

## Redefinição do Kilograma II: Decisões

### Kilogram Redefinition II: Decisions

**F L Cacais**<sup>1</sup>, **V M Loayza**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro – Brasil

E-mail: facacais@gmail.com

**Resumo:** A redefinição do quilograma está programada para 2018 após 25 anos de sua data formal de início. Este trabalho tem o propósito de mostrar que o tempo requerido para a redefinição do quilograma foi o necessário para que todos os questionamentos sobre as conseqüências deste processo fossem respondidos.

**Palavras-chave:** redefinição do quilograma, unidade de massa, quilograma.

**Abstract:** The kilogram redefinition is scheduled for 2018 after 25 years of its formal start date. This work has the purpose to show that the time required for the redefinition of the kilogram was the necessary in order to answer all the questions about the consequences of this process.

**Keywords:** kilogram redefinition, SI mass unit, kilogram..

#### 1. INTRODUÇÃO

A definição da unidade de massa do Sistema Internacional de Unidades (SI), o quilograma, é massa do protótipo internacional do quilograma (IPK) [1] e será substituída por uma definição baseada em uma constante fundamental, a constante de Planck, em 2018 [2] Diversos fatores favoreceram o processo de redefinição do quilograma:

- Vulnerabilidade da definição atual baseada em objeto físico;
- Maior estabilidade das unidades do SI ao serem definidas a partir de constantes fundamentais;
- Universalidade da realização da unidade a partir de experimentos que podem ser

executados a qualquer momento, em qualquer lugar e com a maior exatidão possível;

- Interesse de redefinição de unidades em função de constantes fundamentais;
- Viabilidade de redefinir outras unidades de base implementando assim o novo SI, figura 1 [3].

Estes fatores surgiram e ocasionaram as decisões tomadas desde o início formal do processo de redefinição do quilograma. em 1993 a partir da recomendação do Comitê Consultivo de Massa e Grandezas Correlatas CCM G1 (1993) [4]. Assim, este trabalho apresenta as decisões dos Comitês Consultivos (CCs) do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) e de alguns Institutos Nacionais de Metrologia de

forma a evidenciar que o tempo tomado para a redefinição do quilograma foi necessário não apenas para que não houvesse descontinuidade na cadeia de rastreabilidade dos padrões nacionais de massa (embora seja a mais importante) mas também por outras condições requeridas para a redefinição de outras unidades.



Figure 1 *SI Illustration* Representação gráfica do SI incluindo as unidades de medida e as correspondentes constantes fundamentais que as definem [3].

## 2. DECISÕES

### 2.1. Resoluções e Recomendações dos Comitês (1999 – 2005)

A Resolução 7 da CGPM (1999) [5] recomenda que os laboratórios nacionais continuem seus esforços para refinar experiências que ligam a unidade de massa a constantes fundamentais ou atômicas com vista a uma futura redefinição do quilograma. Formalmente, esta foi a primeira vez que a CGPM expressa a intenção de redefinir a unidade de massa.

Os resultados da balança Kibble, do método de cristalografia de raios-X (XRCD) da Coordenação Internacional Avogadro (IAC), figura 2, do Eletrômetro, da balança de volt, do projeto de acumulação de íons de ouro e do projeto de Levitação Magnética estavam disponíveis em 2003 [6]. No entanto, a discrepância relativa entre essas realizações do quilograma era da ordem de  $1 \times 10^{-6}$  assim, muito maior do que a incerteza relativa máxima dos

padrões de massa de 1 kg da classe de exatidão  $E_1 = 8 \times 10^{-8}$  [7] especificada pela Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML). Estes padrões são utilizados para fornecer rastreabilidade aos órgãos legais de metrologia, laboratórios acreditados e indústria de pesagem, desta forma se o quilograma fosse redefinido naquele momento certamente haveria impacto sobre a cadeia de rastreabilidade destas áreas.

Em 2005 foi proposto que a redefinição do quilograma ocorresse em 2007, fixando as constantes de Planck ou de Avogadro independentemente das discrepâncias experimentais existentes definindo um "valor convencional" para a unidade de massa [8]. Em resposta, a recomendação do Comitê Consultivo de Massa CCM G1 (2005) [9] é publicada e estabelece condições para a redefinição de quilograma, entre elas, que não haja discrepâncias significativas não resolvidas entre os resultados de experimentos independentes, que a melhor realização de quilograma tenha incerteza relativa de  $2 \times 10^{-8}$  [10] e que os resultados de muitas experiências estejam disponíveis com esta incerteza.

Esta recomendação foi corroborada pela recomendação do Comitê Consultivo de Eletricidade e Magnetismo CCEM E1 (2005) [11], que indica que qualquer decisão sobre a redefinição do quilograma seja indeferida até a 24ª Conferência Geral em 2011 e também sugere redefinir além da constante de Planck a carga elementar de forma a redefinir o ampere.

