



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Revisitando o Sistema MKS/SI: Quilograma (kg).

Nos dois verbetes anteriores, investigamos a evolução das definições de **metro** e de **segundo**. Suas últimas definições, de 1983 e 1967, respectivamente, até o presente momento (outubro de 2011), são consideradas como as únicas. Neste verbete, trataremos da história da definição do **quilograma**, que ainda se encontra em discussão.

A primeira definição da unidade de massa foi a seguinte: - *O quilograma (kg) é a massa de um (1) decímetro cúbico ($1\text{dm}^3 = 10^{-3}\text{ m}^3$) de água com densidade máxima (4°C).*

No entanto, como o volume da água varia com a sua pureza, em 1878, o *Comitê Internacional sobre Pesos e Medidas* (CIPM) construiu o primeiro padrão do **quilograma**: - *É a massa de um cilindro equilátero, de 39 mm de altura e 39 mm de diâmetro, construído de uma liga de 90% de platina (Pt) e 10% de irídio (Ir).* Esse padrão [depositado no *Museu Internacional de Pesos e Medidas* (MIPM), localizado em Sèvres, próximo de Paris], que correspondia à massa de um (1) decímetro cúbico de água na densidade máxima, foi tomado como a unidade universal de massa por ocasião da 1^a. *Conferência Geral de Pesos e Medidas* (CGPM), em 1889, e apresentava uma precisão de uma parte em 109. Mais tarde, contudo, foi observado que na construção desse padrão havia um erro de 28 partes em 10^6 .

Com a diminuição da massa do padrão do kg, calculada como sendo da ordem de $5 \times 10^{-11}\text{ kg}$, devido à sublimação de gases incorporados ao padrão por ocasião de sua fabricação, os metrologistas procuram uma nova definição de **quilograma**, desta vez em termos de uma constante física, como foi feito com o **metro** e com o **segundo**, a partir da década de 1950, conforme vimos nos dois verbetes anteriores. Porém, para o kg, somente a partir da década de 1970, é que várias propostas foram então apresentadas para essa nova definição, como se pode ver nos sites: pt.wikipedia.org/wiki/Quilograma; www.sciencedaily.com/releases. Vejamos quais são elas. Em 1973 (*Metrologia* 9, p. 21), B. N. Taylor propôs a seguinte definição: - *O quilograma é a massa de exatos $N_A/0,012$ átomos de carbono-12 (${}^{12}_6\text{C}$) em repouso.* Nessa definição, $N_A = 6,02214179 \times 10^{23}/\text{mol}$, é o conhecido **número (constante) de Avogadro**. Note-se que, em 1900 [*Grundriss der allgemeinen Chemie* (Leipzig: Engelmann)], o químico alemão Friedrich Wilhelm Ostwald (1853-1932; PNQ, 1909) propôs a seguinte definição: - *Mol (mole) é o peso molecular de uma substância expresso em gramas.* Em 1917 [*Grundriss der allgemeinen Chemie* (Dresden: Steinkopff)], ainda Ostwald definiu o **mol** como: - *A quantidade de qualquer gas ideal que ocupe o volume de 22.414 ml, em condições normais de pressão e temperatura.* Em 1960, quando foi criado o SI por ocasião da 11^a. *Conferência Geral de Pesos e Medidas* (CGPM), realizada em Paris, o **mol** recebeu esta definição: - *É a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 kg de carbono-12.* Observe-se que, em 2006, o *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) do *Council of Scientific Unions* (ICSU), encontrou que: $N_A = (6,02214179 \pm 0,00000030) \times 10^{23}/\text{mol}$. {Francisco Caruso e Vitor Oguri, **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (Campus, 2006); Peter J. Mohr, Barry N. Taylor and David B. Newell, *arXiv:0801.0028v1* [physics.atom-ph] 28 December 2007}.

No site sobre o **quilograma** referido anteriormente, encontramos mais duas definições para essa unidade de massa, que são: 1) - *O quilograma é a unidade básica de*

massa, igual a 1.097.769.238.499.215.084.016.780.676.223 unidades de massa do elétron (m_e). Essa definição relaciona-se com m_e , apresentada pelo CODATA, em 2006 (Mohr, Taylor and Newell, op. cit.), como tendo o seguinte valor: $m_e = (9,10938215 \pm 0,00000045) \times 10^{-31}$ kg; 2) – O **quilograma** é a massa que será acelerada precisamente a 2×10^{-7} m/s² quando submetida a uma força (massa \times aceleração) por metro linear entre dois fios condutores retilíneos, paralelos, de comprimento infinito e de secções retas desprezíveis, no vácuo, distantes entre si de um metro (1 m), por onde passa uma corrente elétrica constantes de exatos 6.241.509.479.607.717.888 ampères [1 ampère (A) = coulomb/segundo].

