

A redefinição do quilograma, passado presente e futuro

Pedro Conceição¹

¹ Bureau International des Poids et Mesures
pedro.conceicao@bipm.org

Resumo

Em 2018, a definição do quilograma no sistema internacional de unidades (SI) foi revista e, em 2019, a unidade de massa vai ser definida em função de uma constante universal, a constante de Planck. A presente definição, adoptada em 1889, define o quilograma a partir da massa de um artefacto, a massa do protótipo internacional do quilograma (IPK), medida imediatamente após a sua limpeza e lavagem, que se encontra num cofre no laboratório de Massa do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM). É a única unidade que ainda se encontra definida por um objecto, contrariando a base filosófica que foi pensada aquando da criação do SI, de construir um sistema universal de unidades imutáveis e reproduzíveis em qualquer parte do Mundo. Duas realizações experimentais foram seleccionadas para redefinir o quilograma em função da constante de Planck: balança do watt (ou balança de Kibble) e medições da densidade cristalina por intermédio de raios X (*x-ray crystal density* - XRCd). O sucesso da redefinição só foi possível quando ambas as experiências apresentaram consistência entre os resultados, com incertezas compatíveis com os requisitos propostos pelo Comité Consultivo para a Massa e Grandezas Derivadas. A nova redefinição irá alterar profundamente a estrutura do SI e, com ela, novos desafios se levantam. Este artigo descreve resumidamente os passos dados até à nova definição, o seu impacto na comunidade metrológica científica e desafios futuros que podemos esperar.

1. Introdução

Durante cerca de 130 anos, a definição do quilograma esteve ligada a um artefacto, correspondendo ao valor da massa do protótipo internacional do quilograma (IPK), e assim continuará até maio de 2019. Embora esta definição tenha servido os interesses da comunidade científica durante mais de um século, tornou-se imperativo uma mudança para acompanhar o progresso científico cada vez menos tolerável a uma definição, ainda que exata em termos conceptuais, pouco credível em termos de definição universal não imutável.

Os esforços para alterar esta definição iniciaram-se há cerca de 40 anos e intensificaram-se nestas duas últimas décadas. Com efeito, estima-se que o valor da massa do IPK terá sofrido perdas desde a sua criação [1]: os resultados de comparações realizadas entre as cópias oficiais depositadas em Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) e o protótipo internacional do quilograma demonstraram divergências ao longo do tempo, em cerca de 35 μg [1] desde a sua primeira calibração há mais de 100 anos atrás... e, independentemente dessas perdas, a definição do quilograma continuou a ser exatamente a mesma. Qualquer alteração que ocorresse no IPK implicaria sempre um reajustamento de todas as medições de que dependem do seu valor.

Outro problema da atual definição é a sua realização ser possível apenas num local, i.e. no BIPM, onde se encontra armazenado o IPK: isso choca com a ideia base do SI de construir um sistema universal de unidades cujas definições sejam possíveis de serem reproduzidas em qualquer parte do Mundo.

Agora, ao fim de mais de um século, em maio de 2019, tudo irá mudar e o quilograma passará a ser definido em função de uma constante universal.

Assim, de acordo com o anexo 3 da resolução 1 da 26.ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) de 2018 [2], o quilograma define-se por:

« O quilograma, símbolo kg, é a unidade SI da massa. É definido fixando o valor numérico da constante de Planck h em $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, quando expressa em unidades J s, que é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, com o metro e o segundo definidos em função de c (velocidade da luz) e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (frequência de transição hiperfina do cézio) ».

Na prática, a CGPM fixou, em novembro de 2018, o valor da constante de Planck, o quantum de energia, em $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s, este valor não devendo sofrer mais alterações no futuro.

O quilograma ficará então definido em função de

uma constante universal, a constante de Planck. Porque definir o quilograma em função da constante de Planck?

Em termos conceptuais, a constante de Avogrado seria uma candidata perfeita. A definição do quilograma poderia ser feita simplesmente tendo por base um determinado número de átomos de carbono 12.

