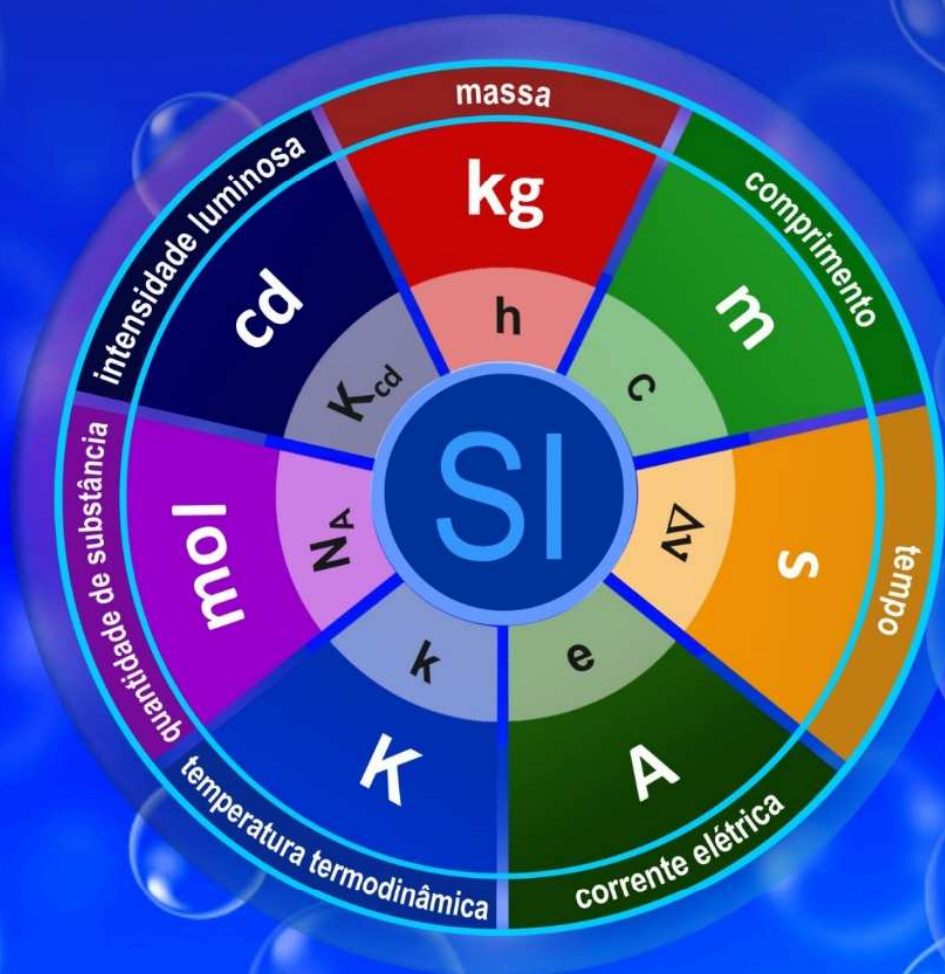


O Novo Sistema Internacional de Unidades (SI)



Introdução

O 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.

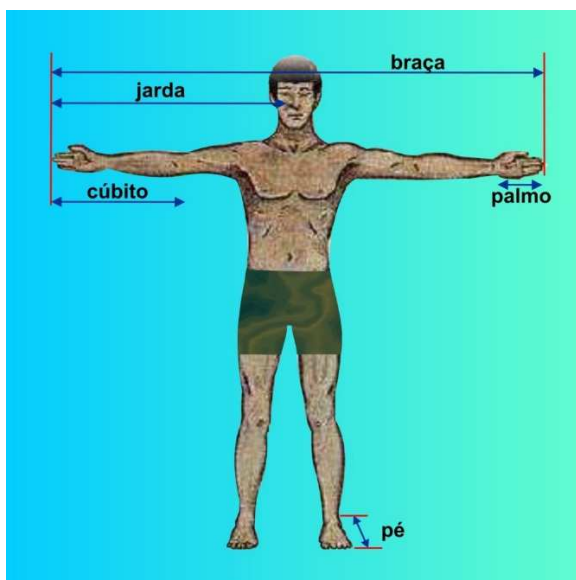


Figura 1. Medidas primitivas com base no corpo humano

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.

