

toramento próprio muitos pacientes acham mais fácil usar dispositivos automáticos, que exibem os dados da pressão sanguínea de forma digital. Isso tem levado engenheiros biomédicos a repensar os equipamentos para aferir a pressão sanguínea e a desenvolver novas abordagens, livres de mercúrio e livres de estetoscópios. Uma delas utiliza um transdutor de pressão altamente sensível para detectar oscilações na pressão com uma braçadeira inflável colocada em torno do braço do paciente. O programa de monitoramento usa esses dados para calcular as pressões sistólica e diastólica, as quais são exibidas digitalmente.

## 1.7 Temperatura

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

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

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

*interação térmica (calórica)*

*equilíbrio térmico*

*temperatura*

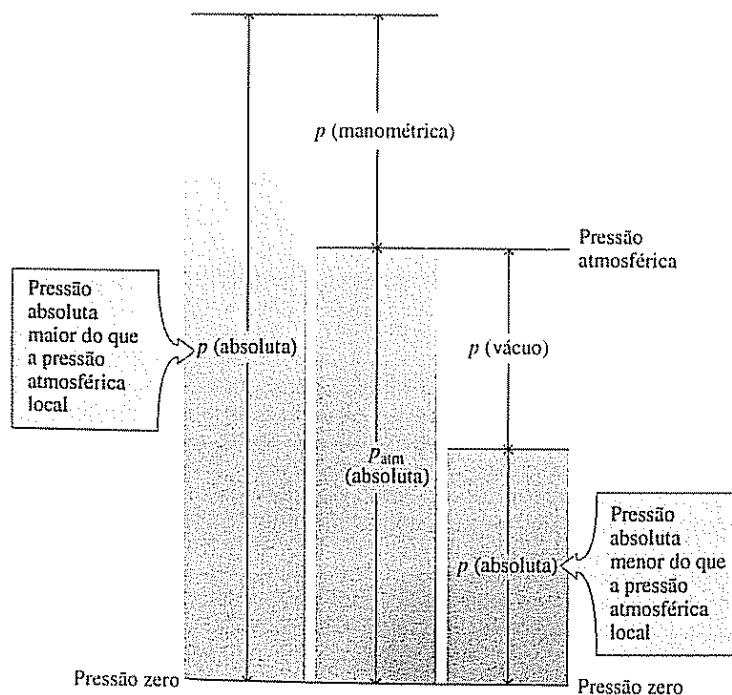


Fig. 1.11 Relação entre as pressões absoluta, atmosférica, manométrica e de vácuo.

lei zero da termodinâmica

propriedade termométrica

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

### 1.7.1 Termômetros

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

Um dispositivo familiar para a medição da temperatura é o termômetro de bulbo, ilustrado na Fig. 1.12a, que consiste em um tubo de vidro capilar conectado a um bulbo cheio de um líquido, como o mercúrio ou o álcool, e selado na outra extremidade. O espaço acima do líquido é ocupado pelo vapor do líquido ou por um gás inerte. Conforme a temperatura aumenta, o líquido se expande em volume e se eleva no capilar. O comprimento  $L$  do líquido no capilar depende da temperatura. Consequentemente, o líquido é a substância termométrica e  $L$  é a propriedade termométrica. Embora esse tipo de termômetro seja geralmente utilizado para medições rotineiras de temperatura, ele não é muito adequado para aplicações em que uma extrema precisão é necessária.

Sensores mais precisos, conhecidos como *termopares*, estão baseados no princípio de que quando dois metais distintos são unidos uma força eletromotriz (fem), que é basicamente função da temperatura, será estabelecida em um circuito. Em certos termopares um dos fios é feito de platina com uma pureza especificada e o outro é uma liga de platina e ródio. Os termopares também utilizam cobre e constantan (uma liga de cobre e níquel) e ferro e constantan, e vários outros conjuntos de materiais. Uma outra classe importante de dispositivos de medição de temperatura é a dos sensores eletrorresistivos. Esses sensores são baseados no fato de que a resistência elétrica de uma série de materiais varia de uma maneira previsível com a temperatura. Os materiais usados com esse propósito são normalmente condutores (como platina, níquel ou cobre) ou semicondutores. Os dispositivos que usam condutores são conhecidos como *bulbos de resistência*. Os que utilizam semicondutores são chamados de *termistores*. A Fig. 1.12b mostra um termômetro de resistência elétrica a bateria usado atualmente.

