subsequentes.

A *obesidade* está ligada a uma série de complicações de saúde, tais como tensão arterial elevada ou algumas formas de cancro, especialmente em pessoas com problemas relacionados com diabetes, hipertensão e doenças cardíacas. Como tal, as pessoas questionam se o seu peso está dentro da tolerância. A resposta a esta questão não é universal, mas no caso de não conseguir ver os seus



**FIGURA 1-56**

O corpo tende a manter um nível de gordura num *ponto de equilíbrio*, acelerando o metabolismo quando se come de mais e reduzindo-o quando se passa fome.

**CAPÍTULO 1**  
**Conceitos básicos**  
**de termodinâmica**

**TABELA 1-5**

Intervalo de peso saudável de adultos em função da altura

(Fonte: National Institute of Health)

Unidades inglesas		Unidades internacionais	
Altura (in)	Peso (lbm)	Altura (m)*	Peso (kg)*
58	91-119	1,45	40-53
60	97-127	1,50	43-56
62	103-136	1,55	46-60
64	111-146	1,60	49-64
66	118-156	1,65	52-68
68	125-165	1,70	55-72
70	133-175	1,75	58-77
72	140-185	1,80	62-81
74	148-195	1,85	65-86
76	156-205	1,90	69-90

\* Os limites superior e inferior correspondem a índices de massa corporal de 19 e 25, respectivamente.



**FIGURA 1-57**

Esquema para o Exemplo 1-10.

dedos dos pés ou apresentar «pneus», pode concluir que passou das medidas. Por outro lado, existem pessoas obcecadas com o factor peso, tentando emagrecer, embora estejam já abaixo do valor normal. Portanto, é importante estabelecer um critério científico para determinar a condição física. A gama de pesos para adultos saudáveis é geralmente expressa em termos do **índice de massa corporal (IMC)**, definido em unidades SI por

$$IMC = \frac{M(\text{kg})}{H^2(\text{m}^2)} \quad \text{com} \quad 19 \leq IMC \quad \begin{cases} < 19 \text{ abaixo do peso} \\ \leq 25 \text{ peso correcto} \\ > 25 \text{ acima do peso} \end{cases} \quad (1-25)$$

em que  $M$  representa a massa e  $H$  a altura. Portanto, um IMC de 25 é o limite superior do peso recomendado para uma pessoa saudável e um indivíduo com um IMC de 27 encontra-se com 8 % de excesso de peso. A expressão anterior é equivalente, em unidades inglesas, a  $IMC = 705 M/H^2$ , em que  $M$  é expresso em libras, e  $H$  em polegadas. A gama de pesos recomendados para adultos é apresentada na Tabela 1-5 tanto em unidades SI como inglesas.

**EXEMPLO 1-10 Perda de peso através da mudança para batatas fritas sem gordura**

A falsa gordura olestra passa pelo corpo sem ser digerida, não adicionando calorias à dieta. Embora a comida cozinhada com olestra tenha bom sabor, pode provocar desconforto abdominal e os seus efeitos a longo prazo são desconhecidos. Uma doze média de 1 oz (28,3 g) de batatas fritas normais contém 10 g de gordura e 150 Cal, enquanto que a mesma dose de batatas fritas com olestra contém apenas 75 Calorias. Considere uma pessoa que consome uma dose média de batatas fritas todos os dias ao almoço, mantendo o seu peso constante. Determine a perda de peso que esta pessoa irá apresentar por ano se mudar para as batatas fritas sem gordura (Figura 1-57).

**Solução** A pessoa que mude para as batatas fritas sem gordura irá consumir por dia menos 75 Cal. Então, a redução anual é de

$$E_{\text{reduzida}} = (75 \text{ Cal/dia})(365 \text{ dias/ano}) = 27\,375 \text{ Cal/ano}$$

O conteúdo de energia metabolizável de 1 kg de gordura do corpo é de 33 100 kJ. Portanto, assumindo que a deficiência na ingestão de calorias é compensado, pelo consumo da gordura armazenada no corpo, a pessoa que mude para as batatas fritas sem gordura irá perder

$$m_{\text{gordura}} = \frac{E_{\text{reduzida}}}{\text{Conteúdo de energia da gordura}} = \frac{27\,375 \text{ Cal}}{33\,100 \text{ kJ/kg}} = \left( \frac{4,1686 \text{ kJ}}{1 \text{ Cal}} \right) = 3,46 \text{ kg}$$

de gordura corporal nesse ano.

**1-12 ■ SUMÁRIO**

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os conceitos básicos da termodinâmica. A *termodinâmica* é uma ciência que trata principalmente da energia. A *primeira lei da termodinâmica* é uma expressão do princípio

de conservação da *energia* e estabelece que esta é uma propriedade termodinâmica. A *segunda lei da termodinâmica* estabelece que a energia tem *qualidade* e *quantidade* e que os processos reais ocorrem na direcção do decréscimo de qualidade da energia.

Um sistema com massa fixa denomina-se *sistema fechado* ou *massa de controlo*, enquanto que um sistema que permita a transferência de massa através das suas fronteiras chama-se *sistema aberto* ou *volume de controlo*. As propriedades que dependem da massa de um sistema chamam-se *propriedades extensivas*, sendo as outras *propriedades intensivas*. A massa volúmica é a massa por unidade de volume, e o volume específico equivale ao volume por unidade de massa.

A soma de todas as formas de energia de um sistema denomina-se *energia total*, que consiste na energia interna, cinética e potencial. A *energia interna* representa a energia molecular de um sistema e pode existir sob a forma sensível, latente, química e nuclear.

