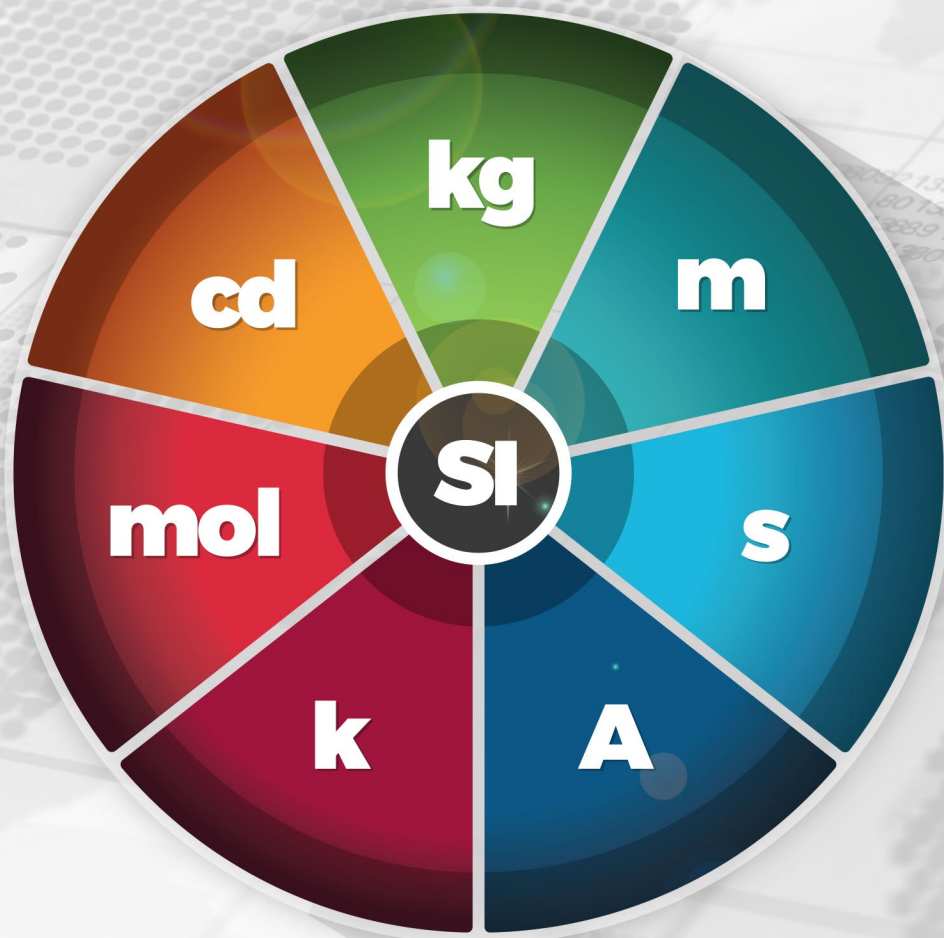


# O novo Sistema Internacional de Unidades (SI)



## Introdução

ser humano, através dos tempos, sempre sentiu a necessidade de medir. Realizamos medições com muita naturalidade em praticamente tudo que fazemos em nosso dia-a-dia. Por muito tempo, cada povo teve o seu próprio sistema de medidas e, em geral, as unidades de medidas primitivas estavam baseadas em partes do corpo humano, conhecidas como medidas antropomórficas, que eram referências comuns, pois ficava fácil chegar-se a uma medida que podia ser verificada por qualquer pessoa. Foi assim que surgiram medidas padrão como o cúbito, a braça, a jarda e o pé, como mostrado na **figura 1**.

Como as pessoas têm tamanhos diferentes, claramente havia a necessidade de um sistema de medidas mais seguro e universal, sobretudo para facilitar e tornar mais justas as transações comerciais, além de garantir a coerência e confiança das medições.

