

Redefinição do Kilograma III: Preparação e Consequências

Kilogram Redefinition III: Preparation and Consequences

F L Cacais¹, **V M Loayza**¹

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro – Brasil

E-mail: facacais@gmail.com

Resumo: A redefinição do quilograma está programada para 2018. Neste trabalho são apresentadas as atividades desenvolvidas na fase de preparação para redefinição do quilograma e as consequências deste processo. A análise do impacto da redefinição para a cadeia de rastreabilidade de padrões de massa mostrou que a continuidade da unidade de massa será mantida e que, embora a fixação da constante de Planck possa ser de interesse de cientistas e pesquisadores, não resultará em um impacto tecnológico imediato.

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

Abstract: The redefinition of the kilogram is scheduled for 2018. In this work are presented the activities developed in the preparation phase to redefine the kilogram and the consequences of this process. The analysis of the impact of the redefinition for the traceability chain of mass standards showed that continuity of mass unity will be maintained and that, although the fixation of Planck's constant may be of interest to scientists and researchers, will not result in a technological impact immediate.

Keywords: kilogram, mass unit, redefinition.

1. INTRODUÇÃO

A unidade de massa do Sistema Internacional de Unidades (SI), o quilograma, é definida como a massa do protótipo internacional do quilograma (IPK) [1]. A definição do quilograma com base em um artefato 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].

A etapa final do processo de redefinição do quilograma iniciada a partir da publicação da

recomendação G1 (2013) do Comitê Consultivo de Massa e Grandezas Correlatas (CCM) do envolveu atividades de validação dos métodos primários para redefinição do quilograma, garantia da rastreabilidade destes métodos ao IPK e avaliação da realização e disseminação da unidade de massa a partir destes métodos de acordo com um roteiro previamente estabelecido. Estas atividades em conjunto com o valor da constante de Planck ajustado pelo Committee on Data for Science and Technology (CODATA) estabelecem a etapa de preparação para redefinição. Assim, no presente trabalho são apresentados os desdobramentos das atividades executadas na etapa de preparação para a redefinição do quilograma e os impactos da redefinição do quilograma tanto para cadeia de rastreabilidade a unidade de massa quanto pela fixação da constante de Planck.



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

2. PREPARAÇÃO

2.1. O Roadmap

O *Roadmap* (figura 2) é um mapa do plano estratégico para a redefinição do quilograma em 2018 [4]. As tarefas especificadas nele são divididas em tarefas de execução (setas pontilhadas) que fornecem informações ou são requeridas previamente por uma tarefa principal que fornecerá informações (setas sólidas) sobre

os resultados das tarefas que serão avaliados (losangos vermelhos) em reuniões do CCM (círculos bege) a fim e garantir que as condições para redefinição do quilograma sejam cumpridas.

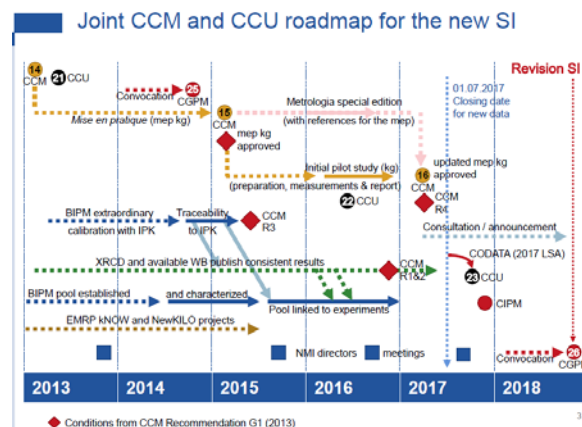


Figura 2 *Roadmap* para redefinição do quilograma [4].

As condições para a redefinição do quilograma estabelecidas na recomendação CCM G1 (2013) [5] têm propósitos específicos para alcançar o objetivo: "após a redefinição, 1 kg poderá ser realizado e disseminado com uma incerteza padrão não maior que 20 μ g":

Condições 1 e 2: pelo menos três resultados de experimentos independentes, incluindo dois métodos físicos diferentes (balança Kibble, anteriormente chamada balança de watt, e cristalografia de raios X (XRCRD) consistentes, com incertezas padrão relativas $\leq 5 \times 10^{-8}$ e pelo menos um com incerteza padrão relativa $\leq 2 \times 10^{-8}$. Esta condição garante que, quando a consistência é alcançada, pode-se verificar o viés entre os experimentos, que os resultados das replicações do mesmo experimento não devem ser considerados mais importantes do que os demais e o resultado não deve ser uma consequência do método físico. É garantido, a partir dos limites de incerteza relativa 5×10^{-8} e 2×10^{-8} , que, quando os resultados são consistentes, a incerteza relativa da média ponderada, conforme o procedimento do

Committee on Data for Science and Technology (CODATA), é um pouco menor que 2×10^{-8} . Isto é importante porque as experiências são realizadas no vácuo, por isso, devido à transição de vácuo-ar, a incerteza no ar deve ser aumentada pela incerteza de transição atingindo uma incerteza no ar de $20 \mu\text{g}$ (2×10^{-8}), conforme o especificado. Além disso, a avaliação da consistência do CODATA baseia-se no procedimento da Razão de Birge, assim se não houver consistência entre os resultados, a média ponderada é aumentada para forçar a consistência, para evitar isso e consequentemente atingir uma incerteza de $20 \mu\text{g}$ em 1 kg no ar, é fundamental que a consistência entre os resultados fique dentro de incertezas relativas inferiores aos limites estabelecidos.