Assim como o CCEM o Comitê Consultivo de Temperatura em sua recomendação CCT T1 (2005), incentiva os laboratórios a determinar valores de temperatura termodinâmica e da constante de Boltzmann para uma possível futura redefinição do kelvin [12]. Com base nestas recomendações de 2005, o Comitê Consultivo de Unidades (CCU) solicita ao CIPM a autoridade para a preparação das novas definições e

respectivas *mise en pratique* (instruções sobre como executar as realizações primárias com base em métodos primários de maior exatidão) para o quilograma, ampere e kelvin e a avaliação sobre a possibilidade de definir conjuntamente o mol, fixando a constante Avogadro. A Recomendação 1 do CIPM (CI-2005) [13] considera as solicitações do CCU e indica ao CCM, CCEM, Comitê Consultivo para Quantidade de Substância: metrologia em Química (CCQM) e CCT que avaliem as consequências das definições propostas, que identifiquem as condições a serem atendidas antes de alterar as definições e que solicitem a participação da comunidade científica e técnica em geral. Uma avaliação das consequências para redefinição do quilograma, ampere, mol e kelvin foi realizada e indicou não haver problema para redefinição do mol e kelvin, entretanto que deveria-se esperar até que os resultados dos experimentos para redefinição do quilograma atingissem os requisitos especificados na recomendação CCM G1 (2005) para redefinir o quilograma e o ampere, visto que a redefinição desta última unidade requer a fixação das constantes de Josephson e de Von Klitzing e, portanto da constante de Planck que até aquele momento era determinada com maior exatidão pela balança Kibble [14].

## **2.2. Resoluções e Recomendações dos Comitês (2006 – 2011)**

Atendendo à solicitação de participação da comunidade científica e técnica especificada na recomendação CI-2005, em 2006 um conjunto de condições a serem cumpridas por novas definições baseadas em realizações experimentais foi proposto: universalidade, exatidão, acessibilidade, estabilidade, aceitabilidade da teoria física, compreensibilidade e continuidade. Ainda, foram feitas algumas propostas para as redefinições do quilograma, ampere, mole e kelvin, como deveriam figurar na brochura do SI, e baseadas respectivamente na constante de Planck,

na carga elementar, na constante de Avogadro e na constante de Boltzman. Os autores desta proposta indicavam que as redefinições das unidades não deveriam esperar até que as experiências para redefinição convergissem. [15]. Algumas considerações sobre essas propostas de redefinição do quilograma são apontadas indicando que de acordo com a definição adotada o quilograma dependeria do segundo [16]. Adicionalmente uma análise do impacto das possíveis redefinições do quilograma (massa do elétron, ~~da~~ constante de Planck e ~~da~~ massa atômica do carbono 12) sobre a redefinição do mol indicando que a razão kg/Da deveria ser definida exatamente para que não houvesse necessidade de correções em unidades atômicas [17] como havia sido proposto [15].

Em 2007, a recomendação CCEM E1 [18] reafirma a posição de 2005 e, com base nas propostas de 2005/2007, a Resolução 12 do CGPM (2007) [19] estabelece como condição para as redefinições das unidades que elas deveriam ser autoconsistentes, facilmente compreensíveis e deveriam considerar contribuições das comunidades científicas e de usuários, mais amplas. Além disso, decide que se for possível a redefinição deveria ocorrer em 2011 na 24ª reunião da CGPM.

Nesse momento, três comitês estão oficialmente interessados na redefinição do quilograma o CCM, o CCEM e o CCU devido à redefinição de quilograma, ~~o interesse na~~ à fixação da constante da Planck e ~~devido~~ às definições das unidades que devem constar no *draft* da nova brochura do SI (publicado em 2010), respectivamente. Em 2007, o CCM apresenta ao CCU novos requisitos de incertezas relativas para a determinação das constantes fundamentais que redefinirão o quilograma [20], no entanto o CCU é (não oficialmente) relutante quanto aos requisitos apresentados [21] e, assim, propõe ao CIPM, em 2009, que o quilograma seja redefinido pela fixação da constante de Planck determinada com

uma incerteza relativa de  $3 \times 10^{-8}$  e que a aplicação de um conjunto especial de padrões, a ser implementado pelo BIPM para disseminação da unidade de massa após a redefinição, garantiria a continuidade da unidade de massa e tornaria dispensável a existência várias experiências para redefinição [22]. É importante destacar que a escolha da constante de Planck para redefinição do quilograma pelo CCU, mas não ainda pelo CCM, reflete a urgência para a redefinição do quilograma estimulada pelos idealizadores da balança Kibble, por especialistas do National Institute of Standards and Technology (NIST) que trabalham em conjunto com o Grupo de Trabalho sobre Constantes Fundamentais (TGFC) do Committee on Data for Science and Technology (CODATA) e membros do CCU [8]. No entanto, metrologistas da área de massa consideram com cautela o prazo para a redefinição do quilograma em 2011 devido a possíveis consequências ainda não previstas para o sistema metrológico internacional de uma redefinição antecipada do quilograma [23].