Uma variedade de instrumentos mede a temperatura através da radiação, tal como o termômetro de ouvido mostrado na Fig. 1.12c. Eles são conhecidos pelos termos *termômetros de radiação* e *pirômetros ópticos*. Este tipo de termômetro difere daqueles considerados anteriormente, já que não é necessário que ele entre em contato com o corpo cuja temperatura deve ser determinada, o que é uma vantagem quando se lida com corpos em movimento ou corpos com temperaturas extremamente altas.

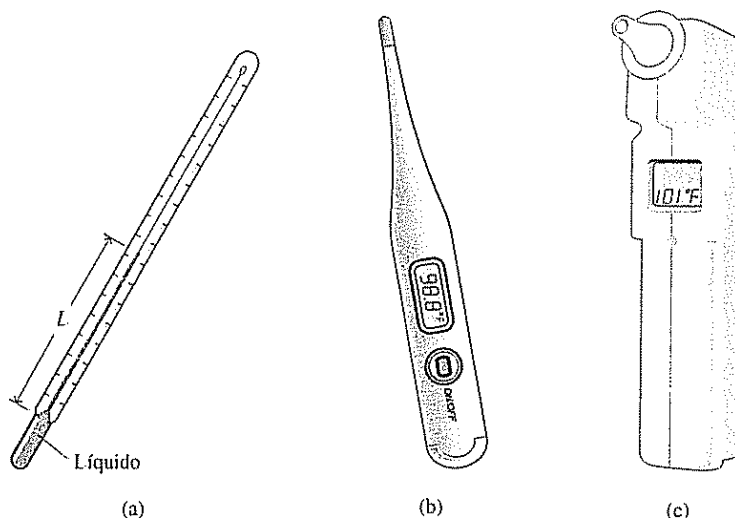


Fig. 1.12 Termômetros. (a) De bulbo. (b) Resistência elétrica. (c) Termômetro infravermelho de ouvido.

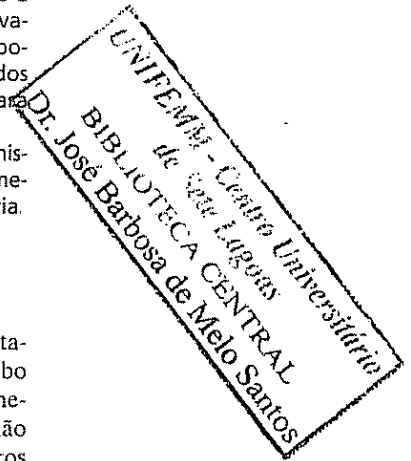
Os termômetros de bulbo de mercúrio utilizados para a verificação de febre, antigamente usados por quase todos os médicos, são coisa do passado. A Academia Americana de Pediatria considerou o mercúrio como uma substância muito tóxica para estar presente nos domicílios familiares. Famílias estão adotando alternativas mais seguras e se livrando dos seus termômetros de mercúrio. O próprio ato de se livrar dos termômetros gera um problema, afirmam os peritos.

O descarte seguro de milhões de termômetros de bulbo de mercúrio obsoletos surgiu devido à preocupação com o meio ambiente. Para um descarte apropriado, os termômetros devem ser levados às estações de coleta de materiais de risco e não simplesmente ser jogados na lixeira, onde podem facilmente se quebrar, liberando o mercúrio. Fragmentos perdidos de termômetros quebrados e qualquer coisa que tenha entrado em contato com o mercúrio deveriam ser transportados para locais apropriados para descarte em recipientes fechados.