Diz-se que um sistema está em *equilíbrio termodinâmico* se este mantém o equilíbrio térmico, mecânico, de fase e químico. Qualquer alteração de um estado para outro denomina-se *processo*. Um processo com início e fim idênticos denomina-se *ciclo*. Durante um processo *quase-estático* ou de *quase-equilíbrio*, um sistema permanece praticamente em equilíbrio durante todo o tempo. O estado de um sistema compressível simples é completamente definido por duas propriedades intensivas independentes.

A *pressão* define-se como a força dividida pela unidade de área, e a sua unidade é o pascal. A pressão absoluta, manométrica e a depressão são relacionadas por

$$\begin{aligned} P_{\text{manométrica}} &= P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}} \text{ (kPa)} \\ P_{\text{depressão}} &= P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}} \text{ (kPa)} \end{aligned}$$

Diferenças de pressão pequenas ou moderadas são medidas através de um *manómetro*, em que um diferencial de altura do fluido  $h$  corresponde a uma diferença de pressão de

$$\Delta P = \rho gh \text{ (kPa)}$$

em que  $\rho$  é a massa volúmica do fluido e  $g$  a aceleração da gravidade no local. A pressão atmosférica é medida por um *barómetro* e é determinada por

$$P_{\text{atm}} = \rho gh \text{ (kPa)}$$

em que  $h$  representa a altura da coluna de líquido medida acima da superfície livre.

A *lei zero da termodinâmica* estabelece que dois corpos estão em equilíbrio térmico se ambos têm a mesma temperatura, mesmo não estando em contacto.

As escalas de temperatura presentemente utilizadas no SI e no sistema inglês são a *escala Celsius* e a *escala Fahrenheit*, respectivamente. A escala de temperatura absoluta do SI é a *escala Kelvin* que se relaciona com a *Celsius* por

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

No sistema inglês, a escala de temperatura absoluta é a *escala Rankine* que se relaciona com a *Fahrenheit* por

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

As magnitudes de cada divisão de 1 K e 1° C são idênticas, o mesmo acontecendo com as divisões de 1 R e 1° F. Assim,

$$\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C})$$

e

$$\Delta T(\text{R}) = \Delta T(^{\circ}\text{F})$$

O sistema biológico é uma área importante da aplicação da termodinâmica. A maior parte das dietas são baseadas no princípio de conservação da energia: a energia ganha por um indivíduo sob a forma de gordura é igual à diferença entre a energia que ingeriu através do alimento e a energia despendida em exercício físico.

## REFERÊNCIAS E SUGESTÕES DE LEITURA

1. American Society for Testing and Materials. *Standards for Metric Practice*. ASTM E 380-79, January 1980.
2. R. T. Balmer. *Thermodynamics*. St. Paul, MN: West Publishing, 1990.
3. A. Bejan. *Advanced Engineering Thermodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1988.
4. W. Z. Black and J. G. Hartley. *Thermodynamics*. New York: Harper and Row, 1986.
5. M. Snowman. *Food and Fitness*. Syracuse, New York: New Readers Press, 1986.
6. G. J. Van Wylen and R. E. Sonntag. *Fundamentals of Classical Thermodynamics*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.
7. K. Wark. *Thermodynamics*. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

## EXERCÍCIOS

### Termodinâmica e energia

**1-1C\*** Qual a diferença entre as abordagens clássica e estatística da termodinâmica?

**1-2C** Porque é que um ciclista ganha velocidade numa descida, mesmo que não esteja a pedalar? Isto viola o princípio de conservação de energia?

**1-3C** Um empregado de escritório afirma que uma caneca de café fria colocada na sua mesa aqueceu até atingir 80° C por absorver energia do ar ambiente que estava a 25° C. Existe alguma verdade nesta afirmação? Este processo viola alguma lei da termodinâmica?

**1-4C** Um indivíduo afirma que o simples facto de beber água lhe provoca um aumento de peso. Comente esta afirmação.

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

**Massa, força e aceleração**

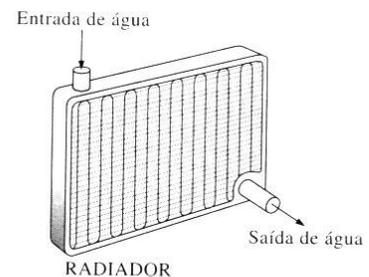
- 1-5C** Qual a diferença entre libra massa e libra força?
- 1-6C** Qual a força resultante que actua num automóvel que circula a uma velocidade constante de 70 km/h (a) numa estrada plana e (b) numa subida?
- 1-7** Um reservatório de plástico de 3 kg, com um volume de  $0,2 \text{ m}^3$ , está repleto de água. Considerando a massa volúmica da água de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , determine o peso do conjunto.
- 1-8** Determine a massa e o peso do ar contido num recinto cujas dimensões são de  $6 \times 6 \times 8 \text{ m}$ . Admita que a massa volúmica do ar é de  $1,16 \text{ kg/m}^3$ .  
*Solução:* 334,1 kg, 3277 N.
- 1-9** A  $45^\circ$  de latitude, a aceleração da gravidade em função da altitude  $z$  é dada por  $g = a - bz$  em que  $a = 9,807 \text{ m/s}^2$  e  $b = 3,32 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2}$ . Determine a altura medida a partir do nível do mar onde o peso de um corpo decresça em 1%.  
*Solução:* 29 539 m.
- 1-10E\*** Um astronauta de 150 lbm que pesa 145 lbf na Terra levou a sua balança de casa de banho (balança de mola) e uma balança de fiel (compara massas) até à Lua onde a aceleração da gravidade local é de  $g = 5,48 \text{ ft/s}^2$ . Determine quanto ele irá pesar (a) na sua balança de casa de banho e (b) na balança de fiel.  
*Solução:* (a) 25,5 lbf; (b) 150 lbf.
- 1-11** A aceleração de aviões de alta velocidade é por vezes expressa em  $g$  (múltiplos da aceleração da gravidade padrão). Determine a força resultante vertical, em N, a que uma homem de 70 kg estaria sujeito num avião cuja aceleração é de 6  $g$ .