Condição 3: os protótipos do BIPM, o *ensemble* de padrões de massa de referência do BIPM (ERMS) e os padrões de massa usados na balança Kibble e no método XRCD tenham sido comparados o mais diretamente possível com o IPK. Esta condição é necessária para garantir a continuidade da unidade de massa na transição antes-depois da redefinição e na disseminação da unidade de massa pelo *ensemble* de padrões de massa e o conjunto (pool) de protótipos de Pt-Ir do BIPM. Esta condição motivou a campanha extraordinária de calibração, iniciada em 2013, utilizando o IPK como referência.

Condição 4: os procedimentos para a futura realização e disseminação do kilograma, conforme descrito no *mise en pratique* (documento que descreve os métodos primários adotados para a realização das unidades), tenham sido validados de acordo com os princípios do Acordo de Reconhecimento Mútuo do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM MRA). A validação dos métodos primários para a realização kilograma foi executada pelo chamado Estudo Piloto de acordo com o *mise en pratique*.

No *Roadmap* o Comitê Consultivo das Unidades (CCU) (círculos pretos) é encarregado

pela revisão e atualização da 9ª brochura do SI, pelo conteúdo dos *mises en pratique* e da definição do número de dígitos que serão atribuídos a constante de Planck, a carga elementar, a constante de Boltzman e a constante de Avogadro para definir as respectivas unidades (kilograma, ampere, kelvin e mol). Assim, deve-se aguardar o ajuste especial do CODATA para as quatro constantes a fim de obter-se a versão final deste documento. De acordo com o planejado, a versão final da 9ª brochura do SI deve ser aprovada pela CCU em setembro de 2017 e publicada em novembro de 2018 [6].

A partir das recomendações do CCM e do CCU, o CIPM (círculo vermelho cheio) fará alguma recomendação ao CGPM (círculo vermelho), que tomará a decisão sobre o novo SI e, consequentemente, sobre a redefinição de kilograma com base na constante de Planck na 26ª CGPM em 2018. Se aprovado o novo SI, a campanha de divulgação começará em maio de 2018 e será concluída no Dia Mundial de Metrologia em 2019, quando o novo SI entrará em vigor.

2.2. O *mise en pratique*

No anexo 2 da brochura do SI que é disponibilizado apenas on-line [7] são especificados os procedimentos para executar a realização prática das unidades de base por métodos primários, o *mise en pratique*.—Uma versão *draft* do *mise en pratique* para a redefinição do kilograma foi publicada em 2014, mas não foi aprovada na 15ª reunião do CCM, contrariamente ao especificado no *Roadmap* porque o CCM decidiu aprová-lo a partir dos resultados do Estudo Piloto (veja 2.4) [8]. A fim de garantir a referência ao IPK na cadeia de rastreabilidade dos padrões de massa usados por INMs para vincular seus experimentos ao IPK, foi realizada uma campanha de calibração utilizando como referência o IPK (Calibração Extraordinária).

2.3. A Calibração Extraordinária

Em 2013-2014 ocorreu a Campanha Extraordinária de Calibração realizando-se a comparação entre o IPK e: as seis cópias oficiais, os protótipos para uso especial e os padrões de trabalho do BIPM. Diferentemente da Terceira Verificação Periódica dos Protótipos Nacionais [9], protótipos nacionais não participaram da Campanha Extraordinária. A cadeia hierárquica dos protótipos do BIPM (figura 3) baseia-se na frequência de uso, assim, as seis cópias oficiais do IPK são usadas apenas em verificações periódicas, os para uso especial são utilizados apenas para calibrar os padrões de trabalho, que realizam as calibrações rotineiras dos protótipos nacionais. Deve-se ressaltar que, embora a definição de quilograma seja a massa do IPK, a rastreabilidade rotineira é fornecida por meio dos protótipos para uso especial e padrões de trabalho, chamados de "*as-maintained mass unit*" [10].

Protótipo internacional (IPK)	κ					
Cópias oficiais	K1	7	8(41)*	32	43	47
Protótipos do BIPM para uso especial			25	73		
Protótipos do BIPM padrões de trabalho	9	31	42'	63	77	88 91 650

Figura 3 Estrutura hierárquica de padrões de do BIPM em 2014, antes da campanha de calibração.

Na primeira fase da campanha de calibração, realizou-se a comparação entre o IPK e as seis cópias oficiais, e entre o IPK e os protótipos para uso especial antes e depois do procedimento de limpeza e lavagem do BIPM, Não foi possível detectar qualquer variação na massa das cópias oficiais, mas foram observadas, nos protótipos para uso especial 25 e 73, mudanças de, respectivamente, $-18 \mu\text{g}$ e $-33 \mu\text{g}$ desde a sua última calibração em 1992.

Os padrões de trabalho foram comparados com o IPK na segunda fase da campanha de calibração e a variação de massa detectada estava no intervalo entre $-23 \mu\text{g}$ e $88 \mu\text{g}$. Assim, uma

correção de $-35 \mu\text{g}$ foi obtida a partir de um ajuste de mínimos quadrados de 51 parâmetros [11]. Esta correção foi sugerida para ser aplicada aos valores de massa dos protótipos nacionais do quilograma calibrados após 2005 e foi usada pelos INMs para vincular suas experiências ao IPK e corrigir valores de constantes fundamentais [12]. De fato, a deriva de massa encontrada na "*as-maintained mass unit*" não era esperada e evidenciava a existência de efeitos sistemáticos que não estavam sob o controle do BIPM. Pela experiência da campanha, a estrutura hierárquica dos protótipos do BIPM foi alterada (figura 4) para incluir uma diminuição da frequência de uso e evidenciar possíveis derivas nos padrões.