A presente geração de termômetros de bulbo para a verificação de febre e uso domiciliar contém misturas líquidas patenteadas não-tóxicas, alternativas seguras para o mercúrio. Outros tipos de termômetros também são utilizados em domicílios, incluindo os termômetros de resistência elétrica de bateria.



Energia e  
Meio Ambiente



### 1.7.2 Escalas de Temperatura Kelvin e Rankine

Formas empíricas de medir a temperatura, tais como as consideradas na Seção 1.7.1, possuem limitações inerentes ➔ **POR EXEMPLO...** A tendência de o líquido congelar em um termômetro de bulbo sujeito a baixas temperaturas impõe um limite inferior na gama de temperaturas que podem ser medidas. Em altas temperaturas os líquidos evaporam, e dessa forma essas temperaturas também não podem ser determinadas por um termômetro de bulbo. Consequentemente, diversos termômetros diferentes seriam necessários para cobrir um amplo intervalo de temperatura ➔

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

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

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

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

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

### 1.7.3 Escalas Celsius e Fahrenheit

A Fig. 1.13 mostra a relação entre as escalas Kelvin, Rankine, Celsius e Fahrenheit, assim como os valores de temperatura correspondentes a três pontos fixos: o ponto triplo, o ponto de gelo e o ponto de vapor.

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

A **escala de temperatura Celsius** usa como unidade o grau Celsius (°C), que possui a mesma magnitude do kelvin. Assim, as diferenças de temperatura em ambas as escalas são idênticas. No entanto,

escala Kelvin

escala Rankine

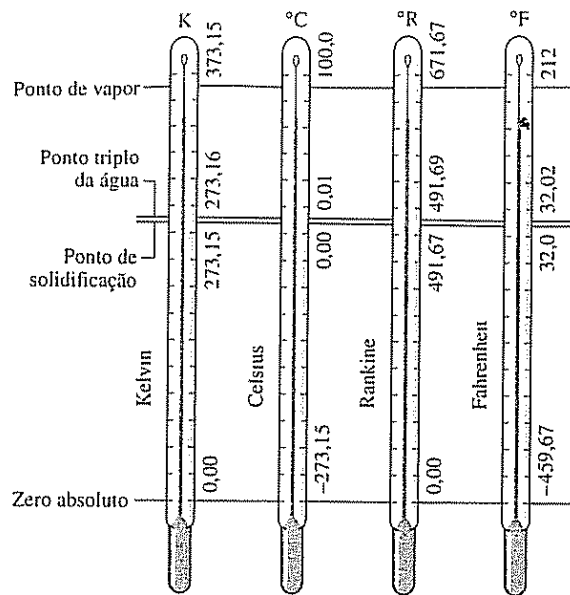
ponto triplo

escala Celsius

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

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

Fig. 1.13 Comparação entre escalas de temperaturas.



o ponto zero na escala Celsius é deslocado para 273,15 K, como ilustrado na seguinte relação entre a temperatura Celsius e a temperatura Kelvin

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

Disso pode-se concluir que na escala Celsius o *ponto triplo* da água é 0,01°C e que 0 K corresponde a -273,15°C. Esses valores estão apresentados na Fig. 1.13.

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

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

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

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

Essa equação mostra que a temperatura Fahrenheit do ponto de solidificação (0°C) é 32°F e o do ponto de vapor (100°C) é 212°F. Os 100 graus Celsius ou Kelvin entre o ponto de gelo e o ponto de vapor correspondem a 180 graus Fahrenheit ou Rankine, como mostra a Fig. 1.13.

#### escala Fahrenheit

#### Tome Nota

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

Bio.  
conexões



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

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

## 1.8 Projeto de Engenharia e Análise

Uma importante função da engenharia é a de projetar e analisar sistemas que tenham por objetivo atender às necessidades humanas. O projeto e a análise são considerados nesta seção.