- 1-12** Uma pedra de 5 kg é atirada na vertical, com uma força de 150 N, num local em que a aceleração da gravidade é de  $9,79 \text{ m/s}^2$ . Determine o valor da aceleração da pedra em  $\text{m/s}^2$ .
- 1-13** O valor da aceleração da gravidade  $g$  diminui com a altitude desde  $9,807 \text{ m/s}^2$  ao nível do mar até  $9,4175 \text{ m/s}^2$  a uma altitude de 13 000 m, onde voam os aviões comerciais. Determine a percentagem de redução do peso do avião, em relação ao valor do nível do mar.

**Formas de energia, sistemas, estados e propriedades**

- 1-14C** A maior parte da energia gerada num motor de um automóvel é rejeitada para o ar pelo radiador através da água de arrefecimento. Deveria o radiador ser analisado como um sistema aberto ou fechado. Justifique.
- 1-15C** Uma lata de refrigerante à temperatura ambiente é colocada num frigorífico, de forma a que arrefeça. Encararia a lata como um sistema aberto ou fechado? Justifique.
- 1-16C** Utilizam-se vulgarmente aquecedores eléctricos portáteis para o aquecimento doméstico. Explique as transformações de energia que se verificam neste processo de aquecimento?

**FIGURA P1-14C**

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

- 1-17C** Considere o processo de aquecimento de água num fogão. Quais as formas de energia envolvidas no processo? Quais as transformações energéticas que se verificam?
- 1-18C** Qual a diferença entre formas de energia microscópicas e macroscópicas.
- 1-19C** O que entende por energia total? Identifique as diversas formas de energia que a compõem.
- 1-20C** Enumere as formas de energia que contribuem para a energia interna de um sistema.
- 1-21C** Como se relacionam entre si calor, energia interna e energia térmica?
- 1-22C** Qual a diferença entre propriedades intensivas e extensivas?
- 1-23C** Para um sistema estar em equilíbrio termodinâmico, a temperatura e a pressão devem ser as mesmas em todos os pontos?
- 1-24C** O que entende por um processo de quase-equilíbrio? Qual a sua importância na engenharia?
- 1-25C** Defina processo isotérmico, isobárico e isocórico.
- 1-26C** O que entende por postulado de estado?
- 1-27C** O estado do ar num recinto está completamente definido através da temperatura e da pressão? Justifique.
- 1-28** Considere uma central nuclear que produz 1000 MW de potência e apresenta um rendimento de conversão de 30% (ou seja, para cada unidade de energia de combustível utilizado, a central produz 0,3 unidades de energia eléctrica). Assumindo um funcionamento contínuo, determine a quantidade de combustível nuclear consumido durante um ano.
- 1-29** Repita o exercício anterior para uma central térmica a carvão cujo poder calorífico inferior é de 28 000 kJ/kg.
- 1-30** Quando se queimam hidrocarbonetos (um tipo de combustível), a maior parte do carbono é totalmente queimado, formando  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono), que aparentemente é o gás causador do efeito de estufa e das alterações climáticas. Em média, produzem-se 0,59 kg de  $\text{CO}_2$  por kWh de electricidade produzida numa central que queima gás natural (um hidrocarboneto). Um frigorífico doméstico consome cerca de 700 kWh de electricidade por ano. Determine a quantidade de  $\text{CO}_2$  produzida devido somente aos frigoríficos de uma cidade com 200 000 fogos.
- 1-31** Repita o exercício anterior, assumindo que a electricidade é produzida numa central térmica a carvão. A produção média de  $\text{CO}_2$  para este caso é de 1,1 kg por kWh.
- 1-32E** Considere um lar que utiliza 8000 kWh de electricidade por ano e consome 1500 gal de gasóleo durante o tempo frio. A quantidade média de  $\text{CO}_2$  produzida é de 26,4 lbm/gal de gasóleo e 1,54 lbm/kWh de electricidade. Se este lar reduzir o consumo de combustível e de electricidade em 20%, através da implementação de medidas de conservação de energia, determine a redução de emissões de  $\text{CO}_2$  por ano.

**1-33** Um automóvel vulgar conduzido 12 000 milhas por ano liberta para a atmosfera cerca de 11 kg de  $\text{NO}_x$  (óxidos de azoto) que causam *smog* em zonas poluídas. O gás natural queimado numa caldeira emite cerca de 4,3 g de  $\text{NO}_x$  por termia e as centrais geradoras de electricidade emitem cerca de 7,1 g de  $\text{NO}_x$  por kWh de electricidade produzida. Considere um lar que tem 2 automóveis e consome 9000 kWh de electricidade e 1200 termias de gás natural. Determine a quantidade de  $\text{NO}_x$  emitido para a atmosfera por ano devido a este lar.

### Pressão

**1-34C** Qual a diferença entre pressão manométrica e absoluta?

**1-35C** Explique porque é que certas pessoas sofrem de hemorragias nasais e outras insuficiências respiratórias a altitudes elevadas.

**1-36** Um manómetro de vácuo ligado a um reservatório lê um valor de 30 kPa num local onde a pressão barométrica é de 755 mmHg. Determine a pressão absoluta no interior do reservatório. Utilize  $\rho_{\text{Hg}} = 13\,590 \text{ kg/m}^3$ .