Somente na Recomendação Q1 (2009) o CCQM [24] toma sua posição em definir o mol com base na constante de Avogadro, juntamente com o quilograma, uma vez que o quilograma e o mol são unidades interrelacionadas no SI [25]. Agora, o CCQM junta-se ao CCM, CCEM e CCU no interesse de uma redefinição de quilograma e encoraja a comunidade química a apresentar seus pontos de vista. Assim, é indicado que definições independentes do quilograma e do mol violam a condição de compatibilidade fundamental decorrente do conceito do mol e algumas novas definições são propostas relativas ao mol e constantes atômicas químicas [26].

A recomendação CCM G1 (2010) [27] estabelece que o quilograma deverá ser redefinido fixando a constante de Planck de acordo com determinações pela balança Kibble e pelo

experimento XRCD e faz a recomendação que inclui condições para a redefinição:

1. pelo menos três experiências independentes, incluindo tanto a balança Kibble quanto o método XRCD, produzam valores das constantes relevantes com incertezas padrão relativas não maiores que 5 partes em  $10^8$ . Pelo menos um desses resultados deve ter uma incerteza padrão relativa não maior que 2 partes em  $10^8$ .

2. Para cada uma das constantes relevantes, os valores fornecidos pelas diferentes experiências sejam consistentes no nível de confiança de 95 %.

3. A rastreabilidade dos protótipos do BIPM ao IPK seja confirmada.

- que os valores recomendados CODATA sejam adotados para as constantes fundamentais relevantes,
- que as incertezas padrão relativas associadas ao CODATA sejam adequadamente consideradas quando a incerteza inicial é atribuída à massa do IPK,
- que um conjunto de padrões de referência seja estabelecido no BIPM para facilitar a disseminação da nova definição do quilograma,
- que o BIPM e um número suficiente de Institutos Nacionais de Metrologia continuem a desenvolver, operar ou melhorar instalações ou experimentos que permitam a realização do quilograma a ser mantido com uma incerteza padrão relativa não superior a 2 partes em  $10^8$ .
- que o componente de incerteza decorrente da realização prática da unidade seja devidamente levado em consideração.

A partir destas condições, a equipe de metrologia de massa do Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) analisou o impacto da futura disseminação do quilograma com base nos resultados disponíveis da balança Kibble e do método XRCD e, com base nos limites indicados na recomendação. Como conclusão mesmo quando o limite inferior de incerteza  $2 \times 10^{-8}$  seja

alcançado por apenas um laboratório dentre três laboratórios, a rastreabilidade dos pesos de classe de exatidão  $E_1$ , definida pela OIML, são afetados, assim é importante que os laboratórios atinjam esses limites de incerteza ou inferiores antes de redefinir o quilograma [28].

A Resolução 1 da 24<sup>a</sup> CGPM (2011) [29] confirma as sete constantes usadas para redefinir as sete unidades de base do SI e encoraja os pesquisadores a continuar seus esforços. É importante destacar que, a partir desse momento, a redefinição do quilograma implica também a redefinição do mol, uma vez que a condição do CCM requer consistência entre os resultados da balança Kibble e do método XRCD. Ainda, esta resolução indica que a comunidade de metrologia aumente seus esforços para iniciar campanhas de conscientização destinadas a alertar as comunidades de usuários e o público em geral para a intenção de redefinir várias unidades da SI, encoraja que sejam tomadas em consideração as implicações práticas, técnicas e legislativas de tais redefinições, para que comentários e contribuições possam ser solicitados de comunidades científicas e de usuários mais amplas.

Em 2011, os resultados das experiências da balança de Kibble do NIST, do National Physical Laboratory (NPL) e Swiss Federal Institute of Metrology (METAS) [30] e os primeiros resultados do projeto IAC/XRCD, figura 2, com base na esfera de silício 28 obtido por enriquecimento do silício natural [31] estavam disponíveis. Esses resultados compuseram o ajuste de 2010 do CODATA [32], publicado em 2012, o qual resultou em um valor de  $6,626\ 069\ 57\ (29) \times 10^{-34}$  J s para a constante de Planck com uma incerteza relativa de  $4,4 \times 10^{-8}$ , que ainda não era adequada para redefinição do quilograma.

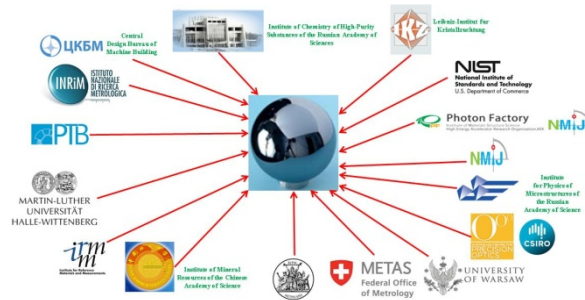


Figura 2 Dezesesseis instituições de diversos países que estiveram envolvidos no estabelecimento das esferas de silício do projeto IAC/XRCD.