A criação do Sistema Métrico Decimal durante a Revolução Francesa, a definição do metro como sendo a décima milionésima parte de um quarto do meridiano terrestre e materializada, em junho de 1799, em uma barra de platina depositada nos Arquivos da República Francesa, bem como assinatura da Convenção do Metro em 20 de maio de 1875, em Paris, por representantes de dezessete (17) países, entre eles o Brasil, podem ser considerados os passos iniciais que resultaram na criação do Sistema Internacional de Unidades (SI), na 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), realizada em 1960.

Hoje o SI tem sete unidades de base: o metro (comprimento), o quilograma (massa), o segundo (tempo), o ampere (intensidade de 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 por todos os países do mundo, com exceção da Birmânia, da Libéria e dos Estados Unidos.

Por que 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 medida, 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 como pela montadora. Assim, a montagem final de automóveis e aviões só é possível se as fabricações das peças e componentes, produzidos por diferentes indústrias, de diferentes países, estejam amparadas por unidades de medida universais, de fácil compreensão por todos os setores envolvidos na montagem do produto final.

Do mesmo modo, se hoje você precisar enviar a medição de um produto para uma produção de embalagens que serão fabricadas na Alemanha, você precisará como base para fazer as medições uma unidade de medida compreendida tanto por você quanto pela fábrica alemã e cujo valor é exatamente o mesmo onde você se encontra e na Alemanha. Para isso, foi criado o Sistema Internacional de Unidades (SI), com o objetivo de que todas as unidades de medida possuam valores únicos e exatos que possam ser replicados em qualquer lugar do mundo.

O novo SI na ciência e tecnologia

O novo sistema de unidades representa um marco na história na ciência e tecnologia. Desde a Idade Média até meados do século 18, 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 18, 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, como base em uma fração do comprimento do meridiano terrestre. Com a definição do metro, também veio a definição do quilograma. A Convenção do Metro, realizada em 1875 na França, por meio de seus Estados-Membros passou a disseminar estas unidades em todo o mundo. Hoje, nossa vida neste planeta é caracterizada por um sistema de medição único e uniforme, que além do comércio e outras atividades do nosso dia-a-dia, também se aplica à ciência e tecnologia.

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, em princípio, passam a ser universais. Para a ciência, isto é um tremendo progresso, 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 necessário. Todas as unidades são "derivadas" das constantes fundamentais (figura 2), desse ponto de vista, são todas equivalentes.