Existem porém varias razões para optarmos por uma via menos intuitiva e preferir a constante de Planck [3]:

- a revisão do SI não implicará apenas a redefinição do quilograma, o ampere será redefinido fixando o valor da carga elementar e . Deste modo, ambos os valores de h e e serão valores exatos finais e, por consequência, a constante de von Klitzing ($R_K = \frac{h}{e^2}$) e a constante de Josephson ($K_J = \frac{2e}{h}$), usadas para a medição de grandezas elétricas de alta exatidão, terão também valores exatos;

- ao fixarmos a constante de Planck para a definição do quilograma, permitimos que o número de Avogrado seja fixado livremente para a definição da mole, tal como proposto no novo SI;

- do ponto de vista da Física, a constante de Planck conceptualmente tem um papel mais importante e central que o número de Avogrado. É uma constante fundamental da mecânica quântica e existe por isso um grande interesse em fixar o respetivo valor, tal como se fez por exemplo com a velocidade da luz na redefinição do metro.

2. Redefinição do quilograma

O mapa de trabalho para a redefinição do quilograma foi estabelecido em 2013 em conjunto pelo Comité Consultivo da Massa e grandezas derivadas (CCM) e o Comité Consultivo das Unidades (CCU).

O CCM estabeleceu quatro condições para se estabelecer a redefinição [4]:

- 1 – A existência de três medições independentes da constante de Planck realizadas por dois métodos diferentes com incertezas-padrão relativas menores que 5 partes por 10^8 ;

- 2 – Pelo menos, uma das medições deveria ter uma incerteza-padrão relativa de 2 partes por 10^8 ;

- 3 – A obrigatoriedade de todos os padrões utilizados nas experiências estarem diretamente rastreados à mesma referência;

- 4 – Os participantes da validação da realização prática do quilograma no novo SI assumem um mesmo valor para a constante de Planck e determinam a massa de um conjunto de padrões circulantes que serão enviados para o BIPM que funcionará como laboratório piloto e cujos valores serão comparados.

Dois métodos foram seleccionados para as realizações das medições: o método para determinação das estruturas cristalinas por raios X (ou *x-ray-crystal-density*, XRCD) e a utilização de uma balança do watt (ou *Kibble balance*, em homenagem ao inventor da balança, Bryan Kibble).

2.1 Método para determinação de estruturas cristalinas por difração de raios-X

O método XRCD [5] foi utilizado até então para a determinação do número de Avogrado através da contagem do número de átomos num cristal enriquecido de silício ^{28}Si [5]. Seria portanto possível utiliza-lo para a determinação da massa de uma esfera de Si com o valor de 1 kg. O valor da constante de Planck obtém-se através da seguinte relação [5]:

$$N_A = \frac{M(X)}{m(X)} = \frac{M_u A_r(X)}{h} \left(\frac{h}{m(X)} \right)$$

Em que $M(X)$ e $A_r(X)$ representam a massa molar e a massa atômica relativa do átomo X, $M_u = 0,001 \text{ kg mol}^{-1}$, a constante da massa molar, e $m(X)$ a massa do átomo X.

Apesar de a realização da unidade pela contagem de átomos numa esfera de silício em termos conceptuais ser mais intuitiva e direta, o processo de fabricação de uma esfera de silício exige varias estruturas de apoio ao seu fabrico, tornando-se num método bastante exigente em termos de recursos necessários para a sua realização.

2.2 Balança do watt

A balança do watt [6] foi inventada no *National Physical Laboratory* (NPL), o LNM do Reino Unido, em 1975 por Bryan Kibble. A sua utilização permite relacionar grandezas mecânicas com grandezas elétricas.

Essa relação é obtida graças a uma bobina elétrica suspenso num braço da balança quando submetida a um campo magnético de alta intensidade.

As medições são feitas em dois modos de funcionamento [6]: o modo de pesagem e modo de movimento.

No modo de pesagem, o peso Mg de uma massa M é contrabalançado por uma força vertical gerada por uma corrente elétrica I que percorre uma bobina de comprimento l num meio sob a ação de campo magnético B .

Ao atingir-se o equilíbrio, obtém-se [6]:

$$Mg = B l I$$

No modo de movimento, a massa é removida e a bobina é movimentada no mesmo campo magnético com uma velocidade v , induzindo uma tensão elétrica na bobina igual a $U = B l v$.

Assumindo que o produto $U I$ é constante, obtém-se a relação entre grandezas mecânicas e elétricas [6]:

$$U I = M g v$$

De referir que a balança do watt não faz uma conversão direta entre energia elétrica e energia mecânica. Existem sempre processos dissipativos (fricção, etc.) durante uma

medição.

A medição da tensão elétrica e da resistência elétrica percorrida pela corrente elétrica é feita por intermédio do efeito Josephson e efeito Hall quântico e, através destes, é possível relacionar a constante de Planck com a massa utilizada no modo de pesagem.