### 2.3 A balança Kibble e os experimento XRCD para vincular a unidade de massa a constantes fundamentais.

A balança Kibble baseia-se no princípio da igualdade entre as potências mecânica e elétrica surgida nas etapas de operação estática (figura 3 [33]) e dinâmica (figura 4 [33]) nas quais o gradiente de fluxo magnético é considerado constante.

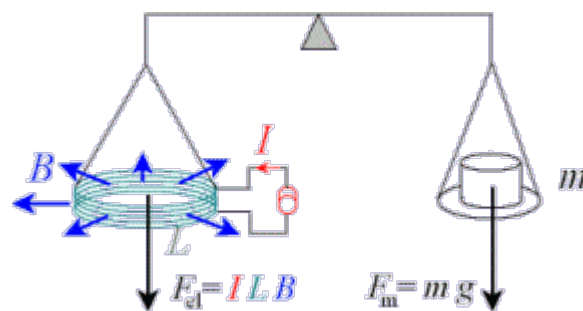


Figura 3 A fase estática da balança Kibble funciona como um comparador de massa com uma força restauradora eletromagnética. O padrão de massa é equilibrado por uma força de Lorentz produzida pela circulação de uma corrente  $I$  em uma bobina com comprimento  $L$  imersa em um campo magnético radial  $B$ . A corrente é medida a partir das referências de Josephson e Hall Quântico [33].

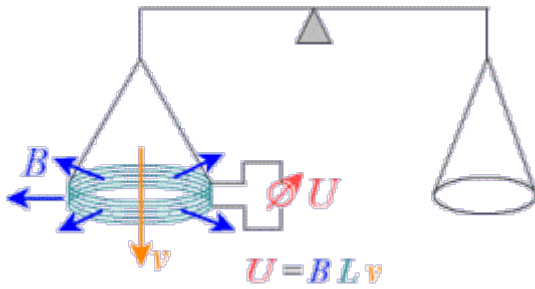


Figura 4 Fase dinâmica da balança Kibble. A bobina é movida verticalmente com a velocidade  $v$  através do mesmo campo magnético  $B$ , o que leva a uma tensão induzida  $U$  [33].

A relação entre a massa  $m$  em kilogramas e a constante de Planck  $h$ , equação (1), inclui os valores numéricos das tensões  $\{U_1\}_{J-90}$  e  $\{U_2\}_{J-90}$  medidas a partir de referências convencionais Josephson nas fases estática e dinâmica, o valor numérico para a resistência  $\{R_1\}_{K-90}$  medido na fase estática a partir de referências convencionais do efeito Hall Quântico, as constantes elétricas convencionais, a aceleração de gravidade local  $g$  e a velocidade  $v$  da bobina na fase dinâmica [28].

$$m = \left[ \frac{\{U_1\}_{J-90} \{U_2\}_{J-90} K_{J-90}^2 R_{K-90}}{4 \{R_1\}_{K-90} g v} \right] h \quad (1).$$

O método XRCD baseia-se na suposição de que a densidade de uma célula regular unitária de uma esfera de silício monocristalino é igual à densidade da esfera. Em uma célula unitária de um silício monocristalino, existem 8 átomos (um átomo por plano) contido em um volume para o qual o parâmetro de rede médio é  $d_{220}\sqrt{8}$  tomado em relação ao espaçamento dos planos  $\{220\}$  de rede de células unitárias de silício [34]. Assim, a relação entre o valor numérico para a massa da esfera em kilogramas  $\{m_{sph}\}$  e a constante Avogadro  $\{N_A\}$ , a equação (2), pode ser estabelecida pela medição do parâmetro de rede

mencionado, volume da esfera  $V_{esf}$ , e massa atômica relativa do silício  $A_r(^{28}\text{Si})$  [35].

$$\{m_{sph}\} = \left[ \frac{A_r(^{28}\text{Si}) V_{esf} 10^{-3}}{\sqrt{8} d_{220}^3} \right] \frac{1}{\{N_A\}} \quad (2).$$

Ambos os experimentos podem ser relacionados pela constante de estrutura fina  $\alpha$ , a massa atômica relativa do elétron  $A_r(e)$ , a velocidade da luz  $c$ , constante de massa molar  $M_u$  e Rydberg constant  $R_\infty$ , equação (3) [36].

$$N_A h = \frac{\alpha^2 c A_r(e) M_u}{2 R_\infty} \quad (3).$$

Na equação (3), o termo multiplicativo  $N_A h$  é chamado de constante de Planck molar, cuja incerteza relativa em 1998 era de  $7,6 \times 10^{-9}$  e em 2014 era de  $4,5 \times 10^{-10}$  [37], portanto, a equação (3) permite comparar os resultados da balança Kibble e do método XRCD com incertezas relativas superiores a  $1 \times 10^{-8}$  sem aumento significativo de incerteza [38].

### 2.3.1. Incerteza do IPK no novo SI

É possível entender o que acontecerá com o valor de massa de IPK após a definição do kilograma por constantes fundamentais a partir de algumas considerações sobre as equações (1) e (2).

