

Possíveis mudanças no Sistema Internacional de Unidades (SI)

Humberto S. Brandi
Diretor de Metrologia Científica e Industrial
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro
Av. N. S. das Graças 50,
25.250-020 Xerém, Duque de Caxias, RJ

Periodicamente, os estados-membros do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), bem como países e economias associados, reúnem-se na Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), para discutir e examinar propostas elaboradas pelo Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), braço executivo do BIPM. Dentre outros aspectos, as reuniões da CGPM se dedicam a assegurar a disseminação e o aprimoramento do Sistema Internacional de Unidades (SI), especialmente por meio de discussões que endossem os resultados de novas determinações metrológicas fundamentais e de resoluções científicas no âmbito internacional.

Entre os dias 17 e 21 de outubro de 2011, realizou-se, em Paris, a 24ª CGPM. Entre as diversas resoluções tomadas nesta Conferência, uma trata especificamente de mudanças no SI, que poderão ser adotadas em um futuro próximo.

Das sete unidades de base do SI, apenas o quilograma ainda é definido em termos de um artefato material, o protótipo internacional do quilograma (um cilindro de platina irídio), o que implica em várias limitações importantes, entre as quais se destaca o fato da sua massa poder variar ao longo dos anos. Também, as definições do ampere, do mol e da candela que, como o quilograma, são unidades de base do SI, dependem do quilograma.

Esses foram alguns dos motivos pelos quais, durante a realização da 21ª CGPM, em 1999, foi recomendado que os *“laboratórios nacionais continuassem seus esforços, refinando os experimentos que relacionam a unidade de massa (1 kg) às constantes fundamentais, ou atômicas, visando uma futura redefinição do quilograma”*.

Desde então, muitos avanços foram feitos na direção de se adotar novas definições do quilograma, do ampere, do kelvin e do mol, em termos de constantes fundamentais.

- 1- Importantes progressos foram obtidos relacionando a massa do quilograma com a constante de Planck, h , através de métodos que incluem balanças de watt e medições da massa de um átomo de silício.
- 2- As incertezas de todas as unidades elétricas do SI, realizadas direta ou indiretamente através dos efeitos Josephson e Hall quântico, dos valores do SI das constantes de Josephson ($K_J=2e/h$) e de von Klitzing ($R_K=h/e^2$), poderiam ser significativamente reduzidas se o quilograma fosse redefinido de modo a associá-lo a um valor exato de h , e o ampere fosse redefinido de modo a associá-lo a um valor exato da carga elementar do elétron e .
- 3- O kelvin pode ser redefinido associando-o a um valor numérico exato da constante de Boltzmann k .
- 4- O mol pode ser definido associando-o a um valor exato da constante de Avogadro N_A e, portanto, independente da definição do quilograma.

- 5- As incertezas dos valores de outras importantes constantes fundamentais e dos fatores de conversão de energia desapareceriam ou seriam significativamente reduzidos se h , e , k , N_A , tivessem valores numéricos exatos, quando expressos em unidades do SI.

No entanto, apesar de todo o progresso realizado, nem todos os requisitos necessários para a redefinição das unidades do SI estão estabelecidos claramente e, desta forma, o (CIPM) não está em posição de apresentar uma proposta final.

Porém, uma explicação detalhada do que será provavelmente proposto foi apresentada à CGPM, pelo CIPM, cuja revisão do SI vislumbra um sistema de unidades no qual:

1. A frequência do desdobramento hiperfino do estado fundamental do átomo de céscio $133, \nu_{(133\text{Cs})_{\text{hfs}}}$ é exatamente 9 192 631 770 hertz,
2. A velocidade da luz no vácuo, c , é exatamente 299 792 458 metros por segundo
3. A constante de Planck, h , é exatamente $6.626\ 06\text{X} \times 10^{-34}$ joule segundo
4. A carga elementar e é exatamente $1.602\ 17\text{X} \times 10^{-19}$ coulomb,
5. A constante de Boltzmann k é exatamente $1.380\ 6\text{X} \times 10^{-23}$ joule por kelvin
6. A constante de Avogadro N_A é exatamente $6.022\ 14\text{X} \times 10^{23}$ mole⁻¹,
7. A eficácia luminosa K_{cd} da radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz é exatamente 683 lumen por watt,

onde:

- hertz, joule, coulomb, lumen, e watt, cujos símbolos Hz, J, C, lm, e W, respectivamente, são relacionados às unidades segundo, metro, quilograma, ampere, kelvin, mol, e candela, com símbolos s, m, kg, A, K, mol, e cd, respectivamente, de acordo com $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$, $\text{J} = \text{m}^2 \text{kg} \text{s}^{-2}$, $\text{C} = \text{s} \text{A}$, $\text{lm} = \text{cd} \text{m}^2 \text{m}^{-2} = \text{cd} \text{sr}$, and $\text{W} = \text{m}^2 \text{kg} \text{s}^{-3}$,
- o símbolo X na Minuta da Resolução da CGPM representa um ou mais dígitos adicionais a serem incluídos nos valores numéricos de h, e, k , e N_A , utilizando os ajustes mais recentes dos valores no CODATA, segue-se que o SI continuará a ter o atual conjunto de sete unidades de base, em particular:
 1. o quilograma continuará a ser a unidade de massa, mas seu valor será estabelecido fixando o valor numérico da constante de Planck exatamente igual a $6.626\ 06\text{X} \times 10^{-34}$ quando expresso em unidades do SI, $\text{m}^2 \text{kg} \text{s}^{-1}$, que é igual a joule segundo (Js)
 2. o ampere continuará a ser a unidade de corrente elétrica, mas seu valor será estabelecido fixando o valor numérico da carga elementar exatamente igual a $1.602\ 17\text{X} \times 10^{-19}$ quando expresso em unidades do SI, sA , que é igual a joule coulomb (C)
 3. o kelvin continuará a ser a unidade de temperatura termodinâmica, mas seu valor será estabelecido fixando o valor numérico da constante de Boltzmann exatamente igual a $1.380\ 6\text{X} \times 10^{-23}$ quando expresso em unidades do SI $\text{m}^2 \text{kg} \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, que é igual a $(\text{J} \text{K}^{-1})$,
 4. o mol continuará a ser a unidade de substância de uma entidade elementar especificada, que pode ser um átomo, molécula, ion, elétron, qualquer outra partícula ou um grupo especificado de tais partículas, mas seu valor será estabelecido fixando o valor numérico da constante de Avogadro exatamente igual a $6.022\ 14\text{X} \times 10^{23}$ quando expresso em unidades do SI, mol^{-1} .

A 24ª CGPM chama também a atenção que,

- as novas definições propostas para o quilograma, ampere, kelvin e mol são intencionalmente do tipo constante-explicita, isto é, uma definição em que a unidade é definida indiretamente, através da especificação explícita do valor exato de uma constante fundamental, amplamente reconhecida,
- a definição atual do metro é associada diretamente a um valor exato da velocidade da luz no vácuo, que também é uma constante fundamental amplamente reconhecida,
- a atual definição do segundo é associada diretamente a um valor exato de uma propriedade do átomo de césio, o que também é um invariante da natureza,
- embora a definição atual da candela não esteja associada a uma constante fundamental, pode ser vista como associada a um valor exato de um invariante da natureza,
- a compreensão do SI seria facilitada adotando uma descrição semelhante para todas unidades de base.

O CIPM também proporá uma reformulação das atuais definições do segundo, metro, candela, nos seguintes termos:

5. o segundo símbolo s é a unidade de tempo; seu valor é obtido fixando-se o valor numérico da frequência do desdobramento hiperfino do átomo de césio 133, em repouso e à temperatura de 0 K , exatamente igual a $9\,192\,631\,77$ quando expressa em unidades do SI, s^{-1} , que é igual ao Hz ,
6. o metro símbolo m é a unidade de comprimento; seu valor é obtido fixando-se o valor numérico da velocidade da luz no vácuo, exatamente igual a $299\,792\,458$ quando expressa em unidades do SI, ms^{-1} ,
7. a candela símbolo cd é a unidade de intensidade luminosa em uma dada direção; seu valor é obtido fixando-se o valor numérico da eficácia luminosa da radiação monocromática de frequência $540 \times 10^{12}\text{ Hz}$, exatamente igual a 683 quando expressa em unidades do SI, $m^2kg^{-1}s^3cd\text{ sr}$, ou $s^3cd\text{ srW}^{-1}$

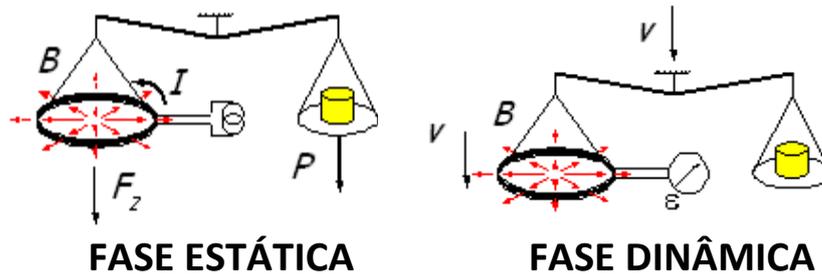
Desta forma, as definições de todas as sete unidades de base estão associadas naturalmente ao conjunto das sete constantes definidas acima.

Referências

1- <http://www.bipm.org/>

2- http://www.bipm.org/utis/en/pdf/Press_release_resolution_1_CGPM.pdf

A BALANÇA DE WATT



FASE ESTÁTICA

Uma espira de comprimento L , na qual circula uma corrente I , é colocada em um campo magnético uniforme B , de tal modo que a força eletromagnética exercida na espira está na direção vertical, F_z . A espira e uma massa m , estão suspensas em uma balança. A corrente I , na espira, é escolhida de modo a que a força eletromagnética na espira compense o peso desta massa.

$$F = B L I = m g \quad (1)$$

FASE DINÂMICA

A mesma espira move-se, no campo magnético B , com velocidade vertical, v , induzindo uma tensão ε , igual a variação do fluxo de B através da espira,

$$\varepsilon = - d\Phi/dt = - B L (dz/dt) = - B L v \quad (2)$$

Se o campo B , o comprimento L , e seus alinhamentos relativos, permanecem inalterados nas duas fases, usando (1) e (2) pode-se eliminar BL

$$m g v = \varepsilon I \quad (3)$$

Esta relação, que equaciona a potência elétrica com a potência mecânica, está na origem do nome da experiência, pois a unidade de potência é o watt.