Protótipo internacional (IPK)	κ					
Cópias oficiais	K1	7	8(41)*	32	43	47
Protótipos do BIPM para uso excepcional			25	73	91	
Protótipos do BIPM para uso limitado			9	31	650	
Protótipos do BIPM padrões de trabalho	42'	63	77	88	97	103

Figura 4 Estrutura hierárquica de padrões do BIPM após a campanha de calibração extraordinária.

2.4. O Estudo Piloto

O estudo piloto teve como objetivo avaliar a medição da unidade de massa realizada pelos experimentos para a redefinição de quilograma. Os objetivos do Estudo Piloto, que é um tipo de comparação interlaboratorial, são: testar a uniformidade das realizações futuras do quilograma com base nos diferentes experimentos de realização (balanças Kibble, XRCD); testar a continuidade entre as realizações atuais e futuras; testar a continuidade da futura disseminação da unidade de massa; verificar se as condições estabelecidas na recomendação G1 (2013) do CCM são atendidas e fornecer recomendações para futuras comparações [13].

Todos os INMs que trabalham com métodos primários foram convidados a participar do

Estudo Piloto, sob a condição de que tivessem capacidade de realizar o quilograma com uma incerteza padrão relativa abaixo de 2×10^{-7} , que corresponde a 200 μg no nível de 1 kg. A comparação foi organizada pelo Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) e teve cinco participantes: LNE (França), NIST (Estados Unidos) e NRC (Canadá), os quais operam balanças Kibble, e o NMIJ (Japão) e o PTB (Alemanha) que usaram esferas de silício (Si) 28 do projeto Coordenação Internacional Avogadro (IAC) que utilizam o método XRCD. Neste estudo, o valor da constante de Planck obtido do ajuste CODATA 2014 [14] ($6,626\,070\,0402 \times 10^{-34}$ Js) foi utilizado como referência para determinar a massa dos padrões medidos. Cada INM participante mediu, sob vácuo, pelo menos um padrão próprio de platina-irídio (Pt-Ir) de 1 kg, (conjunto 1) na experiência de realização, exceto o LNE cuja balança Kibble funciona no ar. Além disso, dois padrões de massa de aço inoxidável (St-St) de 1 kg (conjunto 2) de cada INM foram calibrados com referência ao padrão de Pt-Ir no ar. Todos esses padrões foram enviados ao BIPM onde foram comparados no vácuo (conjunto 1) com referência a padrões de sorção de Pt-Ir de 1 kg do BIPM [15] rastreáveis aos padrões de trabalho de Pt-Ir do BIPM e consequentemente rastreáveis ao IPK. Os padrões de aço inoxidável (conjunto 2) foram calibrados com referência a padrões de trabalho de aço inoxidável do BIPM para testar a disseminação de padrões de massa no novo SI.

Os resultados do Estudo Piloto mostraram alto grau de continuidade e uniformidade entre as medições de massa realizadas pelos experimentos de redefinição e, da mesma forma, os resultados da disseminação do quilograma. Além disso, todas as condições da recomendação G1 (2013) do CCM foram atendidas [16].

2.5. O Ensemble de padrões de massa

A Resolução CGPM 1 (2011) encorajou o BIPM a desenvolver "um conjunto de padrões de

referência para facilitar a disseminação da unidade de massa uma vez redefinida", o, assim chamado, *Ensemble of Reference Mass Standards* (ERMS). Inicialmente, este conjunto de padrões de massa de 1 kg foi formado por quatro sub-conjuntos (figura 4 [17]) cada um composto por um padrão de Pt-Ir, um de St-St, uma esfera de Si e uma pilha de discos (padrões de sorção) de Pt-Ir ou de Si ou de St-St. Cada sub-conjunto é armazenado em um ambiente diferente, respectivamente: vácuo, argônio, nitrogênio e ar, controlados contra contaminação e continuamente analisados a fim de assegurar a melhor estabilidade de massa possível [18].

Pela experiência adquirida da campanha de calibração, decidiu-se criar uma estrutura hierárquica dentro do *ensemble* (para uso excepcional, para uso limitado e padrões de trabalho) com base na frequência de uso do *ensemble*, semelhante à hierarquia de padrões Pt-Ir, afim de detectar eventual desgaste. Assim, ao final de 2014 o *ensemble* tinha sido complementado com outros padrões para implementar esta hierarquia.

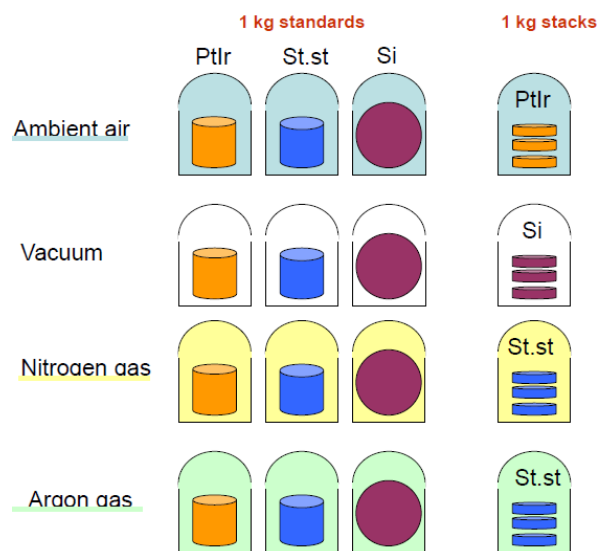


Figura 5 Visão esquemática da configuração inicial do *ensemble* [17].