Diferente da equação (1) que apresenta o valor de massa  $m$  em kilogramas, a equação (2) é apenas o valor numérico  $\{m_{sph}\}$  da grandeza  $m_{sph}$  em kilograma. A partir da propriedade de coerência do SI, estes termos estão relacionadas à unidade de massa definida, a massa de IPK  $m_{IPK}$ , equação (4.a-4.c).

$$m_{IPK} \triangleq 1\text{kg} \quad (4.a).$$

$$m = \{m\} [1\text{kg}] \Rightarrow m = \{m\} m_{IPK} \quad (4.b).$$

$$m_{sph} = \{m_{sph}\} [1\text{kg}] \Rightarrow \{m_{sph}\} = \frac{m_{sph}}{m_{\text{IPK}}} \quad (4.c).$$

Para entender o princípio sobre o que acontecerá com a unidade de massa após a redefinição, deve-se reescrever as equações (1) e (2) explicitamente em função da massa fixa  $m_{\text{IPK}}$  (sem incerteza) do IPK em relação às equações (4.a - 4.c), equações (5.a) e (5.b).

$$h = \left[ \frac{4\{R_1\}_{K-90} g v \{m\}}{\{U_1\}_{J-90} \{U_2\}_{J-90} K_{J-90}^2 R_{K-90}} \right] m_{\text{IPK}} \quad (5.a).$$

$$\{N_A\} = \left[ \frac{A_r({}^{28}\text{Si}) V_{\text{esf}} 10^{-3}}{\sqrt{8} d_{220}^3} \right] m_{\text{IPK}} \quad (5.b).$$

Estas equações quando consideradas modelos de medição podem ser usadas para determinar as incertezas relativas, respectivamente, para a constante de Planck  $u_r(h)$  e para o valor numérico da constante de Avogadro  $u_r(\{N_A\})$  antes de fixar as constantes. É importante ressaltar que, a incerteza da massa do IPK é zero no SI, as incertezas relativas  $u_r(h)$  e  $u_r(\{N_A\})$  dependem das incertezas relativas dos respectivos termos nos colchetes. Ambas as incertezas das constantes fundamentais, dependem das incertezas dos valores de massa que levam em conta a incerteza da cadeia de rastreabilidade ao valor da massa do IPK.

Se a balança Kibble, o método XRCD e a massa do IPK são estáveis na transição antes-depois de fixar o valor das constantes e os experimentos são realizados novamente com os mesmos artefatos de massa, idealmente os valores obtidos para a constante de Planck  $h$  e para a constante de Avogadro  $N_A$  seriam iguais ao valor fixado e considerando as equações (1), (2) e (4.a - 4.c), a massa IPK pode ser inferida pelas equações (6.a) e (6.b).

$$m_{\text{IPK}} = \left[ \frac{\{U_1\}_{J-90} \{U_2\}_{J-90} K_{J-90}^2 R_{K-90}}{4\{R_1\}_{K-90} g v \{m\}} \right] h \quad (6.a).$$

$$m_{\text{IPK}} = \left[ \frac{(d_{220} \sqrt{8})^3 m_{sph}}{8 A_r({}^{28}\text{Si}) V_{\text{esf}} 10^{-3}} \right] \{N_A\} \quad (6.b).$$

Agora, uma vez que os valores das constantes fundamentais são fixados, então a incerteza relativa atribuída à massa do IPK é a mesma obtida para a constante antes da redefinição, equação (7).

$$u_r(m_{\text{IPK}}) = \begin{cases} u_r(h) \\ u_r(\{N_A\}) \end{cases} \quad (7).$$

Como a constante de Planck que será a constante que definirá o quilograma a incerteza relativa da massa do IPK devido a constante de Avogadro deverá ainda considerar a incerteza relativa da equação (3).

#### 2.4. Resoluções e Recomendações dos Comitês (2012 – 2015)

Seguindo a indicação da CGPM, são publicadas algumas contribuições e propostas para o processo de redefinição do quilograma: uma definição de quilograma mais fácil de entender [39], definições macro e micro para a quantidade de substância [40], benefícios da fixação da constante de Avogadro [41], condições não cumpridas pela proposta redefinição de unidades [42] e sobre como deveriam ser as definições na brochura do SI [43]. Além disso, uma análise dos resultados dos ajustes do CODATA desde 1998 dos experimentos para determinação da constante de Planck do PTB indicou a existência de um deriva (salto) maior do que a que é atribuída ao IPK [44].

As consequências da redefinição do quilograma para a Metrologia Legal tem sido avaliadas e constatou-se que seriam mínimas [45], dessa forma, a resolução 23 do Comitê Internacional de

Metrologia Legal (CIML 2012) apóia a decisão da CGPM na revisão de SI [46].

A Associação Européia de Indústrias de Pesagem (CECIP) questiona à CGPM e ao CIPM sobre como manter a confiança mundial e concordância entre os padrões de massa calibrados, garantir que os certificados de calibração emitidos em diferentes Estados Membros continuem consistentes, garantir que kilograma redefinido não "saltará" por mais do que  $4 \times 10^{-8}$ , que é a menor incerteza relativa de medição fornecida em certificados de calibração emitidos por laboratórios de massa acreditados e sobre a nova definição proposta, a qual relaciona o kilograma com uma constante (Planck) não muito conhecida pelo público em geral e nem mesmo por pessoas bem educadas [47].