*Solução:* 70,6 kPa.

**1-37E** Um manómetro ligado a um reservatório sob pressão indica o valor de 50 psia num local em que a pressão barométrica é de 29,1 inHg. Determine a pressão absoluta no interior do reservatório. Utilize  $\rho_{\text{Hg}} = 848,4 \text{ lbf/ft}^3$ .

*Solução:* 64,29 psia.

**1-38** Um manómetro de pressão ligado a um reservatório indica 500 kPa num local onde a pressão atmosférica é de 94 kPa. Determine a pressão absoluta no reservatório.

**1-39** Um barómetro de um alpinista indica 930 mbar no início de uma escalada e 780 mbar no final. Desprezando o efeito da altitude na aceleração gravítica local, determine a distância percorrida na vertical. Assuma que a massa volúmica média do ar é de  $1,20 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9,7 \text{ m/s}^2$ .

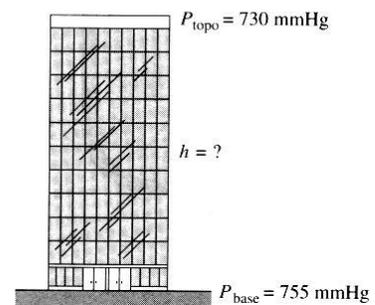
*Solução:* 1289 m.

**1-40** Um barómetro básico pode ser utilizado para medir a altura de um edifício. Se as leituras no topo e na base forem de 730 e 755 mm<sub>Hg</sub>, respectivamente, determine a altura do edifício. Assuma uma massa volúmica média do ar de  $1,18 \text{ kg/m}^3$ .

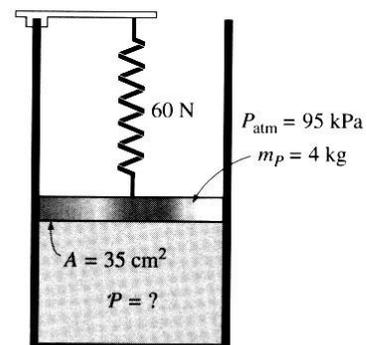
**1-41** Determine a pressão exercida sobre um mergulhador a 30 metros de profundidade. Assuma uma pressão barométrica de 101 kPa e uma densidade específica da água do mar de 1,03. *Solução:* 404,0 kPa.

**1-42E** Determine a pressão exercida na superfície de um submarino que se desloca a 300 pés abaixo da superfície livre da água. Admita uma pressão barométrica de 14,7 psia e uma densidade da água do mar de 1,03.

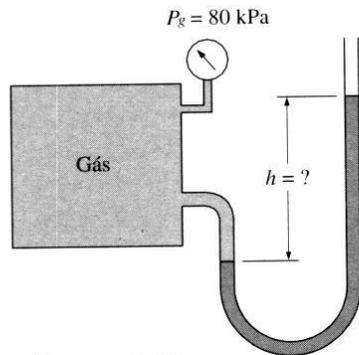
**1-43** Num dispositivo cilindro-êmbolo está contido gás. O êmbolo tem uma massa de 4 kg e uma superfície de  $35 \text{ cm}^2$ . Uma mola comprimida sobre o êmbolo exerce sobre este uma força de 60 N. Se a pressão atmosférica for de 95 kPa, determine a pressão no interior do cilindro. *Solução:* 123,4 kPa.



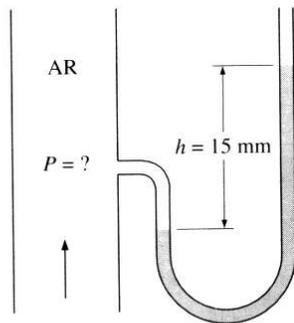
**FIGURA P1-40**



**FIGURA P1-43**



**FIGURA P1-44**



**FIGURA P1-46**

**1-44** Dois manômetros, um de tubo em U e outro do tipo Bourdon, estão ligados a um reservatório para medir a pressão. Sabendo que o de Bourdon indica 80 kPa, determine a diferença de altura no de tubo em U, se o fluido for (a) mercúrio ( $\rho = 13\,600\text{ kg/m}^3$ ) ou (b) água ( $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ ).

**1-45** Um manômetro contendo óleo ( $\rho = 850\text{ kg/m}^3$ ) está ligado a um reservatório com ar. Se a diferença de nível de óleo entre duas colunas for de 45 cm e a pressão atmosférica for de 98 kPa, determine a pressão absoluta do ar contido no reservatório. *Solução:* 101,75 kPa.

**1-46** Um manômetro de mercúrio ( $\rho = 13\,600\text{ kg/m}^3$ ) está ligado a uma conduta de ar de forma a medir a pressão no interior desta. A diferença de níveis no aparelho é de 15 mm e a pressão atmosférica é de 100 kPa.

(a) Pela observação da Figura P1-46, determine se a pressão no interior da conduta está acima ou abaixo da atmosférica.

(b) Determine a pressão absoluta na conduta.

### Temperatura

**1-47C** Enuncie a lei zero da termodinâmica.

**1-48C** Quais são as escalas ordinárias e absolutas de temperatura do SI e do Sistema Inglês?

**1-49C** Considere um termómetro de álcool e outro de mercúrio que lêem exactamente  $0^\circ\text{C}$  no ponto de gelo e  $100^\circ\text{C}$  no de vapor. A distância entre os dois pontos está dividida em 100 partes iguais em ambos os termómetros. Acha que ambos os termómetros irão dar a mesma leitura para uma temperatura de  $60^\circ\text{C}$ ? Justifique.

