

## Escalas de temperatura

As escalas de temperatura permitem usar uma base comum para as medições de temperatura, e várias foram criadas ao longo da história. Todas as escalas de temperatura se baseiam em alguns estados facilmente reproduzíveis, como os pontos de congelamento e de ebulição da água, os quais também são chamados de *ponto de gelo* e *ponto de vapor de água*, respectivamente. Diz-se que uma mistura de gelo e água que está em equilíbrio com o ar saturado com vapor à pressão de 1 atm está no ponto de gelo, e que uma mistura de água líquida e vapor de água (sem ar) em equilíbrio à pressão de 1 atm está no ponto de vapor de água.

As escalas de temperatura usadas hoje no SI e no sistema inglês são a **escala Celsius** (anteriormente chamada de *escala centígrada*, e renomeada em 1948 em homenagem ao astrônomo sueco A. Celsius, 1702-1744, que a criou) e a **escala Fahrenheit** (em homenagem ao fabricante de instrumentos alemão G. Fahrenheit, 1686-1736), respectivamente. Na escala Celsius, aos pontos de gelo e de vapor foram atribuídos originalmente os valores 0 °C e 100 °C, respectivamente. Os valores correspondentes na escala Fahrenheit são 32 °F e 212 °F. Com frequência, elas são chamadas de *escalas de dois pontos*, já que os valores de temperatura são atribuídos em dois pontos diferentes.

Em termodinâmica, é bastante desejável uma escala de temperatura que seja independente das propriedades de qualquer substância. Tal escala de temperatura é chamada de **escala termodinâmica de temperatura**, que será desenvolvida posteriormente em conjunto com a segunda lei da termodinâmica. A escala termodinâmica de temperatura no SI é a **escala Kelvin**, assim chamada em homenagem a Lord Kelvin (1824-1907). A unidade de temperatura dessa escala é o **kelvin**, designado por K (não °K; o símbolo de grau foi oficialmente eliminado do kelvin em 1967). A menor temperatura da escala Kelvin é o zero absoluto, ou 0 K. Dessa forma, apenas um único ponto de referência diferente de zero precisa ser atribuído para estabelecer a inclinação dessa escala linear. Usando técnicas não convencionais de refrigeração, cientistas se aproximaram do zero absoluto kelvin (eles atingiram 0,000000002 K em 1989).

A escala termodinâmica de temperatura do sistema inglês é a **escala Rankine**, assim chamada em homenagem a William Rankine (1820-1872). A unidade de temperatura dessa escala é o **rankine**, designado por R.

Uma escala de temperatura quase idêntica à escala Kelvin é a **escala de temperatura do gás ideal**. As temperaturas dessa escala são medidas usando-se um **termômetro de gás a volume constante**, que é basicamente um vaso rígido preenchido com um gás (em geral hidrogênio ou hélio) a baixa pressão. Esse termômetro tem por base o princípio de que *em baixas temperaturas, a temperatura de um gás é proporcional à sua pressão a um volume constante*. Ou seja, a temperatura de um volume fixo de gás varia *linearmente* com a pressão a pressões suficientemente baixas. Dessa forma, a relação entre a temperatura e a pressão do gás no vaso pode ser expressa como

$$T = a + bP \quad (1-8)$$

onde os valores das constantes  $a$  e  $b$  para um termômetro de gás são determinados experimentalmente. Quando  $a$  e  $b$  são conhecidos, a temperatura de um dado meio pode ser calculada a partir dessa relação, imergindo o vaso rígido do termômetro



de gás no meio e medindo a pressão do gás quando o equilíbrio térmico é estabelecido entre o meio e o gás no vaso cujo volume é mantido constante.