Em resposta à CECIP, o CIPM indica que a atual confiança mundial e a concordância de padrões de massa e consistência dos certificados de calibração, após a redefinição proposta, continuam a ser garantidos sob o Acordo de Reconhecimento Mútuo CIPM MRA. O CIPM indica que a variação do IPK a partir de constantes fundamentais poderia estar entre 50  $\mu\text{g}$  e 100  $\mu\text{g}$  e que não ocorrerão saltos porque uma vez que a constante de Planck for fixada, não mudará mais seu valor. Ainda indica que a continuidade da unidade de massa no novo SI será mantida visto que o valor da constante de Planck usado para redefinir o kilograma será escolhido de tal forma que o novo kilograma será idêntico à melhor estimativa do kilograma no SI atual. No que se refere às questões educacionais sobre a constante de Planck o CIPM, ressalta que é o mesmo sobre outras constantes já aceitas como a velocidade da luz e a frequência do césio, no entanto, reconhece que educar a parte do público em geral que está interessada nas novas unidades SI - particularmente a nova definição do kilograma - é uma dívida ainda não paga [48].

A fim de melhorar a compreensão sobre a balança Kibble, considerada pela NATURE em 2012, uma das cinco experiências tão difíceis quanto encontrar o Boson de Higgs [49] e sobre o experimento XRCD, experimentos menos caros e que apresentam os conceitos envolvidos nos experimentos foram desenvolvidos. Uma não tão simples Balança Lego usada para demonstrar o princípio da balança Kibble e que poderia atingir incertezas relativas de cerca de 1 % foi desenvolvida pelo NIST, muito mais como um experimento de divulgação do que com um propósito educacional [50]. Duas balanças Kibble educacionais conceitualmente diferentes, que usam ímãs de alto-falantes para gerar o campo magnético requerido e que fornecem incertezas relativas da ordem de 10 %, foram propostos [44-45]. Um experimento educacional sobre o método do XRCD baseado em propriedades atômicas de um cubo de alumínio policristalino que atinge incertezas de cerca de 0,5 % foi desenvolvido [53]. Este último experimento foi testado pelos autores deste trabalho para um cilindro de alumínio e a discrepância da constante de Avogadro e conseqüentemente para a constante de Planck foi de cerca de 0,1 %, portanto bem dentro do esperado.

Levando em conta as considerações, propostas e pontos de vista das comunidades técnicas e científicas apresentados entre 2010 e 2013, o CCM publica a recomendação G1 (2013) e esclarece as condições das últimas recomendações [54]:

"Prevendo a necessidade de desenvolver ou melhorar métodos e operar instalações para que, após a redefinição, 1 kg possa ser realizado e disseminado com uma incerteza padrão não maior que 20  $\mu\text{g}$ ":

1. Pelo menos três experimentos independentes, incluindo trabalhos da balança Kibble e do método XRCD, produzam valores consistentes da



constante de Planck com incertezas padrão relativas não maiores que 5 partes em  $10^8$ .

2. pelo menos um desses resultados deve ter uma incerteza padrão relativa não maior que 2 partes em  $10^8$ .

3. Os protótipos do BIPM, o *Ensemble* de padrões de massa de referência (ERMS) do BIPM e os padrões de massa utilizados na balança Kibble e no método XRCD sejam comparados o mais diretamente possível com o IPK.

4. Os procedimentos para a futura realização e disseminação do quilograma, conforme descrito no *mise en pratique*, sejam validados de acordo com os princípios do CIPM MRA

A Recomendação G1 (2013) difere da G1 (2010) quando não especifica que resultados sejam consistentes para um intervalo de confiança de 95 %, tornando assim o critério de consistência compatível com o executado pelo CODATA [55].

Em 2013 a equipe de metrologia de massa do NIST avalia o impacto da redefinição para padrões de massa de alta exatidão e conclui que, caso a redefinição fosse realizada nesse momento, após a redefinição do quilograma não seria possível calibrar os padrões de massa da classe "E<sub>0</sub>" [56] comumente usados por laboratórios acreditados para fornecer rastreabilidade para padrões de classe OIML E<sub>1</sub> e usado também por NMIs para realizar verificação de consistência e calibração de seus padrões de trabalho de classe OIML E<sub>1</sub>.

Em 2013 foi estabelecido pelo CCM que a redefinição aconteceria na reunião do CGPM em 2018 e um mapa inicial de tarefas (*Roadmap*) [57] foi apresentado e confirmado pela Resolução 1 da 25ª CGPM (2014) [58]. Além disso, o CCU publica um novo *draft* da brochura para o novo SI [59].

Em 2015, uma nova avaliação do impacto nos serviços do NIST da redefinição do quilograma confirma que após a redefinição não será possível calibrar os padrões de massa de classe "E<sub>0</sub>" [60].