Após a redefinição do quilograma, os padrões do *ensemble* serão comparados uns aos outros

com certa frequência e a massa de cada padrão comparada com a massa média do *ensemble*. A massa média – calculada a partir da ponderação das massas dos padrões pelas respectivas estabilidades – deverá ser mais estável que qualquer uma das massas individuais. Por sua vez, os padrões terão sua massa determinada pelos experimentos de balanças Kibble e XRCD (utilizando padrões de transferência), garantindo, assim, a sua rastreabilidade às constantes fundamentais. O conjunto de padrões de massa poderá, então, ser usado para disseminar a unidade de massa.

2.6. A Recomendação CCM 2017

Na 16ª reunião do CCM foi emitida a Recomendação G 1 (2017) [19] onde, embora o CCM reconheça a falta de consistência entre as determinações da constante de Planck com incertezas relativas inferiores a 5×10^{-8} [20] recomenda ao CIPM que realize as etapas necessárias para prosseguir com a redefinição planejada do SI na próxima reunião da CGPM.

E enuncia:

a. o CCM realizará uma comparação chave contínua das realizações primárias do quilograma que resultará em uma tabela dos graus de equivalência experimentais, a qual poderá ser usada para criar um procedimento formal para a aplicação de correções relativas ao valor de consenso.

b. todos os INMs continuem a pesquisa e melhorem ainda mais os experimentos em apoio às realizações primárias da unidade de massa do SI em níveis adequados de precisão e em diferentes valores de massa adequados para aplicações atuais e futuras.

c. aqueles INMs que realizam o quilograma utilizem o valor de consenso (conforme determinado pela comparação contínua) ao disseminar a unidade de massa de acordo com a nova definição, até que a dispersão nos valores se

torne compatível com as incertezas das realizações individuais, preservando assim a equivalência internacional de certificados de calibração e de acordo com os princípios e protocolos acordados do CIPM MRA

d. membros do CCM que não realizem a nova definição do quilograma terão acesso direto à rastreabilidade ao mesmo valor de consenso determinado pela comparação contínua através dos serviços de calibração do BIPM.

O enunciado a. indica que a unidade de massa será o valor de consenso obtido a partir dos dados da comparação fornecidos pelas realizações do quilograma a partir de métodos primários tomando como referência o valor fixo da constante de Planck como foi feito no Estudo Piloto.

Os enunciados a. e c. garantem que a falta de consistência não se propagará a partir da realização do quilograma por métodos primários, uma vez que os resultados individuais devem ser corrigidos para o valor do consenso da comparação, garantindo a equivalência internacional.

Os enunciados b. e c. asseguram que os resultados individuais não corrigidos serão usados somente quando os experimentos melhorados se tornem consistentes dentro das incertezas individuais.

Os enunciados a. e d. consideram o uso do *ensemble* de padrões de massa que também participará da comparação de métodos primários e fornecerão rastreabilidade aos padrões nacionais por meio de padrões de Pt-Ir tradicionais.

2.7. Ajuste especial do CODATA 2017

Conforme planejado no *Roadmap*, o ajuste da constante de Planck, da constante de Avogadro, da carga elementar do elétron e da constante de Boltzmann será realizado em 2017. Este ajuste especial considerará os resultados antigos e

novos, publicados no periódico *Metrologia*, até 1º de julho, [6] e os resultados do ajuste especial devem estar prontos para ser aprovados em setembro de 2017 na 26ª reunião do CCU [21].

Além do ajuste especial dos mínimos quadrados das constantes do SI serão ajustadas a constante da estrutura fina, a constante de Rydberg e a massa atômica relativa do elétron, porque essas constantes estão relacionadas às constantes de Planck e de Avogadro [22].

O ajuste especial do CODATA foi realizado na reunião do TGFC/CODATA em 04 de setembro e o valor final para as constantes SI foram aprovados pelo CCU [23], mas não divulgados até a data de submissão deste artigo, e serão submetidos para aprovação do CIPM em outubro de 2017. Estes resultados farão parte do ajuste completo do CODATA que propagará para outras constantes o efeito da sua fixação. Este ajuste completo será publicado em 31 de dezembro de 2018 [24].

3. CONSEQUENCIAS

3.1. Disseminação da unidade de massa no novo SI

Uma vez que a balança Kibble e o experimento XRCD realizam o quilograma no vácuo, alguns estudos estão sendo realizados para ter novos padrões de massa com estabilidade otimizada para a transferência ar-vácuo e para seu armazenamento no vácuo e em gás inerte. Também são realizadas pesquisas sobre os fenômenos que afetam a transferência vácuo-ar bem como projetos de dispositivos que evitem esta transferência [15]. Além disso, alguns procedimentos têm sido propostos para disseminar a unidade de massa a partir de métodos primários usando um conjunto de padrões St-St de 1 kg que fornecem incertezas de cerca de 15 µg, compatíveis com os melhores valores atuais de Capacidades de Medição e Calibração (CMCs) [25].

A partir da sugestão da Recomendação G 1 (2017) do CCM para desenvolver realizações primárias do quilograma a diferentes valores nominais, alguns projetos estão sendo realizados como a Balança de Força Eletrostática de Miligrama, do NIST [26], a Balança Kibble de Mesa de 10 g, em desenvolvimento pelo NIST em colaboração com o CENAM (México), [27] e na faixa de 1 mg - 100 g, para uso industrial analítico, a Balança Planck do PTB [28]. Essas novas configurações experimentais são baseadas no valor da constante de Planck e indicam uma tendência para futuros instrumentos de pesagem, que não precisarão de calibração utilizando padrões de massa, apenas padrões elétricos. A fim de garantir a continuidade da cadeia de rastreabilidade e a consistência entre os resultados desses experimentos de valores nominais sub quilograma, algumas comparações contemplando esses valores nominais devem ser realizadas, também, de modo a cumprir os princípios do MRA.