Desde a Idade Média até meados do século XVIII, as unidades eram decretadas pelo soberano de um país, com base no corpo humano ou objetos do cotidiano, sendo usadas quase que regionalmente. Com a Revolução Francesa, no fim do século XVIII, veio o abandono dos pés, braças, palmos, jardas e milhas em favor de uma medida criada a partir das dimensões do planeta Terra. Para ser mais exato, foi utilizado como base em uma fração do comprimento do meridiano terrestre. Com a definição do metro, também veio a definição do quilograma: A massa de um dl cúbico de água, ou 1 milésimo de 1 metro cúbico de água.

O **sistema métrico decimal** foi criado após a revolução francesa. A Convenção do Metro foi assinada por representantes de 17 (dezessete) países, entre eles o Brasil, em 20 de maio de 1875, em Paris. Com ela, a criação do Sistema Métrico Decimal foi o passo inicial que para a criação do Sistema Internacional de Unidades (SI) ocorrida durante a 11ª



Figura 1.: Medidas primitivas com base no corpo humano.

Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), realizada em 1960.

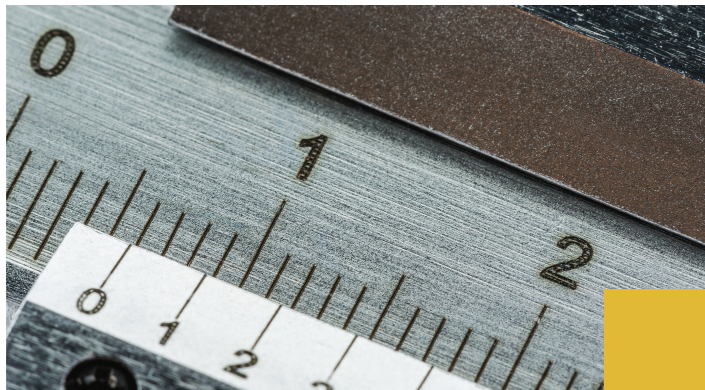
O SI possui sete unidades de base: o metro (comprimento), o quilograma (massa), o segundo (tempo), o ampere (corrente elétrica), o kelvin (temperatura termodinâmica), o mol (quantidade de substância) e a candela (intensidade luminosa). Um sistema prático, coerente e mundialmente aceito nas relações internacionais, no ensino e nas pesquisas científicas, que evolui continuamente para refletir as melhores práticas de medição. O SI é o sistema de unidades adotado pela maioria dos países, conforme pode ser verificado em [www.bipm.org/en/about-us/member-states/](http://www.bipm.org/en/about-us/member-states/).

## Porque usar o SI?

O **Sistema Internacional de Unidades** desempenha um importante papel nas medições. O uso das mesmas unidades de medida entre diferentes países e corporações permite compreender de forma clara os valores expressos nos processos de medição, possibilitando, por exemplo, a fabricação de produtos de acordo com as especificações técnicas, com

dimensões exatas e valores reconhecidos em qualquer parte do planeta.

A necessidade de unidades de medida universais é claramente evidenciada em muitas indústrias modernas, como as indústrias automobilísticas ou de produção de aviões, em que o produto final costuma ser uma montagem de peças e equipamentos produzidos por diferentes corporações. Na confecção dessas peças é necessário realizar e expressar as medições em unidades que sejam compreendidas tanto pelo fabricante da peça quanto pela montadora. Assim, a montagem final de automóveis e aviões só é possível se a fabricação das peças e componentes, produzidos por diferentes indústrias, de diferentes países, estiver amparada por unidades de medida universais, de fácil compreensão por todos os setores envolvidos na montagem do produto final.