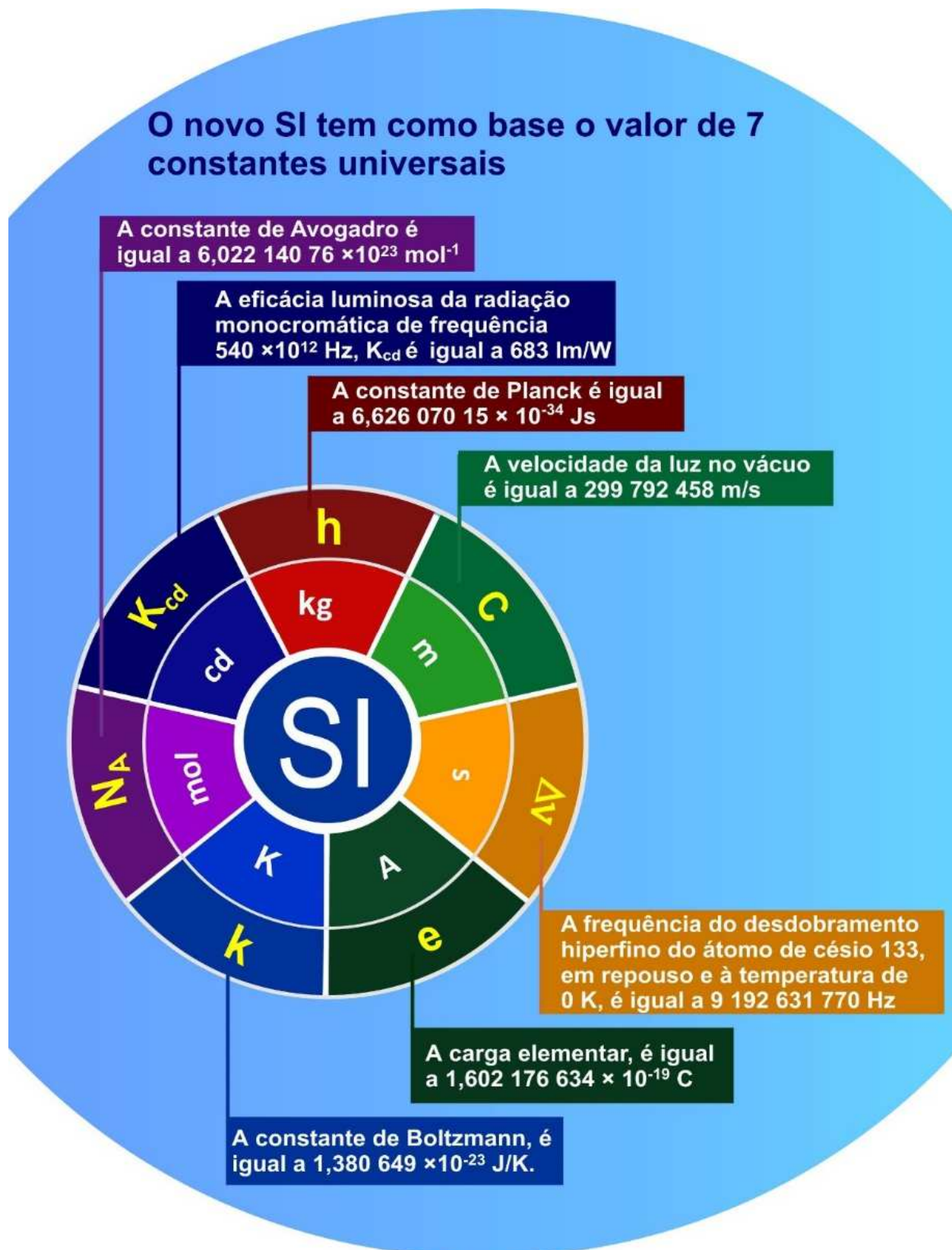
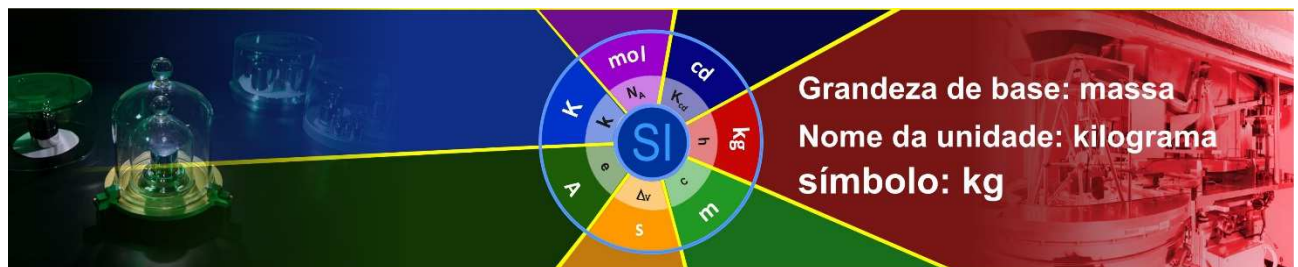


Figura 2. Constantes universais em que está baseado o novo SI

As Unidades de Base do SI

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.



Definição anterior: O quilograma é a unidade de massa; ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma.

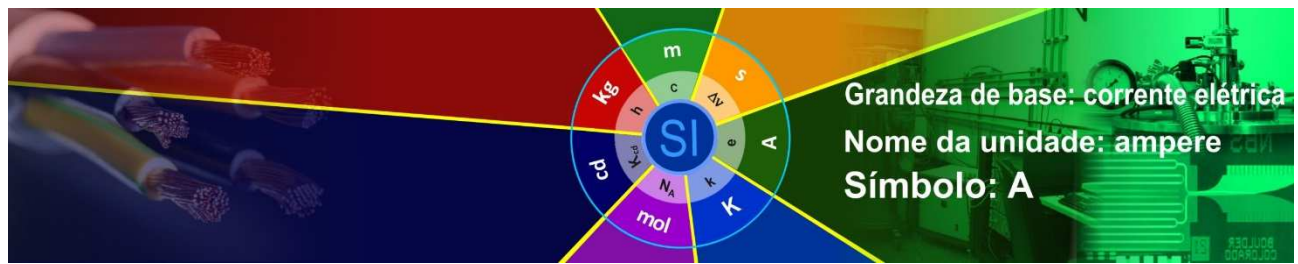


Figura 3. Protótipo internacional do quilograma conservado no BIPM.

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.