Após a redefinição do quilograma será possível aos INMs que não tenham métodos de realização do quilograma obter rastreabilidade diretamente dos INMs com métodos primários ou a partir dos padrões de trabalho do BIPM. A rastreabilidade obtida diretamente de INMs que tenham métodos de realização do quilograma, provavelmente será fornecida por comparações no ar contra os padrões de massa primários destes institutos uma vez que o processo de calibração será mais simples e as incertezas não serão significativamente maiores. De acordo com a Recomendação CCM G 1 (2017) os NMIs e o BIPM disseminarão o valor de consenso da comparação continua dos métodos primários de realização do quilograma [29].

3.2. Futuro da nova definição da unidade de massa

No novo SI, a unidade de massa será baseada nas constantes fixas de Planck e Avogadro que estão ligadas pela constante de estrutura fina, a qual, é

reconhecido, varia temporalmente [30], então a compatibilidade do quilograma realizado pela balança Kibble e pelo método XRCD também mudará. Além disso, recentemente, duas abordagens diferentes baseadas em relógios atômicos propõem vincular o quilograma, respectivamente, à frequência de Césio 133 pelo experimento da balança Kibble [31] e à frequência Compton do Césio 133 por meio do método XRCD [32]. Assim, no novo SI e possivelmente no futuro a definição do quilograma poderá mudar pela substituição da definição do segundo, por exemplo, hoje com base nas frequências do Césio 133, para frequências ópticas [33].

3.3 Impacto da redefinição do quilograma para a indústria, pesquisa científica, comércio e sociedade devido a unidade de massa

Medições são feitas em todas as atividades da sociedade e desempenham um papel importante no cotidiano das pessoas, na ciência, tecnologia, engenharia, comércio, transportes, medicina e navegação etc. As definições e a estabilidade das unidades de medida são, portanto, de interesse público. Neste contexto, o impacto da redefinição de quilograma pode ser dividido em dois aspectos, o impacto para a medição de massa e sua rastreabilidade e o impacto na fixação da constante de Planck.

A medição de massa é uma das mais importantes e difundidas de todas as áreas de metrologia. É amplamente utilizada nos importantes campos da química, indústria farmacêutica, tecnologia alimentar e comércio, entre outros. No entanto, como foi mencionado, a redefinição do quilograma será realizada em um nível de exatidão de cerca de 2×10^{-8} , correspondente ao nível de exatidão da medição da constante de Planck no momento da redefinição, que foi configurada para manter a continuidade e uniformidade da cadeia de rastreabilidade em massa. Neste nível de exatidão,

não há impacto para a medição de massa para a sociedade e o comércio, portanto, a substituição da definição da unidade de massa, embora seja de interesse público não tem efeito para o cidadão comum ou para a sociedade. No entanto, a redefinição de quilograma é de importância primordial para a indústria de pesagem (fabricantes de balanças e pesos-padrão, de alta exatidão), para a comunidade de metrologia de massa, isto é, laboratórios acreditados para a calibração de pesos-padrão de alta exatidão, mas, principalmente no nível dos Institutos Nacionais de Metrologia [22].

A fim de avaliar o impacto sobre a cadeia de rastreabilidade dos INMs neste trabalho foi realizada a análise do valor da constante de Planck baseado nos resultados utilizados pelo CODATA no ajuste de 2014 [14] e todos os resultados disponíveis do LNE (França), NIST (Estados Unidos), NRC (Canadá), NPL (Reino Unido), NMI (Austrália nos anos 80), NMIJ (Japão), PTB (Alemanha), NIM (China) e METAS (Suíça) até 2017 (tabela 1), incluindo incertezas padrão e correlações. Esta análise utilizou o método da Razão de Birge [34-35], e de acordo com este método nenhum dado é excluído mas a incerteza dos resultados individuais podem ser aumentados caso não haja consistência. Seja \mathbf{h} o vetor coluna com n elementos, \mathbf{V} a matriz simétrica de variância-covariância onde os elementos diagonais são as incertezas ao quadrado e os fora da diagonal são as covariâncias estabelecidas e seja $\mathbf{1}^T$ o vetor unidade transposto (linha = {1,1,1,...}) com n elementos a equação (1) apresenta os valores da média ponderada m e sua incerteza $u(m)$.

$$m = \frac{(\mathbf{1}^T \mathbf{V} \mathbf{h})}{(\mathbf{1}^T \mathbf{V} \mathbf{1})} \quad u(m) = \frac{1}{(\mathbf{1}^T \mathbf{V} \mathbf{1})} \quad (1).$$

A Razão de Birge R_B é calculada a partir do desvio quadrático calculado χ^2 e dos graus de liberdade ν , equação (2).

$$\chi^2 = (\mathbf{h} - \mathbf{1}m)^T \mathbf{V} (\mathbf{h} - \mathbf{1}m) \quad v = n - 1 \quad (2)$$

$$R_B = \sqrt{\frac{\chi^2}{v}}$$

O valor máximo que é aceito para a Razão de Birge R_{Bmax} é dado pela equação (3).

$$R_{Bmax} = \sqrt{1 + \sqrt{\frac{2}{v}}} \quad (3)$$

Por este método, se $R_B > R_{Bmax} \approx 1$ os dados são considerados inconsistentes e cada incerteza individual é multiplicada pela razão de Birge. Embora este aumento não tenha efeito sobre a média ponderada, ele faz $R_B = 1$ e altera além das incertezas individuais, a incerteza da média ponderada $u^*(m)$ e a matriz de variância-covariância \mathbf{V}^* , equação (4).

$$u^*(m) = R_B \times u(m) \quad \mathbf{V}^* = R_B^2 \times \mathbf{V} \quad (4)$$

Tabela 1 Valores da constante de Planck h utilizados no ajuste do CODATA 2014 e resultados posteriores até 2017 incluindo a incerteza padrão $u(h)$ ($k = 1$) e incerteza padrão relativa $u_r(h)$.