## Mas afinal, o que mudou?

No sistema em vigor até 19 maio de 2019, os valores das constantes fundamentais eram determinados a partir de experimentos. O quilograma era definido a partir de um protótipo internacional, um cilindro de uma liga de platina e irídio e essa era a unidade utilizada para determinar a massa de um próton, de um elétron ou de outras partículas elementares. Isso levava à situação notável de que os valores das constantes fundamentais estavam em um estado

permanente de mudança, já que nossas capacidades de medição eram refletidas nesses valores. A cada quatro anos, à carga de um elétron, para citar um exemplo, **era atribuído a um novo valor numérico.**

### nanometro

corresponde a  
1 metro dividido  
por 1.000.000.000  
(um bilionésimo  
de metro)

Na realidade, a carga em si não mudou de maneira alguma. O que mudava era meramente nossa capacidade na arte de medir e, portanto, nossa compreensão do mundo.

Em nosso mundo de alta tecnologia, no qual o nanometro há muito tempo se tornou comum, qualquer mudança de tamanho em um protótipo têm um impacto significativo na definição de uma unidade e, portanto, deve ser evitada. A menor variação na temperatura leva a uma mudança no comprimento do protótipo, e os resultados ficariam ainda piores caso o protótipo fosse danificado.

A solução para esse problema é evitar o uso de uma medida material, como um protótipo, para definir uma unidade e buscar uma constante fundamental.

Em 1900, Max Planck, ao formular sua lei de radiação eletromagnética, já trazia as ideias de “constantes” e de “unidades naturais de medida” que seriam válidas para “todos os tempos e para todas as civilizações, mesmo extraterrestres e não-humanas”.



Max Planck(1901)

As constantes fundamentais são propriedades físicas invariantes, como a velocidade da luz ou a carga de um elétron. As pesquisas para relacionar constantes fundamentais e unidades de base do SI iniciaram pela definição do metro e do segundo. O segundo é relacionado a um número exato de oscilações na camada eletrônica do átomo de césio (relógio atômico), e a definição do metro utiliza a velocidade da luz.

# O quilograma

A definição do quilograma, unidade de base para a grandeza massa, se manteve a mesma desde o século XIX até o século XXI (de 1889 a 2019): a massa de um cilindro metálico armazenado em um cofre no Birô Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), localizado perto de Paris. Cada quilograma de referência no mundo é baseado neste protótipo do quilograma. E isso não é tudo: muitas outras unidades, como o mol ou o ampere, dependem do protótipo do quilograma e qualquer problema com ele causava problemas na definição dessas outras unidades. Utilizar o protótipo do quilograma como padrão para a definição de massa significa aceitar que ninguém sabe o peso de um quilograma com a exatidão do micrograma, o que nega a ideia de uma definição do quilograma.

O quilograma era a última unidade de base que ainda dependia de um protótipo e precisava ser definida com a utilização de uma constante fundamental. O novo SI, com todas as unidades definidas a partir de constantes fundamentais, foi adotado oficialmente em 20 de maio de 2019, uma data muito simbólica: o Dia Mundial da Metrologia, o aniversário da Convenção do Metro. Essa decisão foi aprovada na 26ª Conferência Geral sobre Pesos e Medidas (CGPM), ocorrida no mês de novembro de 2018.

Atualmente, **59 países** fazem parte da Convenção do Metro (Estados-Membros) e 42 países são associados.

A definição do quilograma foi decidida após uma disputa entre dois experimentos concebidos com princípios diferentes e que tinham o objetivo de produzir resultado de medições estáveis. O experimento vencedor da disputa, chamado "experimento da balança de watt" trabalha com o equilíbrio entre a força da gravidade compensada por uma força eletromagnética, com medições utilizando fenômenos quânticos, e relacionou o quilograma à constante de Planck  $h$ . O outro experimento relacionava uma massa macroscópica com a massa de um átomo e foi chamado de "experiência de Avogadro".

Em maio de 2019, com a adoção oficial do novo SI, um passo adiante será dado, levando para além do nosso pequeno planeta as definições das unidades do SI. As

definições das unidades no novo sistema, com base em constantes fundamentais, passam a ser universais. Para a ciência, isto é um progresso formidável, notadamente de um ponto de vista sistemático. Aqui, "sistemático" refere-se ao escopo de aplicação do SI e, ao mesmo tempo, no que concerne a sua lógica interna. No novo SI, a diferenciação em unidades de base e unidades derivadas, por exemplo, não é mais necessária. Todas as unidades são "derivadas" das constantes fundamentais, desse ponto de vista, são todas equivalentes. Mas, por questões históricas podem continuar sendo adotadas.