O *Roadmap* definitivo produzido em conjunto pelo CCU e CCM o qual especifica as tarefas a serem realizadas a partir de 2013 como preparação para a redefinição de quilograma em 2018 é publicado em 2015 [61]. O ajuste CODATA 2014, publicado em 2016 [37] com base em novos resultados das balanças Kibble do NIST, do National Research Council (NRC) e Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) e das esferas de silício descontaminadas do projeto IAC/XRCD [62] forneceram um valor para a constante de Planck de  $6,626\ 070\ 040\ (81) \times 10^{-34}$  J s com uma incerteza relativa de  $1,2 \times 10^{-8}$ , portanto menor que o limite inferior especificado na recomendação CCM G1(2013). Este resultado servirá para suportar as decisões do CCM agendadas no *Roadmap* tais como redefinir o quilograma em 2018.

### 2.5. A Recomendação CCM 2017

A partir da 16ª reunião do CCM foi publicada a Recomendação G 1 (2017) [2], que informa ao CIPM que realize as etapas necessárias para prosseguir a redefinição planejada do SI na próxima reunião da CGPM, embora reconhecendo a falta de consistência entre as determinações da constante de Planck com incertezas relativas inferiores a  $5 \times 10^{-8}$  [63].

## 3. CONCLUSÃO

Este trabalho revisou de forma sucinta todas as decisões tomadas pelos comitês da CGPM envolvidos no processo de redefinição do quilograma e de outros atores relacionados a este processo. Embora a exatidão requerida para a redefinição estabelecida pelo CCM e que visa a manutenção da continuidade da unidade de massa tenha guiado o processo, os questionamentos

relacionados à redefinição do mol e de organizações interessadas e o entendimento geral sobre a redefinição do quilograma fizeram com que este processo tomasse o tempo necessário.

## AGRADECIMENTOS

Um dos autores gostaria de agradecer ao Pronametro/Inmetro pelo auxílio financeiro (bolsa) no desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] INMETRO 2012 *Sistema Internacional de Unidades SI 1ª Edição Brasileira da 8ª Edição do BIPM*
- [2] CCM 2018 RECOMMENDATION G 1 (2017) For a new definition of the kilogram in 2018 **1**
- [3] Book B 2014 Brand book 1–16
- [4] CCM 1993 *CCM - Rapport de la 5è session (1993)*
- [5] CGPM 1999 *Comptes rendus des séances de la 21 Conférence générale des poids et mesures*
- [6] Schwitz W, Jeckelmann B and Richard P 2004 Towards a new kilogram definition based on a fundamental constant *Comptes Rendus Phys.* **5** 881–92
- [7] OIML 2004 International Recommendation OIML R 111-1 Edition 2004 (E) *Int. Organ. Leg. Metrol.* **2004** 1–78
- [8] Mills I, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N and Williams E R 2005 Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come *Metrologia* **42** 71–80
- [9] CCM 2005 Consultative Committee for Mass and Related Quantities ( CCM ) **2013** 1–24
- [10] Davis R S 2008 Redefining the Kilogram : How and Why ? *MAPAN - J. Metrol. Soc. India* **23** 131–8
- [11] CCEM 2005 Consultative Committee for Electricity and Magnetism ( CCEM ) *CCEM Rep.*
- [12] CCT 2005 Consultative Committee for Thermometry (CCT) *Rep. CCT*
- [13] CIPM 2005 RECOMMENDATION 1 (CI-2005): Preparative steps towards new definitions of the kilogram, the ampere, the kelvin and the mole in terms of fundamental constants **1** 233–4
- [14] Milton M J T, Williams J M and Bennett S J 2007 Modernizing the SI: towards an improved, accessible and enduring system *Metrologia* **44** 356–64
- [15] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N and Williams E R 2006 Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) *Metrologia* **43** 227–46
- [16] Petley B W 2007 The atomic units, the kilogram and the other proposed changes to the SI *Metrologia* **44** 69–72
- [17] Leonard B P 2007 Note on uncertainties resulting from proposed kilogram redefinitions *Metrologia* **44** 1–3
- [18] CCEM 2007 Consultative Committee for Electricity and Magnetism ( CCEM ) *CCEM Rep.*
- [19] CGPM 2007 23rd GENERAL CONFERENCE ON WEIGHTS AND MEASURES *Report*
- [20] CCU 2007 Consultative Committee for Units ( CCU ) Minutes 2007
- [21] CCM 2008 Consultative Committee for Mass and Related Quantities ( CCM ) 1–24
- [22] CCU 2009 Consultative Committee for Units ( CCU ) Minutes 2009
- [23] Bowers M 2009 Why the world is Losing Weight *Caravan* 1–15
- [24] CCQM 2009 Consultative Committee for Amount of Substance : Metrology in Chemistry and Biology ( CCQM ). Report of the 21st meeting
- [25] Milton M J T and Mills I M 2009 Amount of substance and the proposed redefinition of the mole *Metrologia* **46** 332–8
- [26] Leonard B P 2010 Comments on recent proposals for redefining the mole and kilogram