Experimentalmente, a corrente I é obtida usando-se a lei de Ohm, medindo-se a diferença de potencial, ΔV causada nos terminais de uma resistência R , devido a circulação da corrente na espira.

$$m g v = \varepsilon \Delta V / R \quad (4)$$

Para estabelecer a relação entre a massa macroscópica m e a constante de Planck, h , a voltagem e a corrente são medidas usando-se dois efeitos quânticos macroscópicos, os efeitos Josephson e Hall quântico. Esses efeitos são atualmente utilizados por muitos Institutos Nacionais de Metrologia para medições muito acuradas do volt e do ohm.

Se uma junção supercondutor-isolante-supercondutor é submetida a uma radiação de alta frequência, cuja frequência é f , o efeito Josephson, permite determinar a voltagem ε como uma combinação da constante de Planck, a carga elementar (a constante de Josephson, K_J), e a frequência f ,

$$\varepsilon \approx f_1 h/2e = \varepsilon_1 f_1/K_J \quad (5)$$

$$U \approx f_2 h/2e = U_1 f_2/K_J \quad (6)$$

Por outro lado, o efeito Hall quântico, que é a quantização da resistência Hall de um gas de elétrons bi-dimensional, permite determinar a resistência R como um múltiplo adimensional R_1 de uma outra combinação da constante de Planck e da carga elementar, a constante de von Klitzing

$$R = R_1 h/e^2 = R_1 R_K \quad (7)$$

Portanto, determinando os valores de ε , U , R em termos de (5), (6) e (7), a massa pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} m &= \varepsilon \Delta V / (gvR) = (\varepsilon_1 U_1 f_1 f_2) / (gv R_1 R_K K_J^2) = 1/gv \cdot (\varepsilon_1 U_1 f_1 f_2) / R_1 \cdot 1 / (R_K K_J^2) \\ &= [4A/(gv)] \cdot h \end{aligned} \quad (8)$$

A expressão (8) relaciona m com h .

Referências

- 1- http://www.bipm.org/en/scientific/elec/watt_balance/wb_principle.html
- 2- <http://www.french-metrology.com/en/feature/watt-balance.asp>
- 3- http://www.bipm.org/en/scientific/elec/watt_balance/

A ESFERA DE SILÍCIO – PROJETO AVOGADRO

A proposta do Projeto Avogadro é redefinir o quilograma em termos da constante de Avogadro.

Por definição, 12 gramas é exatamente o peso correspondente ao número de Avogadro de átomos de Carbono-12 (^{12}C). Portanto, o quilograma poderia ser definido como a massa de 1000/12 vezes o número de Avogadro de átomos de ^{12}C . A constante de Avogadro é a razão entre a massa molar e a massa de um átomo. Para determinar a constante de Avogadro, a escolha recaiu no Silício, que pode ser obtido em forma de um grande monocristal, com elevado grau de pureza.

Para esta estrutura cristalina, a massa molar M , o número de átomos n e o volume V_0 de uma célula unitária são conhecidos. A massa do cristal, m , pode ser obtida através da constante de Avogadro, N_A , e da determinação do seu volume, V .

$$m = (M/N_A) \cdot (V \cdot n / V_0) \quad (9)$$

A expressão (9) representa a massa de um átomo multiplicada pelo número de átomos no cristal.

A constante de Avogadro pode ser expressa em termos da densidade $\rho = N_A/V$

$$N_A = (M/\rho) / (V_0/n) \quad (10)$$

Para determinar a constante de Avogadro é utilizada uma esfera de monocristal de Silício polida, de 5 kg, cuja densidade é calculada a partir de sua massa m (usando a atual definição de massa) e do seu volume V (medindo o diâmetro e a esfericidade da esfera).

Este método reduz-se a medir N_A com uma incerteza de 1 parte em 10^8 que é a incerteza na atual definição do quilograma.

Um importante avanço no projeto Avogadro foi recentemente alcançado com a ajuda de um mono cristal de ^{28}Si altamente enriquecido (99.99%). A constante de Avogadro foi medida com uma incerteza relativa de $3 \cdot 10^{-8}$, nunca obtida anteriormente, utilizando, no Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) um novo método de espectrometria de massa para determinação da massa molar. Dentro do objetivo da redefinição do quilograma, o valor $N_A = 6.02214078(18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ permite a mais exata realização desta unidade, no momento.

Referências

1. <http://www.acpo.csiro.au/avogadro.htm>
2. <http://www.npl.co.uk/engineering-measurements/mass-force-pressure/mass/research/avogadro-project>
3. <http://www.ptb.de/cms/index.php?id=2664&L=1>