## E de agora em diante?

Para o público em geral, a boa notícia sobre o SI é que a vida continuará como de costume. Medições cotidianas realizadas após a adoção das novas definições não serão diferentes do que as realizadas antes da adoção do novo SI. As mudanças no sistema do SI passarão despercebidas em nosso dia a dia. A medição de energia elétrica, a balança do supermercado e a bomba no posto de combustível funcionarão exatamente da mesma maneira após as novas definições entrarem em vigor. O hemograma completo em um laboratório médico, a máquina de medição de coordenadas em grande escala na indústria, a conta de água, bem como outras medições usuais não fornecerão valores diferentes com as novas definições.



**medições cotidianas não serão afetadas**

Um dos requisitos mais importantes para a revisão do sistema de unidades, fundamental para novas definições, é que isso ocorra sem problemas e sem causar qualquer interrupção nos serviços, na produção industrial, no ensino, entre outros.

Do ponto de vista prático, as mudanças terão impacto somente nos Institutos Nacionais de Metrologia e em todas as atividades que requerem incertezas e exatidão da mesma ordem das que afetarão as unidades. No entanto, para o público em geral as mudanças serão imperceptíveis. Há, porém, uma importante diferença conceitual nas novas definições de unidades, pois todo equipamento, aparato ou método capaz de medir uma das constantes do SI será também capaz de realizar a unidade a ela associada. Deste modo, o detentor do equipamento possui o padrão da medida associada a esta unidade.

O novo SI irá permitir novas descobertas? A adição de mais casas decimais no valor final das medições faz muita diferença?

É difícil saber, mas a história mostra que toda vez que a humanidade aumentou a exatidão e a precisão das medições surgiram novas e melhores tecnologias.

## O novo SI e o ensino de ciências



Até recentemente, a pergunta “O que é um quilograma?” seria facilmente respondida pelos alunos que tivessem dado uma lida em textos básicos de ciências. Termos como “protótipo do quilograma”, “muito velho” e “Paris” diziam tudo. De acordo com a nova definição, a mesma pergunta não seria facilmente respondida. Do ponto de vista da maioria das crianças em idade escolar, isso é um problema: o novo SI é consideravelmente mais abstrato e exigente intelectualmente do que o sistema atual. Para a melhor compreensão das definições do novo SI, todo aluno deve entender o significado geral das constantes fundamentais e questionar essa mesma noção: Quais são as constantes fundamentais? De onde elas surgiram pela primeira vez? Por que elas são do jeito que são?

Uma constante fundamental deve ser entendida mais profundamente. Isso provavelmente ainda funciona com a velocidade da luz, mas que tal uma constante com a dimensão joule vezes segundo, como a constante de Planck  $h$ ? O problema real com a compreensão do novo sistema é que as constantes fundamentais não são uma realização literal das unidades de base. Se este fosse o caso, a cada unidade seria atribuída “a sua própria constante”. Isso, no entanto, pressupõe que essa constante tenha exatamente a mesma dimensão da unidade em questão. A definição anterior do metro, por exemplo, baseada no comprimento de onda de uma específica radiação eletromagnética era um exemplo dessa “atribuição simples”.