Sobre a definição acima, é necessário fazer um comentário. Ela decorre da definição de A que, por sua vez, decorre da unidade exata de **carga elétrica** (e). Antes do conhecimento da relação entre **carga elétrica** e **elétron** [o que só aconteceu em 1897, com as experiências do físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), segundo vimos em verbete desta série], a definição de carga elétrica decorria do estudo da **eletrólise**, que foi desenvolvida pelo físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), em 1833, também conforme vimos em verbete desta série. Assim, a carga elétrica Q liberada por z íons [cada íon de massa (m)], de um metal (de massa molecular M) sob a ação de uma corrente elétrica é dada por: $Q = F m z/M$, onde F é a **constante de Faraday** (carga/mol) e a corrente elétrica correspondente, era definida por: - O **ampère** é a corrente elétrica necessária para depositar 0,001 118 00 grama de prata (Ag) de uma solução de nitrato de prata ($AgNO_3$) em um segundo. Observe-se que, em 2006 (Mohr, Taylor and Newell, op. cit.), CODATA indicou que e tivesse o seguinte valor: $e = (1,602 176 487 \pm 0,000000040) \times 10^{-19}$ coulomb.

Outra tentativa de definir o **quilograma** é por intermédio da **constante de Planck** [h (= energia \times frequência)] e da **velocidade da luz** [c (= m/s)]. Existem duas maneiras de apresentar essa definição: 1) a que está oficialmente em andamento, usando o **Efeito Josephson** (EF) (1962) (vide verbete nesta série) e o **Efeito von Klitzing** (EK) ou **Efeito Hall Quantizado Inteiro** (1980) (vide verbete nesta série); 2) e uma conjectural por intermédio do **Efeito Fotoelétrico** e da **Relatividade Restrita**, ambos de 1905. Vejamos a primeira maneira. Em 1975, B. J. Kibble do *National Physical Laboratório* (NPL), na Inglaterra, propôs um tipo de experiência, hoje conhecida como **Balança Watt** (BW), que compara medidas de potência elétrica e mecânica. Nessa experiência, uma bobina (*coil*) é suspensa em um prato de uma balança e colocada nas proximidades de um ímã permanente que produz um campo de indução magnética (B) constante. A experiência é realizada em duas etapas: na primeira, uma corrente elétrica (I) flui na bobina fixa de comprimento L e, em consequência da **força de Lorentz** (ILB) (ver verbete nesta série), ela é forçada para baixo, que é contrabalançada pela ação da aceleração da gravidade (g) sobre uma massa (M) colocada no outro prato da balança, resultando na igualdade: $M g = I L B$; na segunda etapa, a bobina é deslocada com uma velocidade (v) constante na região de B, que lhe induz uma voltagem $V = v L B$. Eliminando-se LB entre as duas medidas, resulta que: $V I = M g v$. Esta equação indica uma igualdade entre duas potências: elétrica (VI) e mecânica (energia potencial na unidade de tempo: $M g h/t = M g v$). É oportuno destacar que a igualdade entre as potências destacada acima é apenas virtual, pois ela envolve grandezas (V, I, v) que são medidas em diferentes fases e não considera a perda de potência (p.e.: fricção mecânica) devido ao deslocamento da bobina. Ela é apenas uma igualdade dimensional. Os primeiros resultados da BW foram apresentados, em 1976 [B. J. Kibble, *IN*: J. H. Sanders and A. H. Wapstra, **Atomic Masses and**

Fundamental Constants, V5 (Plenum Press, p. 545)]; em 1988 (*NPL Report DES 88*) e 1990 (*Metrologia* **27**, p. 173), por Kibble, I. A. Robinson e J. H. Belliss; e, em 1991 (*Proceedings of the IEE A138*, p. 187), por Kibble. [Arlie Bailey, **Units, Standards and Constants. IN**: Laurie M. Brown, Abraham Pais and Sir Brian Pippard (Editors), **Twentieth Century Physics II** (Institute of Physics Publishing and American Institute Physics Press, 1995); Michael Stock, **Watt Balances and the Future of the Kilogram** (*Simposio de Metrología, Centro Nacional de Metrología* (CENAM), 25-27 Octubre 2006, México)].

Da expressão resultante da BW, pode-se definir o **quilograma** por intermédio da equação: $M = V I / g v$. Por outro lado, segundo a **lei de Ohm** (vide verbete nesta série), tem-se: $V = R I$, portanto: $M = [V^2 / (R)] / (g v)$. As unidades de g e v valem, respectivamente, m/s^2 e m/s , então: $g v = (m/s)^2 / s$. Ora, conforme vimos nos dois verbetes anteriores, as unidades de m e s , em função de constantes físicas [respectivamente: velocidade da luz (c) no vácuo e transições quânticas do átomo de césio-133 (${}_{55}\text{Cs}^{133}$)], já estão definidas. Portanto, para encontrar a definição de **quilograma** em função de constantes físicas, deveremos procurar a relação de V (potencial elétrico) e de R (resistência elétrica) com alguma constante física. Tal relação (com h e e) foi conhecida por intermédio do EF e do EK, segundo referimos acima. O EJ reproduz uma voltagem (V) na passagem de uma corrente contínua (CC) ou alternada (CA) através de uma junção entre dois supercondutores irradiada com microondas de frequência f , voltagem essa que é dada pela expressão: $V = n f / K_J$, com $n = 1, 2, 3, \dots$, sendo $K_J = 2e/h$, chamada **constante de Josephson**. Por sua vez, o EK reproduz uma resistência elétrica (R) usando o fluxo de um gas de elétrons bi-dimensional em um campo magnético forte, dada pela expressão $R = R_K / i$, onde $i = 1, 2, 3, \dots$, sendo $R_K = h/e^2$ ($= \mu_0 c / 2\alpha$; $\alpha \approx 1/137$, é a **constante de estrutura fina** e μ_0 é a **permeabilidade magnética** do vácuo), denominada de **constante de von Klitzing**.