2.3 Resultados de ambas as realizações experimentais

Os resultados publicados das diferentes realizações experimentais para a determinação dos valores da constante de Planck e da constante de Avogadro encontram-se descritos na Figura 1 [4].

A menor incerteza foi obtida pelo *National Research Council of Canada* (NRC), o LNM do Canadá, com 18 partes em 10^9 .

Em comparação, resultados recentes relativos ao projeto Avogadro apresentam uma incerteza de 20 partes em 10^9 , e o valor publicado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), o LNM dos Estados Unidos da América, possui uma incerteza da ordem de 34 partes em 10^9 [4].

As linhas verticais a cinzento correspondem aos valores recomendados presentemente pelo grupo de trabalho das constantes fundamentais do *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA).

Os valores obtidos estão em concordância, dentro do que foi exigido pelo CCM e a primeira e segunda condição foram satisfeitas.

A terceira condição foi satisfeita através das chamadas ‘calibrações extraordinárias’, tendo sido usado como referência padrão o IPK, que foi usado pela primeira vez, nos últimos 22 anos.

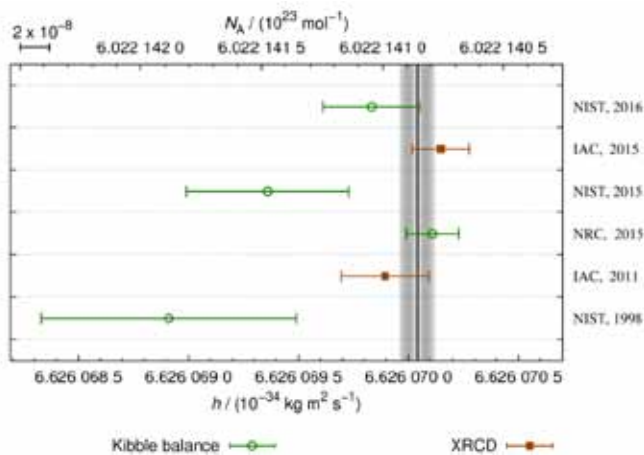


Fig. 1 - Determinação da constante de Planck e da constante de Avogadro e respectivas incertezas [4]

Foram calibradas as cópias oficiais do BIPM e de diversos protótipos internacionais do kilograma, que foram usados mais tarde nas diferentes medições.

A quarta e última condição foi obtida através de um estudo piloto, coordenado pelo BIPM, em que todos os participantes assumiram um mesmo valor para a cons-

tante de Planck e usaram-no para a realização do kilograma, transferido para um conjunto de padrões de massa que circularam entre os diversos participantes.

Os resultados foram bastante satisfatórios, tendo sido demonstrada concordância entre os resultados para 4 dos 5 participantes [11].

3. Qual o impacto desta alteração no atual SI ?

Presentemente o SI é formado por 7 unidades de base: o metro, o segundo, o kilograma, o ampere, o kelvin, a mole e a candela. A redefinição do kilograma irá alterar profundamente a estrutura do SI e, a partir desse momento, todas as unidades de base passarão a estar definidas por uma constante. Para a sua realização prática, porém, no caso do kilograma, serão necessárias três constantes. Na tabela 1, podemos ver a nova estrutura do SI tendo por base as definições das unidades de base:

Constantes (1)	k	N_A	e	K_{cd}	$\Delta\nu_{Cs}$	c	h
Unidades base (2)	K	mol	A	cd	s	m	kg

Tabela 1 - Nova estrutura do SI: dependência da unidades de base de constantes fundamentais. (1) Constantes usadas para a realização das unidades: constante de Boltzmann, constante de Avogadro, carga elementar, eficácia luminosa, frequência hiperfina de transição do célio, velocidade da luz no vácuo, constante de Planck (da esquerda para a direita); (2) Unidades de base : kelvin, mole, ampere, candela, segundo, metro e kilograma.

O que irá mudar em termos de rastreabilidade à unidade da massa, o kilograma?