*Metrologia* **47** L5–8

[27] CCM 2010 Consultative Committee for Mass and Related Quantities ( CCM ) **2013** 1–24

[28] Gläser M, Borys M, Ratschko D and Schwartz R 2010 Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination *Metrologia* **47** 419–28

[29] CGPM 2011 Résolutions adoptées par la Conférence générale Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures ( 24th meeting ) 17–21

[30] Steiner R 2013 History and progress on accurate measurements of the Planck constant. *Rep. Prog. Phys.* **76** 16101

[31] Nicolaus A, *et al.* 2011 Counting the atoms in a <sup>28</sup> Si crystal for a new kilogram definition *Metrologia* **48** S1–13

[32] Mohr P, Taylor B and Newell D 2012 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 *Rev. Mod. Phys.* **84** 1527–605

[33]BIPM

<http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance>

[34] Waseda A, Fujimoto H, Zhang X W, Kuramoto N and Fujii K 2015 Homogeneity Characterization of Lattice Spacing of Silicon Single Crystals *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **64** 1692–5

[35] Davis R S 2011 The role of the international prototype of the kilogram after redefinition of the International System of Units *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **369** 3975–92

[36] Taylor B N and Mohr P J 2001 The role of fundamental constants in the international system of units (SI): Present and future *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **50** 563–7

[37] Cohen E R, Taylor B N and Newell D B 2016 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2014\* *Rev. Mod. Phys.* **88** 1–73

[38] Stock M 2011 The watt balance: determination of the Planck constant and redefinition of the kilogram *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **369** 3936–53

[39] Hill T P, Miller J and Censullo A C 2011 Towards a better definition of the kilogram *Metrologia* **48** 83–6

[40] Wheatley N 2011 A sorites paradox in the conventional definition of amount of substance *Metrologia* **48** L17–21

[41] Wheatley N 2011 On the dimensionality of the Avogadro constant and the definition of the mole *Metrologia* **48** 71–82

[42] Hill T P 2011 Criticisms of the proposed “new SI” *Accredit. Qual. Assur.* **16** 471–2

[43] Chyla W T 2012 On the structure of the New SI definitions of base units *Metrologia* **49** L17–9

[44] Schwartz R and Borys M 2014 The proposed new SI: consequences for mass metrology *Acta Imeko* **3** 3–8

[45] Davis R 2011 Proposed change to the definition of the kilogram: Consequences for legal metrology *OIML Bull.* **LII** 5–12

[46] CIML 2012 OIML statement on the proposed new SI 2012

[47] Weighing E, Metrology L, Committees O T, Conference G, Si N, Kilogram I P and States M 2011 CECIP Position on possible future revision of the International System of Units-SI

[48] CIPM 2012 05B\_Response\_to\_CECIP.pdf

[49] Jones N 2012 Frontier experiments: Tough science *Nature* **481** 14–7

[50] Chao L S, Schlamminger S, Newell D B, Pratt J R, Seifert F, Zhang X, Sineriz G, Liu M and Haddad D 2015 A LEGO Watt balance: An apparatus to determine a mass based on the new SI *Am. J. Phys.* **83** 913–22

[51] Quinn T J, Quinn L and Davis R S 2013 A simple watt balance for the absolute determination of mass *Phys. Educ.* **48** 601–6

[52] Ward R J 2014 Minimal watt balance *Phys. Educ.* **49** 277–8

[53] Davis R S 2015 What Is a Kilogram in the Revised International System of Units (SI)? *J. Chem. Educ.* **92** 1604–9

[54] International B, Committee I and Comit M

2010 Consultative Committee for Mass and Related Quantities ( CCM ) **2013** 1–24

[55] Mohr P J and Taylor B N 2000 CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998 *Rev. Mod. Phys.* **72** 351–495

[56] Abbott P J and Kubarych Z K 2013 The New Kilogram Definition and its Implications for High-Precision Mass Tolerance Classes *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **118** 353

[57] CCM 2013 *Strategy 2014-2024* vol 2013

[58] CGPM 2014 Resolutions adopted by the CGPM at its 25th meeting ( 18 20 November 2014 ) Résolutions adoptées par la CGPM • On the future revision of the International System of Units ,

[59] CCU 2013 *Draft 9th Brochure 16 December 2013 1*

[60] Zimmerman N M, Pratt J R, Moldover M R, Newell D B and Strouse G F 2015 The Redefinition of the SI: Impact on Calibration Services at NIST *NCSLI Meas. J. Meas. Sci.* **10** 36–41

[61] CCM 2015 Consultative Committee for Mass and Related Quantities ( CCM ) 1–24

[62] Nicolaus A, *et al.* 2015 Improved measurement results for the Avogadro constant using a <sup>28</sup>Si-enriched crystal *Metrologia* **52** 360–75

[63] Nielsen L 2017 Presentation on 16th CCM Meeting: Status on the conditions stated in Recommendation G1 ( 2013 ) vol 1 pp 1–17