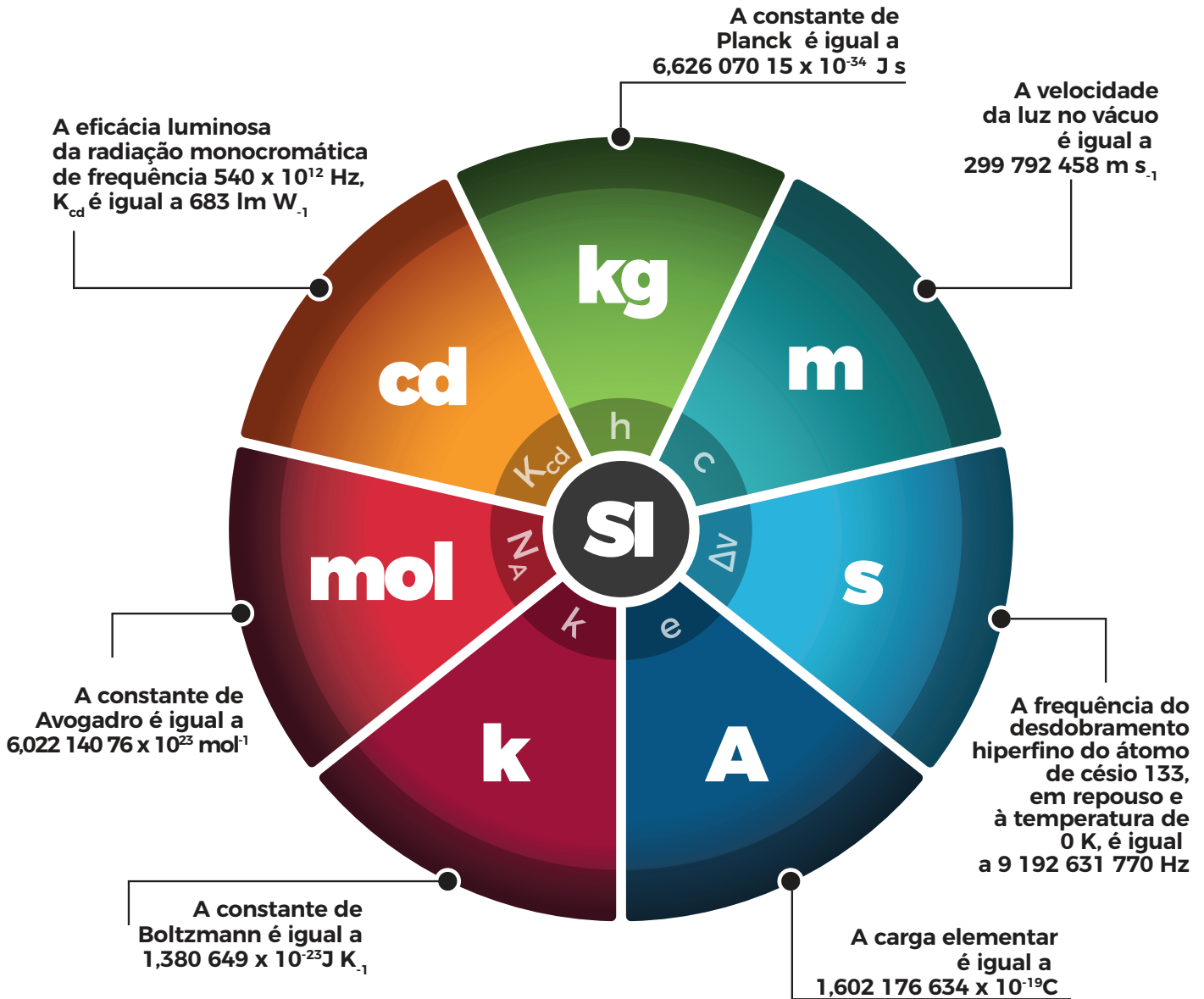
Em contraste, o novo SI requer maior capacidade de abstração. Quase todas as grandezas usadas na mecânica (que são formadas com base nas unidades de tempo, comprimento e massa) são realizadas por meio das três constantes: a frequência de transição entre níveis atômicos no átomo de césio  $\Delta\nu$  (expressa em  $1/s$ ), a velocidade da luz no vácuo  $c$  (expressa em  $m/s$ ) e a constante de Planck  $h$  (expressa em  $J \cdot s$ ). O que é essencialmente feito aqui é uma representação do mundo por meio de um novo sistema de coordenadas. O desafio consiste em encontrar uma orientação nesse novo sistema - um desafio não apenas para cada aluno da escola, mas também para as abordagens de ensino de cada professor.