**1-50C** A temperatura no interior de um corpo humano saudável é de  $37^\circ\text{C}$ . Qual o valor correspondente em kelvins? *Solução:* 310 K.

**1-51E** Considere um sistema cuja temperatura é de  $18^\circ\text{C}$ . Expresse este valor em R, K e  $^\circ\text{F}$ .

**1-52** A temperatura de um sistema aumenta em  $30^\circ\text{C}$  durante um processo de aquecimento. Expresse este aumento em kelvins. *Solução:* 30 K.

**1-53E** A temperatura de um sistema desce em  $27^\circ\text{F}$  durante um processo de arrefecimento. Expresse este valor em R, K e  $^\circ\text{C}$ .

**1-54** Considere dois sistemas fechados A e B. O primeiro contém 2000 kJ de energia térmica a  $20^\circ\text{C}$ , enquanto que o sistema B contém 200 kJ a  $50^\circ\text{C}$ . Os sistemas são mantidos em contacto um com o outro. Determine a direcção de qualquer transferência de calor entre os dois sistemas.

**Sistemas biológicos**

**1-55C** O que entende por metabolismo? O que representa o metabolismo basal? Qual o valor médio deste para um homem médio?

**1-56C** Diga para que se destina a energia libertada durante o metabolismo do corpo humano.

**1-57C** O conteúdo de energia metabolizável de um alimento é igual à energia libertada quando este é queimado num calorímetro de bomba? Se a resposta for negativa, como difere?

**1-58C** No projecto de sistemas de ar condicionado o número previsto de ocupantes de um recinto é um factor importante? Justifique.

**1-59C** O que pensa de uma dieta que permite quantidades generosas de pão e arroz mas sem a adição de manteiga ou margarina?

**1-60** Considere dois recintos idênticos, um munido de um aquecedor eléctrico de 2 kW, e o outro com três pares a dançar rapidamente. Em qual dos recintos a temperatura irá aumentar mais depressa?

**1-61** Considere dois homens de 80 kg idênticos que ingerem refeições idênticas e possuem hábitos semelhantes, com excepção de que um deles corre todos os dias durante 30 min, enquanto que o outro fica a ver televisão. Determine a diferença de peso entre eles no espaço de um mês. *Solução:* 1,045 kg.

**1-62** Considere uma sala de aulas que perde calor para o exterior, à taxa de 20 000 kJ/h. Sabendo que existem 30 estudantes no interior, cada um dissipando calor sensível à taxa de 100 W, determine se é necessário ligar um aquecedor, de modo a manter a temperatura.

**1-63** Uma mulher de 68 kg planeia andar de bicicleta durante uma hora. Determine quantas barras de chocolate de 30 g deverá ingerir, de forma a satisfazer o dispêndio de energia devido ao andar de bicicleta?

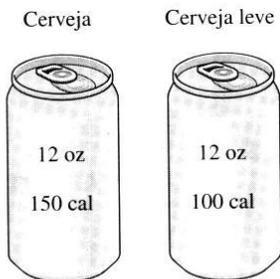
**1-64** Um homem de 55 kg cede à tentação, e ingere uma embalagem inteira de 1 kg de gelado. Quanto tempo deverá este homem correr de forma a queimar as calorias do gelado? *Solução:* 2,52 h.

**1-65** Considere um homem que tem 20 kg de tecido gordo quando decide entrar em greve de fome. Determine quanto tempo sobreviverá somente com as reservas de gordura.

**1-66** Considere duas mulheres idênticas de 50 kg, a Maria e a Joana, que realizam tarefas idênticas e ingerem alimentos idênticos, com excepção de que a Maria acompanha as batatas assadas com 4 colheres de chá de manteiga, enquanto que a Joana come-as simples. Determine a diferença de peso entre a Maria e a Joana após um ano. *Solução:* 6,5 kg.

**1-67** Uma mulher que bebia todos os dias aproximadamente 1 l de refrigerante muda para um de dieta (zero calorias) e começa a comer 2 fatias de tarte de maçã todos os dias. Agora consome mais ou menos calorias?

**1-68** Um homem de 60 kg comia sempre ao jantar uma maçã, sem variar o seu peso. Agora come uma porção de 200 ml de gelado em vez da maçã e anda todos os dias durante 20 min. Nesta nova dieta qual será a variação de peso ao fim de um mês? *Solução:* ganha 0,087 kg.



**FIGURA P1-71**

**1-69** O calor específico médio de um corpo humano é de  $3,6 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ . Se a temperatura do corpo de um homem de  $80 \text{ kg}$  variar de  $37$  para  $39^\circ \text{C}$  durante um exercício físico pesado, determine o aumento de energia térmica do corpo devido à variação da temperatura.

**1-70** O álcool fornece  $7$  Calorias por grama mas não inclui quaisquer nutrientes. Um copo de  $1,5 \text{ oz}$  ( $1 \text{ lbm} = 16 \text{ oz}$ ) de licor com  $80^\circ$  contém  $100$  Calorias, devido somente ao álcool. Os vinhos doces e a cerveja fornecem calorias adicionais, pois contêm também hidratos de carbono. Cerca de  $75\%$  dos adultos americanos ingerem bebidas alcoólicas que adicionam, em média, cerca de  $210$  Calorias à sua dieta. Determine quanto peso, em libras, um americano adulto irá perder se deixa de beber álcool e começar a beber refrigerantes sem açúcar.