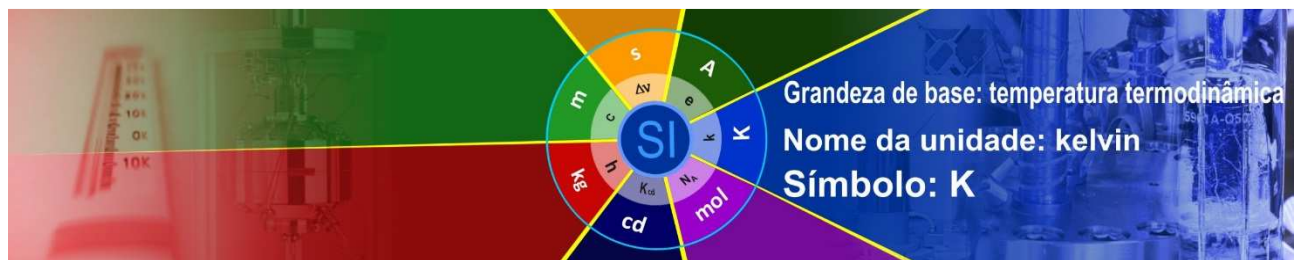
Essa definição do quilograma, que ainda é a original da 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), de 1899, é problemática por duas razões. Primeiro, pelo fato de ser baseada em um protótipo único, sem condições de ser realizada novamente. Segundo, por haver indiscutíveis evidências de que sua massa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

Novo SI: O kg continuará a ser a unidade de massa, mas seu valor será estabelecido fixando-se o valor numérico da constante de Planck, h , exatamente igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quando expresso em unidades do SI, $\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, que é igual a joule segundo (J·s).



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 2×10^{-7} Newton por metro de comprimento desses condutores.

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 $\Delta\nu_{Cs}$.



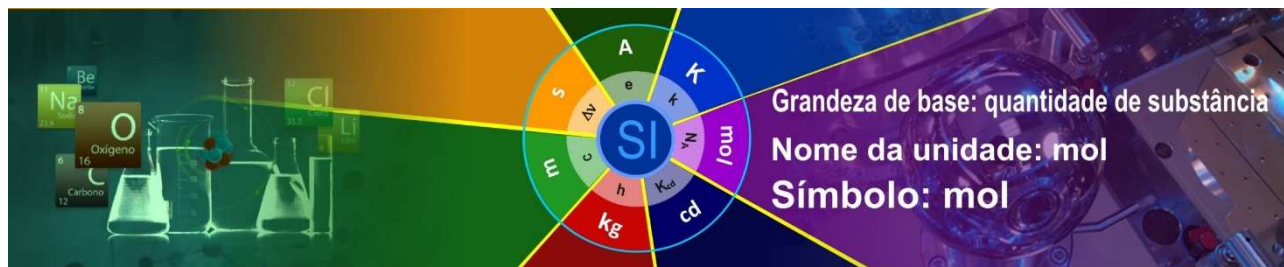
A definição da unidade de temperatura termodinâmica foi dada pela 10ª CGPM, em 1954, a qual selecionou o ponto triplo da água como o ponto fixo fundamental para essa unidade, sendo seu valor 273,16 K (0 °C).

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, $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, que é igual a $(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$.

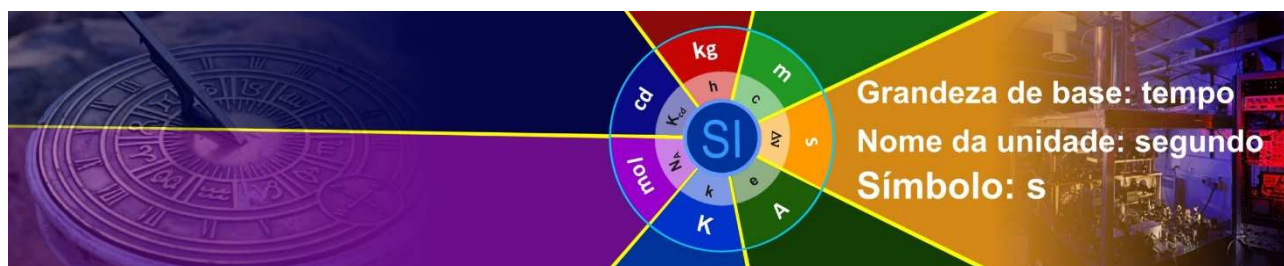


Em 1967, o CIPM forneceu a definição do mol, que foi confirmada em 1969 e adotada pela 14ª CGPM em 1971.

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, mol^{-1} .