# As unidades de base do SI



O novo SI tem como base o valor de 7 constantes universais:



As sete unidades de base do SI fornecem as referências que permitem definir todas as unidades de medida do Sistema Internacional. Com o progresso da ciência e com o aprimoramento dos métodos de medição, como aconteceu antes, foi necessário revisar, redefinir ou aprimorar as suas definições. Na lista abaixo, inicialmente são apresentadas as definições anteriores, uma ou outra observação e, logo em seguida, são apresentadas as novas definições para as unidades quilograma (ou quilograma), ampere, kelvin e mol, além das revisões das definições do segundo, metro e candela.



# kilograma

Grandeza de base: MASSA  
Símbolo: kg

## Definição anterior

O quilograma é a unidade de massa; ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma. Era a última grandeza de base do SI ainda definida por um artefato material, o protótipo internacional é conservado com suas seis cópias oficiais no BIPM/França.

Essa definição do quilograma, que ainda é a original da 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), de 1899, é problemática por duas razões. Primeiro, pelo fato de ser baseada em um protótipo único, sem condições de ser realizada novamente. Segundo, por haver indiscutíveis evidências de que sua massa varia com o tempo de forma imprevisível.



Protótipo internacional do quilograma conservado no BIPM.

## Novo SI:

O quilograma é a unidade de massa; ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma. Era a última grandeza de base do SI ainda definida por um artefato material, o protótipo internacional é conservado com suas seis cópias oficiais no BIPM/França.

Essa definição do quilograma, que ainda é a original da 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), de 1899, é problemática por duas razões. Primeiro, pelo fato de ser baseada em um protótipo único, sem condições de ser realizada novamente. Segundo, por haver indiscutíveis evidências de que sua massa varia com o tempo de forma imprevisível.



# ampere

Grandeza de base: corrente elétrica  
Símbolo: A

## Definição anterior

A 9ª CGPM, em 1948, adotou o ampere como unidade de corrente elétrica, definida no Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), em 1946, como sendo a corrente elétrica invariável que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de área de seção transversal desprezível, situados no vácuo, a um metro de distância um do outro, produz entre esses condutores uma força igual a  $2 \times 10^{-7}$  Newton por metro de comprimento desses condutores.



## ampere

continuação

### ■ Novo SI:

o ampere (A), continuará a ser a unidade de intensidade de corrente elétrica, mas seu valor será estabelecido fixando-se o valor numérico da carga elementar,  $e$ , exatamente igual a  $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ , quando se expressa a unidade em coulombs (C), igual a A·s, onde o segundo é definido em função de  $\Delta_{\nu_{Cs}}$ .



## kelvin

Grandeza de base: temperatura termodinâmica  
Símbolo: K

A definição da unidade de temperatura termodinâmica foi dada pela 10ª CGPM, em 1954, a qual selecionou o ponto triplo da água como o ponto fixo fundamental para essa unidade, sendo seu valor 273,16 K (0 °C).

### ■ Definição anterior

O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração  $1/273,16$  da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

A 13ª CGPM, em 1967-1968, adotou o nome de kelvin para essa unidade (K), ao invés de grau kelvin (°K) e definiu, como mostrado acima, a unidade da temperatura termodinâmica em termos de uma fração da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água.

A definição do kelvin apresentava alguns problemas, pois era baseada num certo material (água) cuja caracterização é complexa. Recentemente se definiu a composição isotópica da água a ser utilizada em sua realização. Além disso, a reatividade da água com o recipiente resulta em incertezas na estabilidade da realização. Assim, estudos foram realizados para uma nova definição baseada em uma constante física, a constante de Boltzmann.

### ■ Novo SI:

o kelvin, símbolo K, continuará a ser a unidade de temperatura termodinâmica, mas seu valor será estabelecido fixando-se o valor numérico da constante de Boltzmann exatamente igual a  $1,380\ 649 \times 10^{-23}$  quando expresso em unidades do SI,  $m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ , que é igual a  $(J \cdot K^{-1})$ .