Antes da redefinição, esta unidade era dada unicamente pelo BIPM, através do protótipo internacional (IPK), segundo a figura 2:

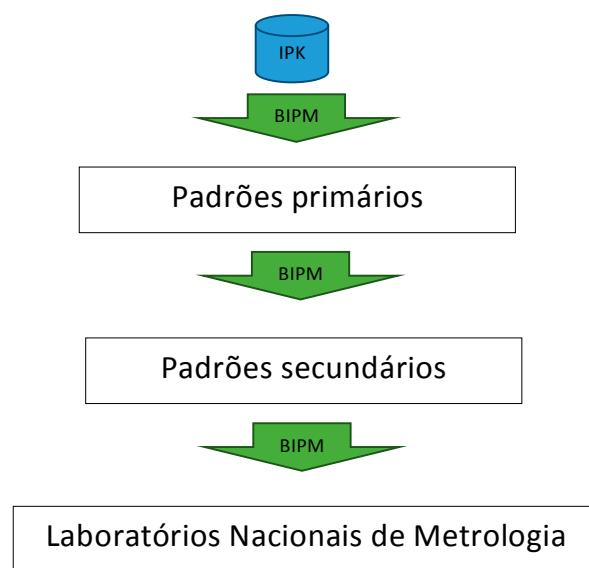


Fig. 2 - Determinação do valor da unidade kilograma” nos Laboratórios Nacionais de Metrologia, até 20 de maio de 2019

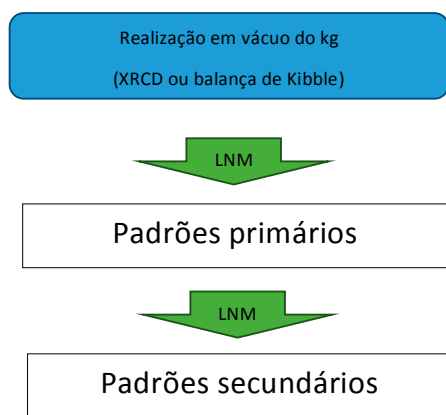


Fig. 3 - Determinação do valor da unidade quilograma nos Laboratórios Nacionais de Metrologia, após 20 de maio de 2019

Apos a redefinição, a rastreabilidade à unidade o quilograma poderá ser em teoria dada por qualquer Laboratório Nacional de Metrologia que tenha meios para realizar a redefinição [7] segundo apresentado na Figura 3.

Mas tal configuração não acontecerá no imediato. Existirá primeiro um período de transição [8] em que o BIPM irá organizar uma comparação internacional entre diversas realizações primárias para ser determinado um valor consensual para o quilograma.

Um Laboratório Nacional de Metrologia, que tenha capacidade para realizar a definição do quilograma e queira calibrar os seus padrões de massa usando unicamente os seus próprios meios, terá sempre de usar o valor determinado por esta comparação ('*consensus value*') na sua realização prática [8].

Os Laboratórios Nacionais de Metrologia, que não tenham capacidade para realizar a nova definição do quilograma, poderão ficar rastreados ao valor consensual através dos serviços de calibração disponíveis no BIPM.

Quando já não for necessária a utilização de um valor consensual, i.e. quando a dispersão de valores for compatível com a incerteza das realizações primárias, os laboratórios terão unicamente de participar regularmente em comparações laboratoriais periódicas para demonstrar as suas capacidades de medição, tal como é feito para as outras unidades [8].

Como as incertezas associadas a estas novas realizações do quilograma são maiores que as que estavam associadas à definição do quilograma através do IPK, as incertezas para o utilizador final serão também mais elevadas, mas não deverão comprometer a sua utilização, mesmo nas medições mais exigentes.

4. Futuro, novos desafios que a redefinição transporta

Presentemente, ainda não é possível garantir o

acesso contínuo a qualquer uma das realizações experimentais do quilograma. Para colmatar este problema, será necessário estabelecer e manter um conjunto de padrões de massa cuja rastreabilidade esteja ligada a umas realizações. Estes padrões deverão encontrar-se no BIPM, o que permitirá difundir a rastreabilidade pelos restantes Laboratórios Nacionais de Metrologia, tal como era feito aquando da anterior definição.

Ambos os métodos utilizados para a realização da unidade são executados em vácuo, um meio diferente do ar, onde se pretende realizar posteriormente a disseminação da unidade. A incerteza associada à transferência dos padrões entre o vácuo e o ar é de apenas algumas microgramas, mas tem sido observado que a transferência repetida entre estes dois meios pode afetar o valor da massa dos padrões envolvidos nos primeiros ciclos de transferência [9]. Os efeitos possíveis aquando da transferência ar-vácuo-ar terão de ser bem compreendidos e será certamente uma matéria de investigação contínua no futuro.

A preservação das massas de referência usadas na definição também é um assunto em discussão (em vácuo/ar e em que condições)[12].

