

Temperatura

(* Preparado por [C.A. Bertulani](#) para o projeto de **Ensino de Física a Distância**)

O que é temperatura?

De forma qualitativa, podemos descrever a temperatura de um objeto como aquela que determina a sensação de quanto ele está quente ou frio quando entramos em contato com ele.

É fácil mostrar que quando dois objetos são postos em contato (dizemos que eles estão em contato térmico), o objeto com temperatura maior esfria, enquanto que o objeto com temperatura menor esquenta, até um ponto em que não ocorrem mais mudanças e, para os nossos sentidos, eles parecem estar com mesma temperatura. Quando as mudanças térmicas terminam, dizemos que os dois objetos (mais rigorosamente, sistemas) estão em equilíbrio térmico. Podemos então definir a temperatura de um sistema dizendo que a temperatura é uma quantidade que é a mesma para ambos os sistemas, se eles estão em equilíbrio térmico.

Se fizermos experiências com mais de dois sistemas, encontraremos que muitos sistemas podem ser colocados em equilíbrio térmico entre si. Ou seja, o equilíbrio térmico não depende do tipo de objeto utilizado. Ou, mais precisamente,

se dois sistemas estão separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro, então eles também devem estar em equilíbrio térmico entre si,

e eles todos possuem a mesma temperatura independentemente do tipo de sistemas que eles forem.

A sentença em itálico é chamada de lei zero da termodinâmica, e pode ser reconstruída na forma:

Se três ou mais sistemas estiverem em contato térmico entre si, e se todos estiverem em equilíbrio em conjunto, então qualquer dois deles separadamente estão em equilíbrio

térmico entre si.

Qualquer um dos três sistemas pode ser utilizado para calibrar a medida da temperatura - ou seja, usado como um termômetro. Quando um termômetro calibrado é posto em contato com um sistema e alcança equilíbrio térmico, temos então uma medida quantitativa da temperatura do sistema. Por exemplo, um termômetro clínico de mercúrio em vidro é posto em contato sob a língua de um paciente e se espera até o momento em que ele chegue a um equilíbrio térmico com a boca do paciente - observamos então quanto o mercúrio expandiu no tubo e lemos a escala do termômetro para achar a temperatura do paciente.

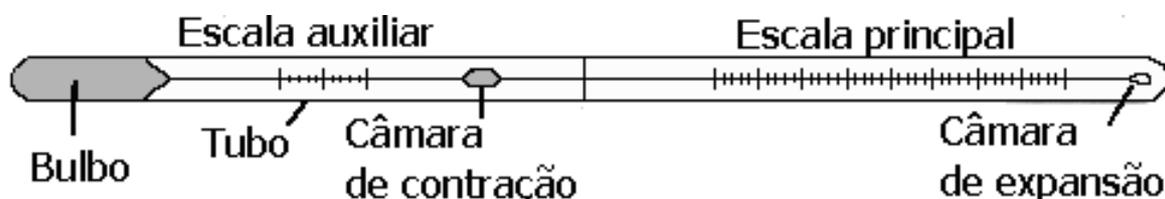
O que é um termômetro?

Um termômetro é um instrumento que mede quantitativamente a temperatura de um sistema. A maneira mais fácil de se fazer isso é achar uma substância que possua uma propriedade que se modifica de modo regular com a temperatura. A forma direta mais 'regular' é a forma linear:

$$t(x) = ax + b, \quad [4.1]$$

onde t é a temperatura da substância utilizada e muda com a propriedade x da substância. As constantes a e b dependem da substância utilizada e podem ser calculadas especificando dois pontos na escala de temperatura, tais como 0° para o ponto de congelamento da água e 100° para o seu ponto de ebulição.

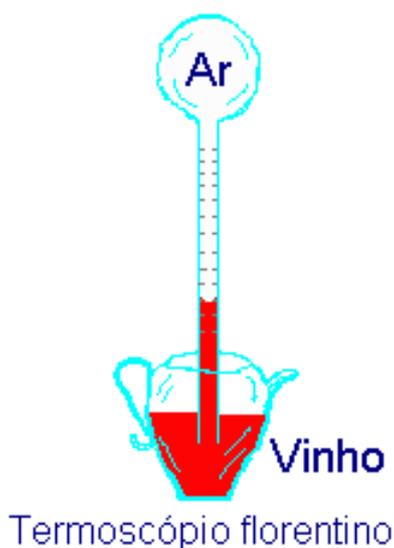
Por exemplo, o elemento mercúrio (o único metal líquido em baixas temperaturas) é líquido no intervalo de temperatura de -38.9°C a 356.7°C . Como todo líquido, o mercúrio expande à medida em que ele é aquecido. Sua expansão é linear e pode ser calibrada com precisão.



O termômetro de mercúrio em um tubo de vidro está ilustrado acima. Ele contém um bulbo cheio de mercúrio, que é permitido expandir em um tubo capilar (tubo muito fino). A sua taxa de expansão é calibrada na escala de vidro.

Escalas de temperatura

Os primeiros termômetros surgiram na idade média, e eram chamados de termoscópios.