# mol

Grandeza de base: quantidade de substância  
Símbolo: mol

Em 1967, o CIPM forneceu a definição do mol, que foi confirmada em 1969 e adotada pela 14a CGPM em 1971.

## ■ Definição anterior

O mol é a quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 kilogramas de carbono 12.

Nesta definição, entende-se que se faz referência aos átomos não ligados de carbono 12, em repouso e no seu estado fundamental.

## ■ Novo SI:

O mol continuará a ser a unidade de quantidade de substância de uma entidade elementar especificada, que pode ser um átomo, molécula, íon, elétron, qualquer outra partícula ou um grupo especificado de tais partículas, mas seu valor será estabelecido fixando-se o valor numérico da Constante de Avogadro ( $N_A$ ) exatamente igual a  $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  quando expresso em unidades do SI,  $\text{mol}^{-1}$ .



# segundo

Grandeza de base: tempo  
Símbolo: s

## ■ Definição anterior

o segundo, símbolo s, é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.

Essa definição se refere a um átomo de césio em repouso, a uma temperatura de 0 K. O segundo tem uma definição recente e tem sido realizado com incertezas cada vez menores, com relativa facilidade, inclusive utilizando equipamentos comerciais. É baseado em propriedades atômicas, do átomo de um isótopo do Césio, na região das microondas.

## ■ Novo SI:

O segundo, símbolo s, é a unidade de tempo no SI. A definição do segundo foi reescrita ao se fixar o valor numérico da frequência de transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de césio 133,  $\Delta_{\text{Cs}}$ , em 9 192 631 770, quando se expressa a unidade em Hz, igual a  $\text{s}^{-1}$ .



## metro

Grandeza de base: comprimento

Símbolo: m

Inicialmente o metro foi definido por um decreto da Assembleia Nacional francesa, em 7 de abril de 1795, como sendo a décima milionésima parte de 1/4 do meridiano terrestre, tendo como base medidas realizadas entre as cidades de Dunkerque e Barcelona.

Em 1889, a definição foi materializada no protótipo internacional de platina-irídio (ainda mantido no BIPM). Na 11ª CGPM, em 1960, o metro foi redefinido como sendo o comprimento de onda no vácuo do isótopo de Kr-86 (criptônio).

### ■ Definição anterior

O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo. Essa definição aconteceu em 1983, durante a 17ª CGPM.

O metro foi a primeira unidade de base para a qual uma definição nova foi formulada a partir de uma constante fundamental, a velocidade da luz.

### ■ Novo SI:

O metro (m) é a unidade de comprimento no SI. Se define ao fixar o valor numérico da velocidade da luz no vácuo,  $c$ , em  $299\,792\,458$ , quando se expressa a unidade em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , onde o segundo é definido em função da frequência de césio,  $\Delta_{\text{Cs}}$ .



## candela

Grandeza de base: intensidade luminosa

Símbolo: cd

### ■ Definição anterior

a 16ª CGPM, em 1979, adotou a seguinte definição: candela é a intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  hertz e cuja intensidade energética naquela direção é  $1/683$  watt por esferorradiano.

### ■ Novo SI:

A candela, símbolo cd, é a unidade de intensidade luminosa em uma dada direção no SI. Se define ao fixar o valor numérico da eficácia luminosa da radiação monocromática de frequência  $540 \times 10^{12}$  Hz,  $k_{\text{cd}}$ , em 683, quando se expressa a unidade em  $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ , igual a  $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$  onde o quilograma, o metro e o segundo são definidos em função de  $h$ ,  $c$  e  $\Delta_{\text{Cs}}$ .



# créditos

Texto traduzido e adaptado do PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt / Alemanha)

Luciana e Sá Alves & Gelson Rocha : tradução e adaptação da cartilha do PTB

Fotos

Página 1