A redefinição também abre novas portas e, pela primeira vez, será possível realizar a definição do quilograma para diferentes valores nominais diferentes de 1 kg usando diferentes tipos de balanças eletrostáticas [9] e, com isto, pela primeira vez, começa-se a vislumbrar a possibilidade de, no futuro, os padrões de massa atualmente utilizados nos laboratórios de metrologia deixarem de ser necessários para a disseminação da unidade.

Referências

- [1] Davis R, Barat P, Stock M, A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram Metrologia 53 (5) A12-A18 (2016)
- [2] <https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/> consultado a 2019-03-18.
- [3] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N, Williams E R, Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) Metrologia 43 (3) 227-246 (2006)
- [4] Bettin H, Schlamminger S, Realization, maintenance and dissemination of the kilogram in the revised SI Metrologia 53 (5) A1-A5 (2016)
- [5] Ujii K, Bettin H, Becker P, Massa E, Rienitz O, Pramann A, Nicolaus A, Kuramoto N, Busch I, Borys M, Realization of the kilogram by the XRCD method Metrologia 53 (5) A19-A45 (2016).
- [6] Robinson I A, Schlamminger S, The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass Metrologia 53 (5) A46-A74 (2016).
- [7] Richard P, Fang H, Davis R, Foundation for the redefinition of the kilogram Metrologia 53 (5) A6-A11 (2016)
- [8] Stock M, Davidson S, Fang H, Milton M, de Mirandés E, Richard P, Sutton C, Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition Metrologia 54 S99-S107 (2017).

- [9] Davidson S, Berry J, Abbott P, Marti K, Green R, Malengo A, Nielsen L, Air-vacuum transfer; establishing traceability to the new kilogram *Metrologia* 53 (5) A95-A113 (2016)
- [10] Shaw G A, Stirling J, Kramar J A, Moses A, Abbott P, Steiner R, Koffman A, Pratt J R, Kubarych Z J, Milligram mass metrology using an electrostatic force balance *Metrologia* 53 (5) A86-A94 (2016)
- [11] Stock M, Barat P, Pinot P, Beaudoux F, Espel P, Piquemal F, Thomas M, Ziane D, Abbott P, Haddad D, Kubarych Z, Pratt J R, Schlamminger S, Fujii K, Fujita K, Kuramoto N, Mizushima S, Zhang L, Davidson S, Green R G, Liard J, Sanchez C, Wood B, Bettin H, Borys M, Busch I, Hämpke M, Krumrey M, Nicolaus A, A comparison of future realizations of the kilogram *Metrologia* 55 (1) T1-T7 (2018).
- [12] Davidson S, Characterization of the long-term stability of mass standards stored in vacuum by weighing and surface analysis *Metrologia* 49 (3) 200-208 (2012)



José Pedro Conceicao nasceu em Luanda em 1973. Licenciou-se em Engenharia Física na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Em 2001, trabalhou no detetor de partículas ATLAS da *European Organization for Nuclear Research (CERN)* em Genève, como Programador Científico. Em 2004, após uma breve passagem

pela empresa SIEMENS de Portugal no sector de programação e desenvolvimento no domínio das novas tecnologias, iniciou as suas funções no Laboratório de Massa do Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade como Técnico Superior. Em 2008, assume as funções de Responsável Técnico pelos domínios metrológicos da Massa e Massa Volúmica de Sólidos, tendo como uma das suas principais funções realizar a disseminação e dar rastreabilidade à unidade de massa a nível nacional, estando nomeado posteriormente como contact person no comité técnico da EURAMET TC-M (Massa). Em 2014/2015, trabalhou durante 15 meses no *National Physics Laboratory (NPL)*, em Teddington – Londres (Reino Unido), como investigador no âmbito do projeto europeu da EURAMET «Developing a practical means of disseminating the new kilogram», participando na criação e caracterização física de novos padrões de massa, no desenvolvimento de novos métodos de armazenamento, limpeza de padrões de massa e estudo dos efeitos da transferência de padrões de massa entre ar e vácuo, tendo em vista a redefinição do kilograma em 2019. Em 2016, acumulou funções como auditor técnico do IPAC para os domínios da Massa e Pressão. Desde novembro de 2018, trabalha como técnico principal no Laboratório de Massa no *Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)* em Sèvres - Paris, sendo atualmente o responsável pela calibração da massa e massa volúmica dos protótipos nacionais a nível internacional realizadas neste Laboratório, para além de apoiar e participar nas mais diversas áreas de investigação do BIPM.