**1-71** Um copo de  $12 \text{ oz}$  ( $1 \text{ lbm} = 16 \text{ oz}$ ) de cerveja normal contém  $13 \text{ g}$  de álcool e  $13 \text{ g}$  de hidratos de carbono equivalentes a  $150$  Calorias. O mesmo copo de cerveja leve contém  $11 \text{ g}$  de álcool e  $5 \text{ g}$  de hidratos de carbono equivalentes a  $100$  Calorias. Um pessoa queima em média  $700$  Calorias ao exercitar-se numa máquina de musculação. Determine quanto tempo irá demorar a queimar, através de exercício na máquina de musculação, se (a) um indivíduo beber cerveja normal ou (b) cerveja leve.

**1-72** Um copo de Bloody Mary contém  $14 \text{ g}$  de álcool e  $5 \text{ g}$  de hidratos de carbono equivalentes a  $116$  Calorias. Um copo de  $2,5 \text{ oz}$  ( $1 \text{ lbm} = 16 \text{ oz}$ ) de vermute contém  $22 \text{ g}$  de álcool e vestígios de hidratos de carbono equivalentes a  $156$  Calorias. Uma pessoa comum queima  $600$  Calorias por hora ao fazer exercício numa máquina de esqui. Determine quanto tempo demorará a queimar as calorias de um copo de (a) Bloody Mary e de (b) vermute, nesta máquina de exercício.

**1-73** Um homem de  $176 \text{ lbm}$  e uma mulher de  $132 \text{ lbm}$  foram almoçar ao restaurante Burger King. O homem comeu um BK Big Fish (sanduíche de peixe frito) ( $720 \text{ Cal}$ ), dose média de batatas fritas ( $400 \text{ Cal}$ ) e uma bebida grande ( $225 \text{ Cal}$ ). A mulher comeu um sanduíche de bife hamburguês normal ( $330 \text{ Cal}$ ), uma dose média de batatas fritas ( $400 \text{ Cal}$ ) e uma bebida sem açúcar ( $0 \text{ Cal}$ ). Depois do almoço foram remover neve com uma pá, queimando calorias a uma taxa de  $360 \text{ Cal/h}$  para a mulher e  $480 \text{ Cal/h}$  para o homem. Determine quanto tempo deverá cada um remover neve, de modo a queimar as calorias do almoço.

**1-74** Considere dois amigos que almoçam no restaurante Burger King todos os dias. Um deles come um sanduíche Double Whopper, uma dose grande de batatas e uma bebida grande (total =  $1600 \text{ Cal}$ ), enquanto que o outro come um Whopper Junior, uma dose pequena de batatas fritas e uma bebida pequena (total =  $800 \text{ Cal}$ ) todos os dias. Sabendo que estas duas pessoas são em tudo o resto idênticas, incluindo o metabolismo basal, determine a diferença de peso entre os dois depois de um ano.

**1-75E** Uma pessoa de  $150 \text{ lbm}$  vai a um restaurante e pede um prato de rosbife ( $270 \text{ Cal}$ ), uma sanduíche grande de rosbife ( $410 \text{ Cal}$ ) e uma lata de  $12 \text{ oz}$  de refrigerante ( $150 \text{ Cal}$ ). Este indivíduo consome  $400$  Calorias por hora ao subir escadas. Determine quanto tempo deverá subir escadas, de modo a queimar as calorias da refeição.

**1-76** Uma pessoa come um Big Mac no McDonald's (530 Cal) enquanto que uma outra come no Burger King um sanduíche Whopper (640 Cal) e uma terceira pessoa come 50 azeitonas e um pacote médio de batatas fritas para ao almoço. Determine quem consome mais calorias, sabendo que uma azeitona contém cerca de 5 Calorias.

### Exercícios de revisão

**1-77** Normalmente enchem-se balões com hélio porque o peso deste é de apenas  $1/7$  do ar em condições idênticas. A força de flutuação, que pode ser expressa como  $F_b = \rho_{\text{ar}} g V_{\text{balão}}$  irá impelir o balão na vertical. Se o balão tiver um diâmetro de 10 m e carregar duas pessoas com 70 kg cada, determine a aceleração que o balão adquire quando for solto. Assuma a densidade do ar de  $\rho = 1,16 \text{ kg/m}^3$  e despreze o peso do cordame e da gôndola.

*Solução:*  $16,5 \text{ m/s}^2$ .

**1-78** Determine a carga máxima, em kg, que o balão descrito no Exercício 1-77 pode suportar. *Solução:* 520,6 kg.

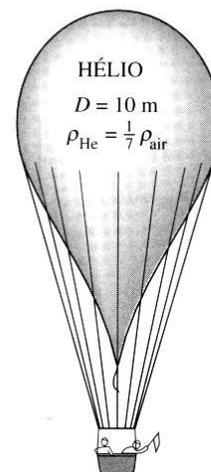
**1-79** Um barómetro básico pode ser utilizado como um dispositivo de medição de altura em aviões. Um controlador de tráfego aéreo indica que a pressão barométrica é de 753 mmHg enquanto que o piloto lê 690 mmHg no seu aparelho. Estime a altitude a que o avião voa se a massa volumica média do ar for de  $1,20 \text{ kg/m}^3$  e  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ . *Solução:* 714 m.

**1-80** A metade inferior de um reservatório cilíndrico com 10 m de altura está cheia de água ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ) enquanto que a superior contém óleo cuja densidade é de 0,85. Determine a diferença de pressão entre o topo e o fundo do cilindro. *Solução:* 90,7 kPa.