Eles consistiam de um bulbo contendo um tubo longo com um extremo mergulhado em água colorida (vinho era muito utilizado). Um pouco do ar no tubo era expulso antes de colocar o líquido. Isto fazia com que o líquido subisse no tubo. Quando o ar restante no tubo e no bulbo era aquecido ou esfriado, o nível do líquido no tubo variava, refletindo uma mudança na temperatura do ar. Uma escala no tubo permitia que uma medida quantitativa dessas flutuações fosse feita.

Em 1702, o astrônomo Ole Roemer de Copenhagen utilizou **dois** pontos fixos em sua escala: gelo e água em ebulição. Em 1724 Gabriel Fahrenheit, um consertador de instrumentos em Danzig e Amsterdam, usou o mercúrio como líquido de termômetro. A expansão térmica do mercúrio é grande e uniforme. Ele não adere ao vidro, e permanece

líquido em um grande intervalo de temperaturas. Sua aparência metálica facilita a leitura.

Na escala usada por Fahrenheit o ponto de ebulição da água foi definido como 212. E o ponto de congelamento da água foi calibrado em 32, de modo que o intervalo entre os dois pontos pudesse ser representado pelo número 180. As temperaturas medidas nessa escala são chamadas de **graus Fahrenheit (° F)**.

Em 1745, Carolus Linnaeus de Upsala, Suécia, descreveu uma escala em que o ponto de congelamento da água era zero, e o ponto de ebulição 100, definindo a escala do *centigrado* (passo de cem). Anders Celsius (1701-1744) usou a escala contrária em que zero representa o ponto de ebulição da água e 100 o seu ponto de congelamento. Novamente, com 100 graus entre os dois pontos de definição.

Em 1948 o uso da escala de Centigrado foi trocada pelo uso de uma nova escala de **graus Celsius (° C)**. A escala Celsius é definida pelos seguintes dois itens, que discutiremos mais tarde:

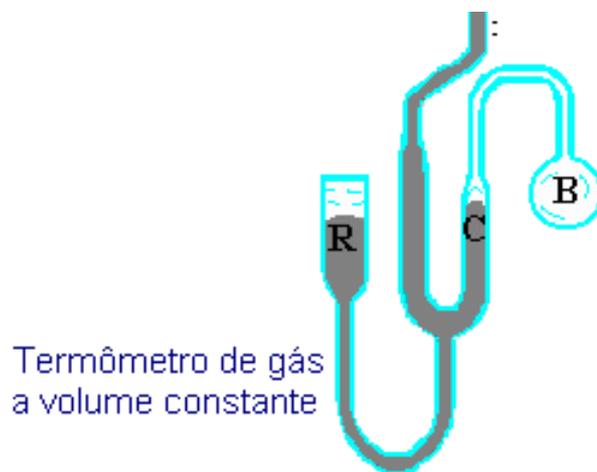
- (i) o ponto triplo da água é definido como $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (ii) um grau Celsius é igual à mesma mudança de temperatura que um grau numa escala de gás ideal.

Na escala Celsius o ponto de ebulição da água nas condições normais de pressão atmosférica é $99.975\text{ }^{\circ}\text{C}$, em contraste com os 100 graus definidos pela escala do Centigrado.

Para converter de Celsius a Fahrenheit: multiplique por 1.8 e some 32.

$$^{\circ}\text{F} = 1.8^{\circ}\text{C} + 32 \quad [4.2]$$

Em 1780, J. A. C. Charles, um médico Francês, mostrou que para o mesmo aumento de temperatura, todos os gases exibem o mesmo aumento de volume. Como o coeficiente de expansão dos gases é aproximadamente o mesmo, é possível estabelecer uma escala de temperatura baseada em um ponto fixo simples, em vez de uma escala com dois pontos fixos, como as escalas Fahrenheit e Celsius.



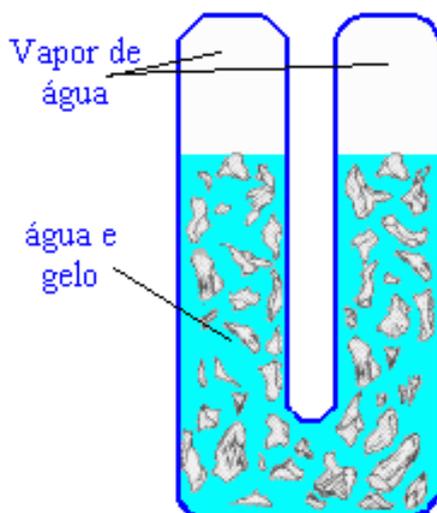
Em um termômetro de gás a volume constante, um grande bulbo de gás B, por exemplo hidrogênio, sob uma dada pressão é conectado a um manômetro de mercúrio por meio de um tubo de volume muito pequeno. (O bulbo B é a parte sensível à temperatura e deve conter a maior parte do hidrogênio). O nível de mercúrio em C deve ser ajustado subindo, ou abaixando, o reservatório de mercúrio R. A pressão do gás de hidrogênio, que é a variável "x" na relação linear com a temperatura (eq. [4.1]), é dado pela diferença entre os níveis D e C mais a pressão acima de D.