	$h/10^{-34}$ J s	$u(h)/10^{-34}$ J s	$u_r(h)$
NPL-79	6,626073	$6,7 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$
NIST-80	6,6260658	$8,8 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-6}$
NMI-89	6,6260684	$3,6 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-7}$
NPL-90	6,6260682	$1,2 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-7}$
PTB-91	6,626067	$4,2 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-7}$
NIM-95	6,626071	$1,1 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-6}$
NIST-98	6,62606891	$5,8 \times 10^{-7}$	$8,8 \times 10^{-8}$
METAS-11	6,6260691	$2,0 \times 10^{-6}$	$3,0 \times 10^{-7}$
IAC - 11	6,626069894	$2,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-8}$
NIM-11	6,626104	$5,1 \times 10^{-4}$	$7,7 \times 10^{-5}$
NPL-12	6,6260712	$1,3 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-7}$
PTB - 13	6,62607026	$3,1 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-8}$
NIM-14	6,626104	$5,9 \times 10^{-5}$	$8,9 \times 10^{-6}$
NRC -14	6,62607011	$1,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-8}$
LNE-15	6,6260688	$1,7 \times 10^{-6}$	$2,6 \times 10^{-7}$
NIST-15	6,62606936	$3,8 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-8}$

IAC - 15	6,62607015	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-8}$
NIM-15	6,6261041	$4,7 \times 10^{-5}$	$7,1 \times 10^{-6}$
NIST- 16	6,62606983	$2,2 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-8}$
NMIJ - 17	6,62607006	$1,7 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-8}$
NRC - 17	6,626070133	$6,0 \times 10^{-8}$	$9,1 \times 10^{-9}$
LNE -17	6,62607041	$3,8 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-8}$
NIM-17	6,6260692	$1,6 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-7}$
IAC - 17	6,626070404	$7,8 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$
NIST-17	6,626069934	$8,9 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$

O valor da constante de Planck obtido a partir da Razão de Birge é 6,626 070 132(36) J s, no entanto para os dados da tabela 1 $R_B > R_{Bmax}$, assim não houve consistência entre os dados. Após executar o aumento das incertezas individuais, de acordo com o procedimento, o resultado foi 6,626 070 132(44) J s e a incerteza relativa da constante de Planck que poderia ser atribuída ao kilograma realizado pelos métodos primários após a redefinição é 7×10^{-9} . Estes seriam os resultados pelo método de Birge, que não exclui qualquer resultado.

Geralmente, as análises dos ajustes do CODATA também não excluem dados, no entanto incluem o método de análise dos desvios em relação a média ponderada [36] que tem o propósito de eliminar dados inconsistentes em comparações. Por este método a razão entre d_i (a diferença entre cada valor h_i e a média ponderada m) e a incerteza da diferença $u(d_i)$ deve estar no intervalo (-2, 2), equação (5).

$$d_i = h_i - m \quad u(d_i) = \sqrt{u^2(h_i) - u^2(m)} \quad (5)$$

$$-2 \leq \frac{d_i}{u(d_i)} \leq 2$$

Se o método de análise dos desvios em relação a média ponderada tivesse sido aplicado aos dados da tabela 1, o resultado IAC-17 seria considerado incompatível com os demais figura 6.

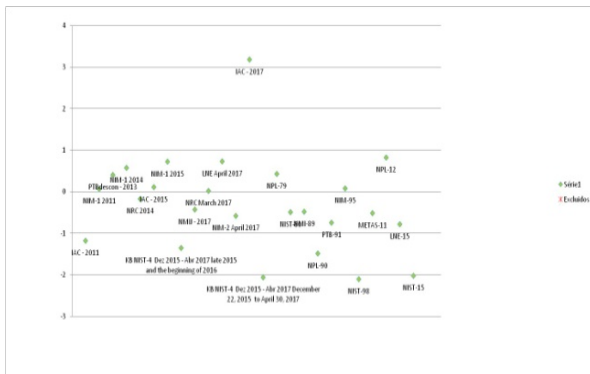


Figura 6 Resultado do IAC-17 inconsistente, indicado por $d_i / u(d_i) > 2$.

Se o dado do IAC-17 fosse excluído da tabela 1 o resultado da constante de Planck seria 6,626 070 058(40) J s e a incerteza relativa seria 6×10^{-9} e não haveria necessidade de aumentar as incertezas figura 7, ou seja, os resultados seriam consistentes.

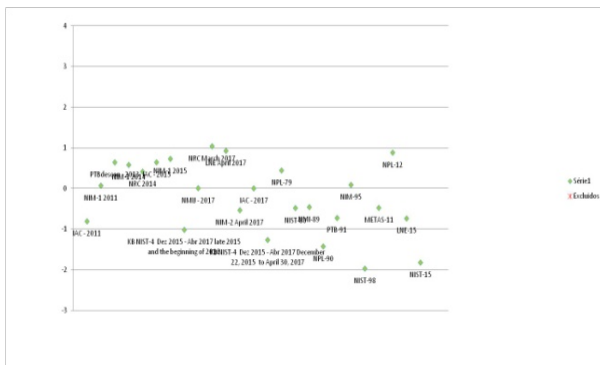


Figura 7 Resultados consistentes com a exclusão do resultado IAC-17.