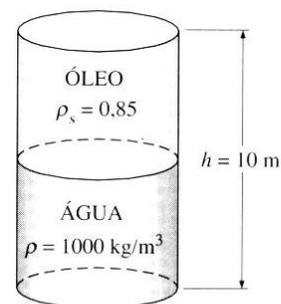
**1-81** Um dispositivo cilindro-êmbolo vertical contém gás à pressão de 500 kPa. A pressão atmosférica local é de 100 kPa e a superfície do êmbolo é de  $30 \text{ cm}^2$ . Determine a massa do êmbolo. Assuma o valor padrão da aceleração da gravidade.

**1-82** Uma panela de pressão cozinha alimentos mais rapidamente, porque mantém uma maior pressão e temperatura no interior. A tampa é bem vedada, e o vapor só pode escapar-se através de um orifício colocado no meio desta. Uma válvula de massa determinada é colocada sobre o orifício, de modo a que o vapor só se escapa se a pressão no interior da panela deslocar o peso deste componente, mantendo a pressão constante e dentro de um valor seguro.

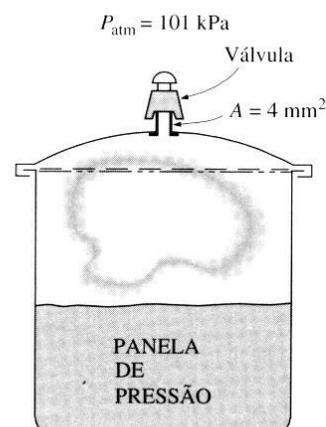
Sabendo que a secção do orifício é de  $4 \text{ mm}^2$ , determine a massa da válvula da panela, de modo a esta funcionar com uma pressão de 100 kPa. Considere uma pressão atmosférica de 101 kPa e desenhe o diagrama de corpo livre da válvula. *Solução:* 40,8 g.



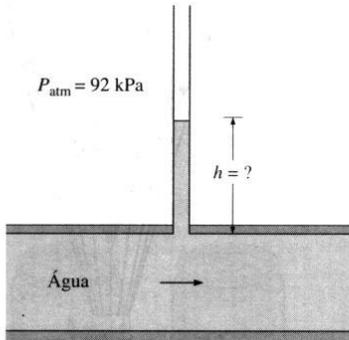
**FIGURA P1-77**



**FIGURA P1-80**



**FIGURA P1-82**



**FIGURA P1-83**

**1-83** Um tubo de vidro foi colocado numa conduta de água, como mostra a Figura P1-83. Se a pressão da água no fundo da conduta for de 115 kPa e a pressão atmosférica local for de 92 kPa, determine qual a altura da elevação da água no tubo de vidro em metros. Admita  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$  nesse local e considere a massa volúmica da água igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

**1-84** A pressão atmosférica média na Terra é aproximada como função da altitude através da seguinte relação:

$$P_{\text{atm}} = 101,325(1 - 0,02256z)^{5,256}$$

em que  $P_{\text{atm}}$  é a pressão atmosférica em kPa e  $z$  é a altitude em km ( $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$ ) com  $z = 0$  ao nível do mar. Determine as pressões aproximadas em Atlanta ( $z = 306 \text{ m}$ ), Denver ( $z = 1610 \text{ m}$ ), Cidade do México ( $z = 2309 \text{ m}$ ) e no topo do monte Evereste ( $z = 8848 \text{ m}$ ).

**1-85** O peso de um corpo pode mudar ligeiramente consoante a localização, devido a aceleração da gravidade,  $g$ , variar com a elevação. Determine, com base na expressão apresentada no Exercício 1-9, o peso de uma pessoa com 80 kg ao nível do mar ( $z = 0$ ), em Denver ( $z = 1610 \text{ m}$ ) e no topo do monte Evereste ( $z = 8848 \text{ m}$ ).

**1-86E** A eficiência de um frigorífico aumenta em 3 % por cada aumento de  $1^\circ \text{C}$  na temperatura mínima do dispositivo. Qual o aumento de eficiência por cada aumento de (a) 1 K, (b)  $1^\circ \text{F}$  e (c) 1 R.

**1-87E** A temperatura de ebulição da água decresce cerca de  $3^\circ \text{C}$  por cada 100 m de altitude. Qual o decréscimo em (a) K, (b)  $^\circ \text{F}$  e (c) R para a mesma variação de altitude.

**1-88E** A temperatura média do corpo humano aumenta cerca de  $2^\circ \text{C}$  durante um esforço físico extenuante. Qual o aumento de temperatura em (a) K, (b)  $^\circ \text{F}$  e (c) R para as mesmas condições.

**1-89E** A hipertermia de  $5^\circ \text{C}$  (aumento de  $5^\circ \text{C}$  acima da temperatura normal) é considerada fatal. Expresse este nível de hipertermia em (a) K, (b)  $^\circ \text{F}$  e (c) R.

**1-90E** Uma casa perde calor à taxa de 3000 kJ/h por  $^\circ \text{C}$  de diferença de temperatura interior e exterior. Expresse esta taxa de perda de calor por (a) K, (b)  $^\circ \text{F}$  e (c) R de diferença de temperatura.

**1-91** A temperatura média da atmosfera terrestre é função aproximada da altitude, através da seguinte relação:

$$T_{\text{atm}} = 288,15 - 6,5z$$

em que  $T_{\text{atm}}$  é a temperatura da atmosfera em K e  $z$  é a altitude em km com  $z = 0$  ao nível do mar. Determine a temperatura média da atmosfera a uma altitude de 12 000 m.

**1-92** O José da Silva é um estudante de Engenharia retrógrado que acredita que o ponto de ebulição da água é a melhor referência para ser utilizada nas escalas de temperatura. Descontente com o facto de este apresentar um número estranho na escala de temperatura absoluta, propôs uma nova escala denominada escala Zé. A unidade de temperatura é o zé, denotado por Z, sendo atribuído ao ponto de ebulição da água o valor de 1000 Z. Diga, sob o ponto de vista termodinâmico, se esta escala é aceitável. Determine também o ponto de congelamento da água e obtenha a relação entre as escalas Zé e a Celsius.