Observa-se experimentalmente que existe muito pouca diferença nas escalas de temperatura para gases diferentes, a pequenas pressões. Nessas condições, todos os gases se comportam como gases perfeitos, obedecendo a relação

$$pV = \text{constante} \cdot T \quad [4.3]$$

Esta temperatura é conhecida como *temperatura termodinâmica* e é hoje aceita como uma medida fundamental da temperatura. Note que existe um zero natural nessa escala - é o ponto em que a pressão do gás ideal é zero. Logo, apenas um outro ponto precisa ser definido. Este foi definido pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas como sendo o **ponto triplo da água** (o ponto em que a água, o gelo e o vapor de água coexistem em equilíbrio). Seu valor foi tomado como 273.16. A unidade de temperatura nessa escala é chamada de **Kelvin**, e o seu símbolo é o K (não se usa o símbolo de grau nesse caso). Uma "célula" de ponto triplo é mostrada na figura abaixo. A célula é resfriada até que a água, gelo, e vapor de água estejam em equilíbrio. A temperatura é 273.16 K por definição. Um termômetro pode ser

calibrado inserindo-o no tubo central.



Para converter de Celsius para Kelvin, some 273:

$$K = {}^{\circ}C + 273 \quad [4.4]$$

A temperatura termodinâmica é a temperatura fundamental; sua unidade é o Kelvin que é definido como a fração $1/273.16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

Tabela 4.1: Comparações entre escalas

	${}^{\circ}C$	K	${}^{\circ}F$
Água em ebulição	100	373	212
Água congela	0	273	32
Zero absoluto	-273	0	-459

Leia: [A temperatura do Universo](#)

Expansão térmica

Quando um sólido é aquecido, ele se expande. A quantidade de expansão é linearmente proporcional à variação de temperatura. Se a

variação for negativa, o sólido contrai. Suponha que tenhamos um bastão de comprimento L e temperatura T . Suponha também que a temperatura varie de DT . A mudança no comprimento do bastão é

$$DL = a DT \quad [4.6]$$

onde a possui unidades de inverso de temperatura.

Vamos supor agora que tenhamos um cubo de lado com comprimento L , em vez do bastão. Se cada lado do cubo se expande de DL , o volume do cubo expandido é dado por

$$\begin{aligned} V' &= (L + DL)^3 \\ &= L^3 + 3L^2DL + 3L(DL)^2 + (DL)^3 \\ &= V(1 + 3DL/L + \dots) \\ &\sim V(1 + 3aDT) \end{aligned} \quad [4.7]$$

De modo que a mudança de volume é dada por

$$DV = 3aDT \quad [4.8]$$

Logo, o coeficiente de expansão volumétrica é 3 vezes maior do que o coeficiente de expansão linear. Denotamos esse coeficiente por b , observando que $b = 3a$. b é dado para alguns materiais na tabela abaixo.

Coeficiente de expansão volumétrica (por $^{\circ}\text{C}$)

Alumínio	$23 \cdot 10^{-6}$
Cobre	$17 \cdot 10^{-6}$
Vidro (comum)	$9 \cdot 10^{-6}$
Vidro (Pirex)	$3.2 \cdot 10^{-6}$
Ferro	$11 \cdot 10^{-6}$
Gelo	$51 \cdot 10^{-6}$

Em geral, costuma-se definir os coeficientes de expansão térmica e

volumétrica por unidade de comprimento e de volume, respectivamente. Ou seja,

$$a = (1/L) (dL/dT) \quad [4.9]$$

$$b = (1/V) (dV/dT) \quad [4.10]$$

onde $d = \lim_{D \rightarrow 0}$ (limite em que a variação de temperatura vai a zero).

O coeficiente de expansão térmica de um gás (a pressão constante) pode ser deduzido usando a equação de gás ideal $PV = NRT$. Dela obtemos que $PdV = NRdT$. Logo, $b = (1/V) (dV/dT)$, ou seja, $b = 1/T$.

Suponha que você tenha 1 litro = 1000 cm^3 de um líquido com $b = 10^{-4}$ em um recipiente com área no fundo de $A = 100 \text{ cm}^2$. A altura do líquido é 10 cm (Volume = área \times altura). Se você aumentar a temperatura do líquido de 20°C , teremos que $dV = bVdT = 10^{-4} \cdot 1000 \text{ cm}^3 \cdot 20 = 2 \text{ cm}^3$. A mudança na altura é $dh = dV / A = 2 \text{ cm}^3 / 100 \text{ cm}^2 = 0.02 \text{ cm} = 0.2 \text{ mm}$.

Se, no entanto, você puser uma conexão num recipiente de altura 10 cm ligada a um tubo capilar por um orifício de 1 cm^2 , o líquido subirá muito mais, pois $dh = dV / A = 2 \text{ cm}^3 / 1 \text{ cm}^2 = 2 \text{ cm}$. Você acabou de construir um termômetro. Basta colocar uma escala e calibrá-lo.