Alguns argumentos prevalecem para que se mantenham os dados do IAC-17 oriundos do projeto IAC/XRCD. O primeiro é que este método primário, daqueles com resultados em 2017, é o único resultado do método XRCD atualmente disponível com incerteza relativa menor que 2×10^{-8} (o resultado NMIJ-17 se baseia no XRCD mas tem incerteza maior do que o IAC-17). O segundo é que, embora o valor da constante de Planck mude significativamente sem o resultado IAC-17 a incerteza relativa, que é o parâmetro para aceitação na recomendação CCM

G1 (2013), não reduz muito sem o IAC-17 em relação a incerteza relativa quando o resultado é mantido e aumenta-se a incerteza. Portanto, acredita-se que na análise do CODATA o resultado do IAC-17 deve ter sido mantido e a incerteza aumentada. Ainda, com as incertezas aumentadas o resultado IAC-17 continua incompatível com os demais, figura 8.

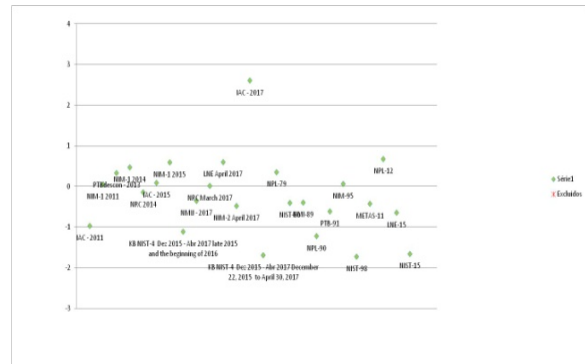


Figura 8 Resultado do IAC-17 inconsistente mesmo com o aumento de incerteza.

Como não houve consistência entre os resultados da tabela 1, as incertezas individuais dos experimentos disponíveis em 2017 e, que poderiam prover rastreabilidade aos INMs sem métodos primários, deveriam ser aumentadas para aqueles da tabela 2.

Tabela 2 Resultados da constante de Planck disponíveis em 2017 com incertezas relativas após aumento menores que 5×10^{-8} .

	$h/10^{-34}$ J s	$u(h)/10^{-34}$ J s	$u_r(h)$
IAC-17	6,626070404	$9,5 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$
NIST-17	6,626069934	$1,1 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-8}$
NMIJ-17	6,62607006	$2,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-8}$
NRC-17	6,626070133	$7,3 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$

A análise do impacto sobre a incerteza na cadeia de rastreabilidade de padrões de massa da classe da Organização Internacional de Metrologia Legal OIML E₁ [37] conforme Borys *et al* [22] a partir dos dados da tabela 2 e da média ponderada aumentada, mostra que não há

efeito destes resultados sobre esta classe de exatidão de padrões, figura 9. Assim, qualquer um destes métodos primários poderia ser utilizado como fonte de rastreabilidade para os INMs.

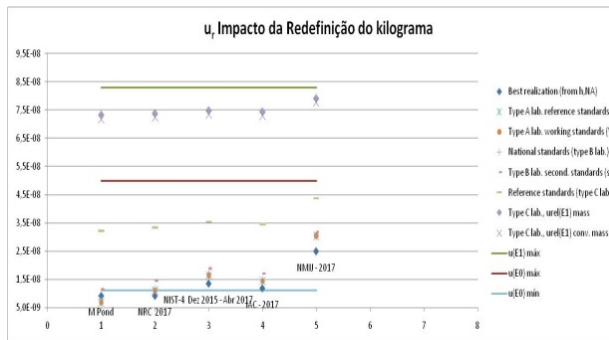


Figura 9 Gráfico indicando que para qualquer das fontes de rastreabilidade (tabela 2 e a média ponderada) é possível calibrar padrões de 1 kg E₁ com incertezas menores que a máxima da classe.

A avaliação do impacto sobre as (CMCs) da maioria dos INMs, pertencentes às cinco regiões metrológicas, disponíveis no sítio do BIPM até julho de 2017, indica que se a incerteza relativa da média ponderada aumentada ou o resultado do NRC-17 fossem utilizados como a incerteza para a realização da unidade de massa, nenhuma CMC seria alterada, se a fonte de rastreabilidade fosse o IAC-17 apenas o NPL teria que alterar suas CMCs, se fosse NIST-17, 9 INMs teriam que alterar suas CMCs e se fosse o NMIJ-17, 25 INMs teriam que alterar suas CMCs, figura 10.

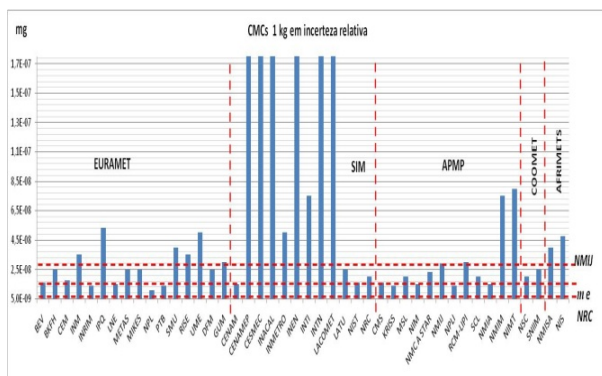


Figura 10 Gráfico indicando as CMCs dos INMs afetadas pelas fontes de da (tabela 2 e a média ponderada).

Embora os resultados apresentados nesta seção não sejam aqueles do ajuste especial do CODATA 2017, os quais até a submissão deste trabalho não foram publicados, acreditamos que os resultados aqui apresentados sejam compatíveis com os do CODATA e que foram aprovados pelo CCU.