Uma escala de temperatura de gás ideal pode ser desenvolvida medindo-se as pressões do gás no vaso em dois pontos reprodutíveis (como os pontos de gelo e de vapor de água) e atribuindo valores adequados às temperaturas nesses dois pontos. Considerando que apenas uma linha reta passa por dois pontos fixos em um plano, essas duas medições são suficientes para determinar as constantes  $a$  e  $b$  da Eq. 1-8. Assim, a temperatura desconhecida  $T$  de um meio correspondente a uma leitura de pressão  $P$  pode ser determinada por meio daquela equação com um cálculo simples. Os valores das constantes serão diferentes para cada termômetro, dependendo do tipo e da quantidade de gás no vaso, e dos valores de temperatura atribuídos aos dois pontos de referência. Se os valores  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  forem atribuídos aos pontos de gelo e de vapor de água respectivamente, então a escala de temperatura do gás será idêntica à escala Celsius. Nesse caso, o valor da constante  $a$  (que corresponde a uma pressão absoluta zero) será  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , independentemente do tipo e da quantidade de gás no vaso do termômetro. Ou seja, em um diagrama  $P$ - $T$ , todas as linhas retas que passam pelos pontos experimentais interceptarão o eixo da temperatura em  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  quando extrapoladas, como mostra a Fig. 1-36. Essa é a temperatura mais baixa que pode ser obtida por um termômetro de gás e, assim, podemos construir uma *escala de temperatura absoluta do gás* atribuindo um valor zero à constante  $a$  da Eq. 1-8. Nesse caso, a Eq. 1-8 é reduzida a  $T = bP$  e, dessa forma, precisamos especificar a temperatura em apenas *um* ponto para definir uma escala de temperatura absoluta do gás.

É preciso observar que a escala de temperatura absoluta do gás não é uma escala termodinâmica de temperatura, uma vez que esta não pode ser usada a temperaturas muito baixas (devido à condensação) e muito altas (devido à dissociação e ionização). Entretanto, a temperatura absoluta do gás é idêntica à temperatura termodinâmica na faixa de temperaturas em que o termômetro de gás pode ser usado e, portanto, podemos considerar a escala termodinâmica de temperatura como uma escala de temperatura absoluta do gás que utiliza um gás “ideal” ou “imaginário” que sempre se comporta como um gás a baixa pressão, independentemente da temperatura. Se tal termômetro de gás existisse, ele leria o zero kelvin na pressão absoluta zero, o que corresponde a  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  na escala Celsius (Fig. 1-37).

A escala Kelvin está relacionada à escala Celsius por

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \tag{1-9}$$

A escala Rankine está relacionada à escala Fahrenheit por

$$T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67 \tag{1-10}$$

É uma prática comum arredondar a constante da Eq. 1-9 para 273 e a constante da Eq. 1-10 para 460.

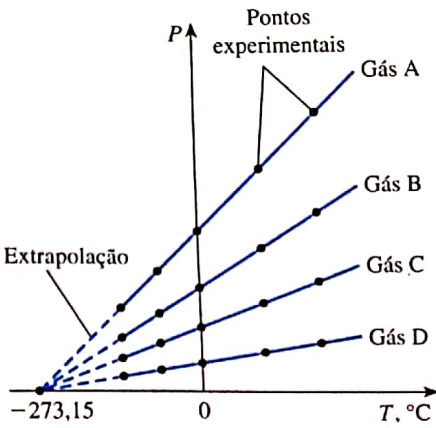
A relação entre as escalas de temperatura nos dois sistemas de unidades é

$$T(\text{R}) = 1,8T(\text{K}) \tag{1-11}$$

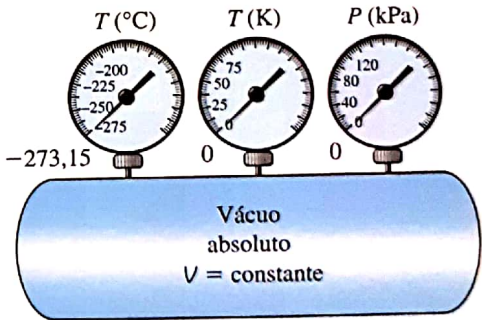
$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8T(^{\circ}\text{C}) + 32 \tag{1-12}$$

Uma comparação entre as diversas escalas de temperaturas é feita na Fig. 1-38.