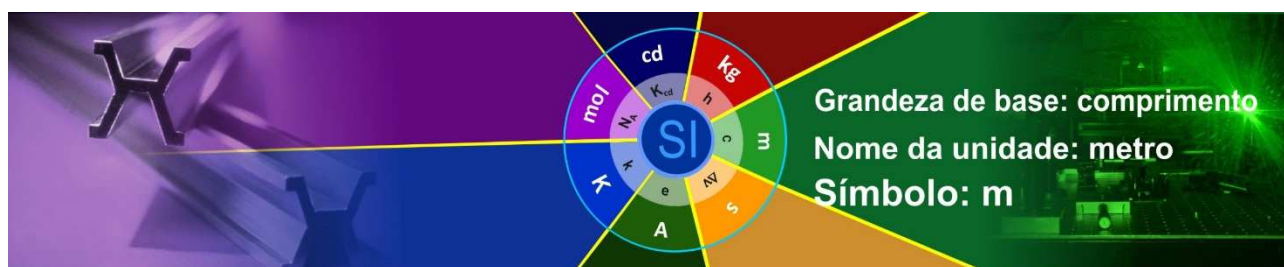
Definição anterior: o segundo, símbolo s, é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.

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, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, em 9 192 631 770, quando se expressa a unidade em Hz, igual a s^{-1} .



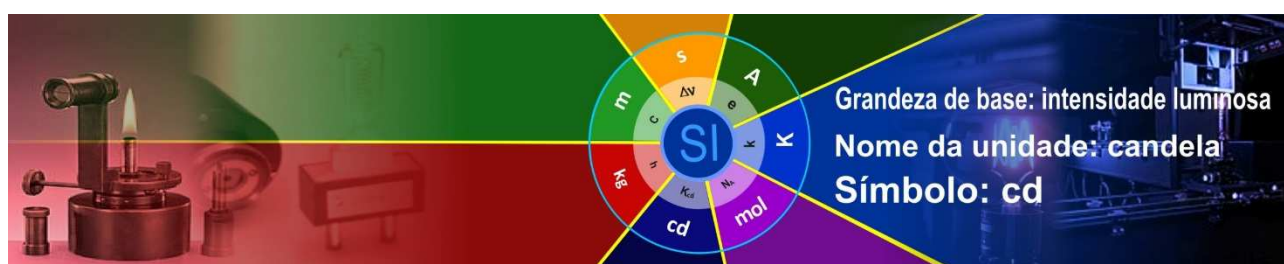
Inicialmente o metro foi definido por um decreto da Assembleia Nacional francesa, em 7 de abril de 1795, como sendo a décima milionésima parte de 1/4 do meridiano terrestre, tendo como base medidas realizadas entre as cidades de Dunkerque e Barcelona.

Em 1889, a definição foi fundamentada 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 m.s^{-1} , onde o segundo é definido em função da frequência de césio, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



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 540×10^{12} hertz e cuja intensidade energética naquela direção é 1/683 watt por esterradiano.

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 540×10^{12} Hz, k_{cd} , em 683, quando se expressa a unidade em lm.W^{-1} , igual a $\text{cd.sr.kg}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^3$ onde o quilograma, o metro e o segundo são definidos em função de h , c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Conclusão

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 no nosso dia-a-dia. A medição de energia, a balança do supermercado e a bomba no posto de gasolina vão funcionar exatamente da mesma maneira depois das 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 irão fornecer valores diferentes com as novas definições. Um dos requisitos mais importantes para a revisão do sistema de unidades, fundamental nas novas definições, é que isso ocorra sem problemas e sem causar qualquer interrupção nos serviços, na produção industrial e 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 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.

Referências

O texto tem como base as seguintes publicações.

- 1) “SI Sistema Internacional de Unidades”, 8ª edição (Revisada), Rio de Janeiro, 2007, ISBN 85-87-87090-85-2”, que é uma tradução da 7ª edição de 1998 do original “Le Système international d’unités” (em francês) ou “The International System of Units” (em inglês), BIPM.
- 2) PTB info sheet – “The new International System of Units (SI)” – 2019.
- 3) “A redefinição das unidades do Sistema Internacional, o SI”. Humberto Brandi. <https://asmetro.org.br/portalsn/2018/11/17/a-redefinicao-das-unidades-do-sistema-internacional-o-si/> - em 02/05/2019.

Autor: Gelson M. Rocha

Diretoria de Metrologia Científica e Tecnologia (DIMCI)
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)