3.4 Impacto da redefinição do quilograma para a indústria, pesquisa científica, comércio e sociedade devido a constante de Planck

O impacto da fixação da constante de Planck é uma questão que abrange mais do que as medições de massa, uma vez que outras unidades de base da SI, como o ampere, o mol e a candela, dependem da unidade de massa [38] portanto, algumas consequências estão relacionadas a outras áreas da metrologia como a metrologia quântica que abrange a nanometrologia, a metrologia óptica e a elétrica [39-40]. Desta forma, a redefinição do quilograma é de interesse direto para um pequeno grupo de acadêmicos, cientistas e engenheiros que lidam com os aspectos da metrologia conceitual, relativos à vinculação da definição das unidades de base a constantes fundamentais da natureza, e sua interrelação de modo a conferir consistência e coerência ao SI. Por outro lado, existem alguns desenvolvimentos tecnológicos indiretamente surgidos do esforço da redefinição do quilograma como a nova eletrônica aplicável à tecnologia do computador quântico [41] e a produção comercial de silício 28 enriquecido com um grau de pureza de 99,999 %, com potencial de aplicação na eletrônica dos computadores quânticos, derivada da tecnologia desenvolvida para a purificação do ²⁸Si para o projeto IAC/XRCD.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram revisadas as atividades de preparação para redefinição do quilograma, seus desdobramentos e as possíveis consequências deste processo. Como foi apresentado, o processo de redefinição do quilograma não terá impacto

sobre a cadeia de rastreabilidade à unidade e nem impacto imediato pela fixação da constante de Planck. No entanto, já no novo SI projetos futuros podem alterar a metodologia de disseminação da unidade de massa seja por novos instrumentos de pesagem ou pela definição da unidade de massa em função de outras unidades do SI.

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] BIPM
<http://www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-roadmap.pdf>
- [5] CCM 2018 CCM RECOMMENDATION G 1 (2013) On a new definition of the kilogram **1**
- [6] CCU 2016 Consultative Committee for Units (CCU) Minutes 2016
- [7] BIPM <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>
- [8] CCM 2015 Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) 1–24
- [9] Girard G 1994 The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992) *Metrologia* **31** 317–36
- [10] Stock M, *et al.* 2015 Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies *Metrologia* **52** 310–6
- [11] de Mirandés E, *et al.* 2016 Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram, part II: evolution of the BIPM as-maintained mass unit from the 3rd periodic verification to 2014 *Metrologia* **53** 1204–14
- [12] Sanchez C A, *et al.* 2015 Corrigendum to the 2014 NRC determination of Planck’s constant *Metrologia* **52** L23–L23
- [13] Stock M 2015 Technical Protocol for the Pilot Study of 1 kg mass standards calibrated with relation to primary realization experiments for the unit of mass
- [14] 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
- [15] Davidson S, Berry J, Abbott P, Marti K, Green R, Malengo A and Nielsen L 2016 Air–vacuum transfer; establishing traceability to the new kilogram *Metrologia* **53** A95–113
- [16] Stock M, *et al.* 2017 Report on CCM Pilot Study CCM . R-kg-P1 Comparison of future realizations of the kilogram Final Report
- [17] de Mirandés E, Barat P, Idrees F and Bautista D 2017 Present status of the BIPM ensemble of mass standards
- [18] BIPM 2011 BIPM ensemble of mass standards **1** 1–3
- [19] CCM 2017 Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) 1–24
- [20] Nielsen L 2017 Presentation on 16th CCM Meeting: Status on the conditions stated in Recommendation G1 (2013) vol 1pp 1–17
- [21] CCU 2016 Strategy for the Consultative Committee for Units, CCU, for the period 2016 to 2023 1–4
- [22] 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
- [23] CCU 2017 CCU RECOMMENDATION U1

(2017) **1** 2017–8

[24] Committee C, Prof U and Ullrich J 16 th Meeting of the CCM Report of the President of the Consultative Committee for the Units CCU President ' s Report

[25] Nielsen L 2016 Disseminating the unit of mass from multiple primary realisations *Metrologia* **53** 1306–16

[26] Shaw G A, *et al.* 2016 Milligram mass metrology using an electrostatic force balance *Metrologia* **53** A86–94

[27] Manuel L, *et al.* 2016 COMPARISON OF TWO MODELS OF TABLE TOP WATT BALANCES 3–4

[28] Universit T 2017 New scales for the new kilogram Preparing for the redefinition of the kilogram: Together with the Technische Universität Ilmenau , PTB is developing scales that are suitable for industry and can be calibrated without weights

[29] Stock M, *et al.* 2017 Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition *Metrologia* **Accepted M**

[30] Klitzing K von 2011 Presentation The New SI: Units of measurement base on fundamental constants 1–60

[31] Haddad D, *et al.* 2016 Bridging classical and quantum mechanics *Metrologia* **53** A83–5

[32] Lan S-Y, Kuan P-C, Estey B, English D, Brown J M, Hohensee M A and Muller H 2013 A Clock Directly Linking Time to a Particle's Mass *Science* (80-.). **339** 554–7

[33] Steele A 2014 The New International System of Units 1–48

[34] Weise K and Wöger W 2000 Removing model and data non-conformity in measurement evaluation *Meas. Sci. Technol.* **11** 1649–58

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

[36] Cox M G and Harris P M 2012 The evaluation of key comparison data using key comparison reference curves *Metrologia* **49** 437–45

[37] OIML 2004 International Recommendation OIML R 111-1 Edition 2004 (E) *Int. Organ. Leg. Metrol.* **2004** 1–78

[38] Becker P, *et al.* 2007 Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units *Metrologia* **44** 1–14

[39] Williams C J 2016 The SI and Quantum Metrology

[40] Piquemal F, *et al.* 2017 Metrology in electricity and magnetism: EURAMET activities today and tomorrow *Metrologia* **54** R1–24

[41] PTB 2003 Novel electronics for a Quantum computer Contact at PTB : *PTBnews*