A temperatura de referência escolhida na escala Kelvin original foi de  $273,15\text{ K}$  (ou  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), que é a temperatura na qual a água congela (ou o gelo derrete) e a água existe como um mistura sólido-líquido em equilíbrio sob pressão atmosférica

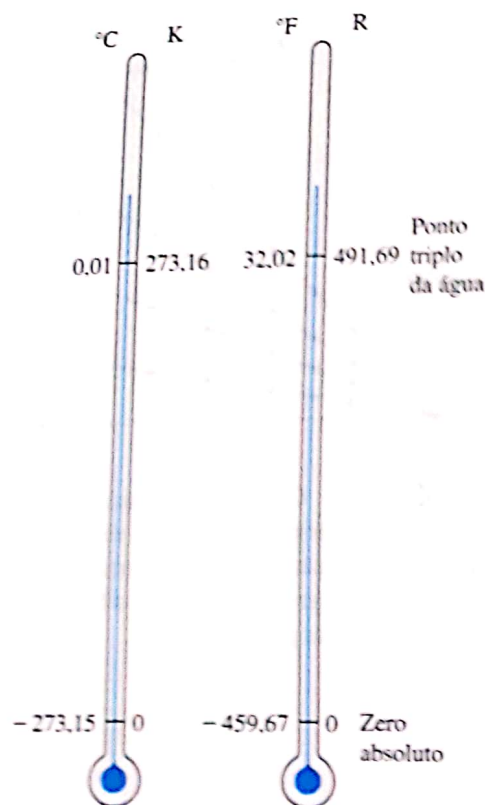


**FIGURA 1-36** Curvas de  $P$  versus  $T$  dos dados experimentais obtidos de um termômetro a gás de volume constante, usando quatro gases diferentes a diferentes pressões (baixas pressões).



**FIGURA 1-37** Um termômetro a gás de volume constante leria  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  à pressão absoluta zero.





**FIGURA 1-38** Comparação das escalas de temperatura.

padrão (o *ponto de gelo*). Na Décima Conferência Geral de Pesos e Medidas ocorrida em 1954, o ponto de referência foi alterado para um ponto que pode ser reproduzido com mais exatidão, o *ponto triplo* da água (o estado no qual as três fases da água coexistem em equilíbrio), ao qual é atribuído o valor de 273,16 K. A escala Celsius também foi redefinida nessa conferência tendo por base a escala de temperatura do gás ideal e um único ponto fixo, que é, novamente, o ponto triplo da água com um valor atribuído de 0,01 °C. A temperatura de ebulição da água (o *ponto de vapor de água*) foi determinada de maneira experimental como 100,00 °C novamente e, assim, as escalas Celsius nova e antiga concordaram.

## A escala internacional de temperatura de 1990 (ITS-90)

A *Escala Internacional de Temperatura de 1990*, que substituiu a *Escala Internacional de Temperatura Prática de 1968* (IPTS-68), de 1948 (IPTS-48), e de 1927 (ITS-27), foi adotada pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas no encontro de 1989 por solicitação da Décima Oitava Conferência Geral de Pesos e Medidas. A ITS-90 é semelhante às suas antecessoras, exceto por estar mais refinada com valores atualizados de temperaturas fixas, ter um intervalo estendido e ser mais compatível com a escala de temperatura termodinâmica. Nessa escala, a unidade de temperatura termodinâmica  $T$  é novamente o kelvin (K), definida como a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água; esse é o único ponto fixo de definição das escalas ITS-90 e Kelvin e também o ponto fixo termométrico mais importante usado na calibração de termômetros para a ITS-90.

A unidade de temperatura Celsius é o grau Celsius (°C), que, por definição, é igual em magnitude ao Kelvin (K). Uma diferença de temperatura pode ser expressa em Kelvins ou graus Celsius. O ponto de gelo permanece o mesmo a 0 °C (273,15 K) na ITS-90 e na IPTS-68, mas o ponto de vapor é de 99,975 °C na ITS-90 (com uma incerteza de  $\pm 0,005$  °C) e era de 100,000 °C na IPTS-68. A alteração se deve a medições precisas realizadas pela termometria de gás, com particular atenção ao efeito de sorção (impurezas de um gás absorvidas pelas paredes do bulbo à temperatura de referência são dissolvidas a altas temperaturas, fazendo com que a pressão do gás, anteriormente medida, aumente).