**1-93E** Um homem vai a um talho comprar um bife para o jantar e vê um de 12 oz (1 lbm = 16 oz) por €3,14. Este homem vai então a um hipermercado e encontra um bife de 320 g de qualidade idêntica por €2,79. Qual será a melhor compra?

**1-94** Leite é transportado desde o estado do Texas até ao da Califórnia, uma distância de 2100 km, num reservatório de 7 m de comprimento e 2 m de diâmetro exterior. As paredes deste são isoladas com uma camada de 5 cm de uretano. Determine a quantidade de leite, em kg e gal (1 gal = 3,78 l), contida no reservatório.

**1-95** Um engenheiro que trabalha em unidades inglesas na análise de transferência de calor de um edifício de tijolo necessita de conhecer a condutibilidade térmica do tijolo. Mas o único valor que encontra nos livros é de 0,72 W/(m · °C) que é em unidades SI. Para piorar as coisas, o engenheiro não encontra um factor de conversão entre os dois sistemas de unidades. Poderá ajudá-lo?

**1-96** É sabido que se sente mais o ar frio em tempo ventoso, embora o valor indicado num termómetro seja inferior, devido ao efeito arrefecedor do vento. Este efeito é devido ao aumento da transferência de calor por convecção com o aumento da velocidade do vento. A temperatura equivalente em °F é dada por [ASHRAE, *Handbook of Fundamentals* (Atlanta, GA, 1993), p. 8.15]

$$T_{\text{equivalente}} = 91,4 - (91,4 - T_{\text{amb}})(0,475 - 0,0203V + 0,304\sqrt{V})$$

em que  $V$  representa a velocidade do vento em mi/h e  $T_{\text{amb}}$  a temperatura em °F do ar calmo, com pouco vento, até 4 mph. A constante 91,4°F representa a temperatura média da pele de um indivíduo em repouso num ambiente confortável. O vento à temperatura  $T_{\text{amb}}$  e velocidade  $V$  aparenta ser tão frio como o ar calmo à temperatura  $T_{\text{equivalente}}$ . Utilizando os factores de conversão apropriados, obtenha uma expressão em unidades SI com  $V$  em km/h e  $T_{\text{ambiente}}$  em °C.

**Solução:**  $T_{\text{equivalente}} = 33,0 - (33,0 - T_{\text{ambiente}})(0,475 - 0,0126V + 0,240\sqrt{V})$ .

**1-97** A força de reacção desenvolvida por um motor de avião é denominada impulso, sendo o valor deste para um motor de um Boeing 777 de cerca de 85 000 lbf. Expresse este valor em N e kgf.

**1-98** Um homem de 100 kg decide perder 5 kg sem restringir a sua dieta de 3000 Calorias diárias. Em vez disso, começa a praticar natação, dança, corrida e ciclismo, cada uma delas durante uma hora por dia, passando o resto do tempo a dormir ou a descansar. Determine quanto tempo demorará a perder os 5 kg pretendidos.

**1-99** A gama de pesos de adultos saudáveis é expressa geralmente em termos de índice de massa corporal (IMC), definido em unidades SI por

$$\text{IMC} = \frac{M \text{ (kg)}}{H^2 \text{ (m}^2\text{)}}$$

em que  $M$  representa o peso (ou seja, a massa) de um indivíduo em kg e  $H$  a sua altura em m, sendo o valor recomendado entre  $19 \leq \text{IMC} \leq 25$ . Converta a expressão dada para unidades inglesas, de modo a indicar o peso em libras e a altura em polegadas. Calcule também o seu próprio IMC e, caso esteja fora dos valores recomendados, determine quanto peso terá de ganhar ou perder, de maneira a estar em forma. *Solução:*  $\text{IMC} = 705 M/H^2$ .

### Exercícios de computação, projecto e trabalhos

**1-100** Escreva um programa de computador interactivo que expresse um valor de temperatura dado em °C, °F, K e R em termos das outras três unidades.

**1-101** Escreva um programa de computador interactivo que expresse um valor da pressão dada em unidades SI em termos de altura da coluna de água ou de mercúrio.

**1-102** Descreva os instrumentos de medição da temperatura. Explique os princípios de funcionamento de cada um deles, as suas vantagens e desvantagens, o custo e a gama de utilização. Qual o aparelho que recomendaria para as seguintes situações: medição de temperaturas de pessoas num consultório médico; monitorização das diversas temperaturas de um bloco de motor de automóvel em diversos locais; e monitorização das temperaturas da caldeira de uma central térmica.

**1-103** Descreva os diversos aparelhos de medição de pressão. Explique o princípio de funcionamento de cada um, as suas vantagens e desvantagens, o custo e a gama de utilização. Dê exemplos de aplicações para cada aparelho.

**1-104** Descreva os diversos aparelhos de medição da massa e volume utilizados ao longo da história. Explique também o desenvolvimento dos aparelhos modernos.

**1-105** Prepare uma análise nutricional de tudo o que comeu e bebeu nas últimas 24 h. Determine a sua ingestão total de calorias e compare com as suas necessidades diárias. Determine também a percentagem de calorias que deriva das gorduras. Considera que a sua dieta nas últimas 24 h foi saudável? Quais as alterações que faria para a tornar saudável?

**1-106** Prepare um *menu* saboroso, saudável e económico para si durante o período de uma semana e complete-o com uma análise nutricional.