Usando os valores de V e de R vistos acima, poderemos encontrar que: $V^2 / R = (n f / K_J)^2 / (R_K / i)$ e, então: $M = h [(i n^2 / 4) f^2 / (g v)] = h [C_{JK} f^2 / (g v)]$. Ora, como C_{JK} é uma constante numérica e a unidade da expressão $f^2 / (g v)$ vale $(1/s^2) / [(m/s)^2 / s] = 1/(m^2 s)$ - que depende das unidades de **metro** (m) e **segundo** (s) já padronizadas (vide os verbetes anteriores) -, a padronização da unidade SI de M [**quilograma** (kg)] depende apenas de h . Essa padronização discutida por ocasião do *Royal Society Discussion Meeting: The new SI*, ocorrido entre 24-25 de janeiro de 2011, conforme se pode ver no trabalho intitulado **The watt balance: determination of the Planck Constant and redefinition of the kilogram** apresentado, nessa Reunião, pelo físico alemão Michael Stock, do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM). Assim, em vista da dependência de M com h , então, uma possível definição de **quilograma** será: - *A unidade de massa, o quilograma, é tal que a constante de Planck (h) tem, exatamente, o seguinte valor:*

$$h = (6,62606896 \pm 0,00000033) \times 10^{-34} \text{ J.s } (= \text{ kg.m}^2/\text{s}).$$

É interessante destacar que a dependência de R_K com h e e ($= h/e^2$) foi confirmada e refinada em setembro de 2011 (*New Journal of Physics* **13**, no. 093026) por T. J. B. M. Janssen, N. E. Fletcher, R. Goebel, J. M. Williams, A. Tzalenchuk, R. Yakimova, S. Kubatkin, S.

Lara-Avila e V. I. Falko realizando uma experiência na qual calcularam a resistência elétrica (R) do grafeno (ver verbete nesta série) e da heteroestrutura GaAs/A_{1-x}GaAs (ver verbete nesta série), e encontraram o seguinte resultado: $(R_h - R_g)/R_K = (-4,7 \pm 8,6) \times 10^{-11}$.

Por fim, concluindo este verbete, vejamos a definição especulativa de **quilograma**, ainda usando o *site* sobre essa unidade de massa. Com efeito, em 1905 (*Annalen der Physik* **17**; **18**, p. 891; 639), o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) propôs que um corpo em repouso (de massa m_0) possui energia dada por: $E_0 = m_0 c^2$. Por outro lado, em 1900 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* **2**, p. 237), o físico alemão Max Karl Ernest Planck (1858-1947; PNF, 1918) propôs que a energia (E) de uma radiação é dada por: $E = h \nu$, onde ν é a frequência da radiação, dada em Hz [= número de oscilações por segundo (1/s)]. Assim, levando esses valores na expressão de E_0 , teremos: $h \nu_0 = m_0 c^2$ e, portanto, $m_0 = h \nu_0 / c^2$. Assim, usando o SI, podemos escrever que:

$$m_0 = 6,62606896 \times 10^{-34} \text{ joule.segundo (J.s = kg.m}^2\text{/s}^2\text{) hertz (Hz)}$$

$$= 1/\text{s} / \{ [299.792.458^2 (= \text{m}^2/\text{s}^2)] \} \text{ kg.}$$

Dessa expressão, podemos dizer que: - **O quilograma é massa de repouso cuja energia corresponde a exatos: $299.792.458^2 \times 6,62606896 \times 10^{-34}$ Hz.** É interessante notar que, em 2006 (Mohr, Taylor and Newell, op. cit.), o CODATA encontrou que: $h = (6,62606896 \pm 0,00000033) \times 10^{-34}$ J.s.

Sobre a definição acima, é oportuno fazer o seguinte comentário. Ela é baseada na conjectura (vide verbete nesta série) de que um corpo em repouso (com m_0) tem também associado a ele uma onda de broglieana de repouso (de frequência ν_0) e momento linear de repouso dado por $p_0 = h/\lambda_0 = hc/\nu_0$.



ANTERIOR

SEGUINTE