A ITS-90 estende-se de 0,65 K até a temperatura mais alta mensurável na prática a partir da lei de radiação de Planck, usando radiação monocromática. Ela se baseia na especificação de valores de temperatura em vários pontos fixos facilmente reproduzíveis que servem como referências e expressa a variação da temperatura em vários dos intervalos e subintervalos na forma de funções.

Na ITS-90, a escala de temperatura é considerada em quatro intervalos. No intervalo entre 0,65 e 5 K, a escala de temperatura é determinada em função de relações entre a pressão do vapor e a temperatura para o  $^3\text{He}$  e o  $^4\text{He}$ . Entre 3 e 24,5561 K (o ponto triplo do neônio), ela é determinada com um termômetro de gás hélio adequadamente calibrado. De 13,8033 K (o ponto triplo do hidrogênio) a 1.234,93 K (o ponto de solidificação da prata), ela é determinada com termômetros de resistência de platina calibrados em conjuntos especificados de pontos de referência. Acima de 1.234,93 K, ela é definida em função da lei de radiação de Planck e de um ponto de referência adequado, como o ponto de solidificação do ouro (1.337,33 K).

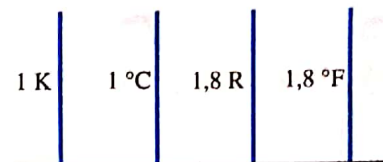
Enfatizamos que as magnitudes de cada divisão de 1 K e 1 °C são idênticas (Fig. 1-39). Assim, quando estivermos lidando com diferenças de temperatura  $\Delta T$ ,

o intervalo de temperatura de ambas as escalas são iguais. Elevar a temperatura de uma substância em 10 °C é o mesmo que elevá-la em 10 K. Ou seja,

$$\Delta T(K) = \Delta T(^{\circ}C) \quad (1-13)$$

$$\Delta T(R) = \Delta T(^{\circ}F) \quad (1-14)$$

Algumas relações termodinâmicas envolvem a temperatura  $T$  e quase sempre surge a dúvida se ela está em K ou °C. Se a relação contiver diferenças de temperatura (como  $a = b\Delta T$ ), não há diferença, e ambas podem ser usadas. Entretanto, se a relação contiver apenas temperaturas, em vez de diferenças de temperatura (como  $a = bT$ ), então K deve ser usada. Na dúvida, sempre é mais seguro usar K, porque praticamente não há situações em que o uso de K seja incorreto, mas existem muitas relações termodinâmicas que fornecerão um resultado incorreto se °C for usado.



**FIGURA 1-39** Comparação das magnitudes de várias unidades de temperatura.

#### EXEMPLO 1-4 Expressão da elevação de temperatura em diferentes unidades

Durante um processo de aquecimento, a temperatura de um sistema se eleva em 10 °C. Expresse essa elevação de temperatura em K, °F e R.

**SOLUÇÃO** A elevação de temperatura de um sistema deve ser expressa em unidades diferentes.

**Análise** Este problema trata de variações de temperatura, as quais são idênticas nas escalas Kelvin e Celsius. Então,

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

As variações de temperatura nas escalas Fahrenheit e Rankine também são idênticas e estão relacionadas às variações nas escalas Celsius e Kelvin por meio das Eqs. 1-11 e 1-14:

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

e

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

**Discussão** Observe que as unidades °C e K são intercambiáveis quando lidamos com diferenças de temperatura.

## 1-9 PRESSÃO

A **pressão** é definida como uma *força normal exercida por um fluido por unidade de área*. Só falamos de pressão quando lidamos com um gás ou um líquido. O equivalente da pressão nos sólidos é a *tensão normal*. Como a pressão é definida como a força por unidade de área, ela tem unidade de newtons por metro quadrado (N/m<sup>2</sup>), denominada de **pascal** (Pa). Ou seja,

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