

CADERNOS DE METROLOGIA

Especial SI/2019



Sumário

1 Editorial



2



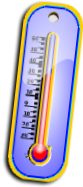
Adoção Mundial da Redefinição do Quilograma em 2019 – Fabio A. L. Cacaís & Victor M. Loayza

24

O Novo SI e Seu Impacto na Metrologia Elétrica no Brasil – Regis P. Landim



33



O Novo Kelvin no SI – Klaus N. Quelhas

39

A Redefinição do Mol: Avanços nas Medições em Química e Biologia – Bruno C. Garrido



41



Metrologia 4.0: Indústria 4.0 e Internet das Coisas – Luiz V. G. Tarelho & Rodolfo S. L. de Souza

45

Expediente

Editorial

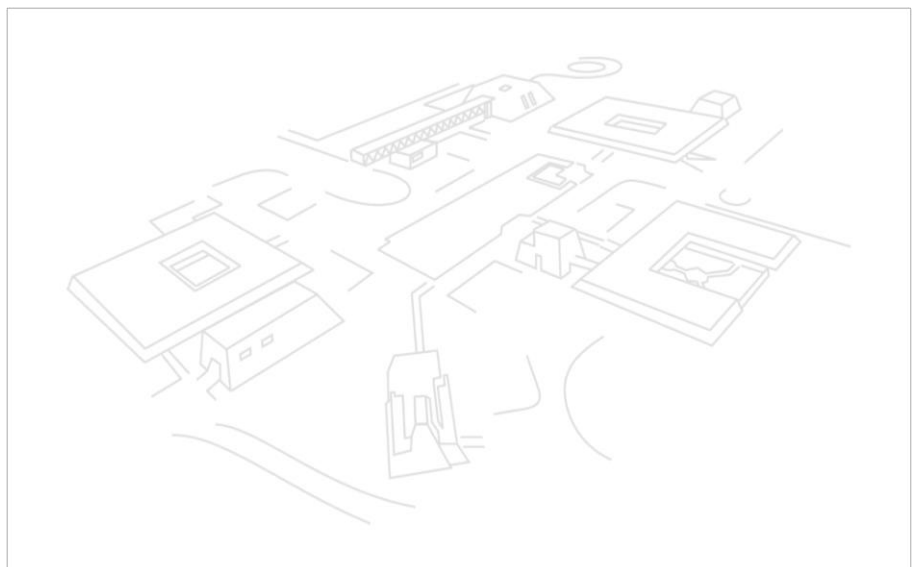
Presentes na China Imperial, no antigo Egito, e citadas até na Bíblia, as medições começaram a ser utilizadas, há milênios, inicialmente como ferramenta de suporte para trocas comerciais. Se antes essas medidas eram “imprecisas”, pois baseavam-se em critérios mutáveis como o tamanho de partes do corpo dos governantes - ao longo da história foram se desenvolvendo e conquistando um viés cada vez mais científico. Hoje, as medições ultrapassaram o caráter de ferramentas para obtenção de conhecimento e alcançaram outro patamar: são, elas mesmas, um tipo específico de conhecimento.

A despeito das ciências naturais terem, a seu próprio modo, entes ou fenômenos de diferentes propriedades, a metrologia – a ciência das medições e suas aplicações - alcança, de maneira transdisciplinar, cada uma dessas áreas do conhecimento. A base para todo o espectro de aplicações de medições depende, de início, de um bom sistema de unidades de medida. Sem um sistema bem definido, coerente e desejosamente universal, a comunicação do mesmo está sujeita a ruídos – dificultando o processo de disseminação desse conhecimento. Nosso entendimento do mundo depende em larga escala da linguagem, e as unidades de medida, os padrões de medição e os demais componentes que constituem o cerne da atividade metrológica são um sistema conceitual e prático de comunicação.

No espírito das mudanças históricas decorrentes da Redefinição do Sistema Internacional de Unidades, unanimemente aprovado na 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), na França, em 2018, este periódico se propõe a integrar-se ao portfólio de canais de disseminação da cultura metrológica. Nosso intento é dar transparência ao que o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), instituição porta-voz da metrologia no Brasil, produz de mais avançado e atual em medições e seus desdobramentos para a cadeia produtiva, a comunidade científica e a sociedade.

Os artigos desta edição especial tratam, de forma abrangente e acessível, porém com o devido rigor técnico-científico, da repercussão das mudanças aprovadas nas áreas da metrologia científica. Seus autores atuam em campos diretamente relacionados a redefinição do SI e suas contribuições são de particular interesse tanto para especialistas quanto entusiastas da ciência das medições e suas aplicações.

Os Editores



Adoção Mundial da Redefinição do Quilograma em 2019

Fabio Andre Ludolf Cacais
Pesquisador
Divisão de Metrologia Mecânica (Dimec)
E-mail: facacais@inmetro.gov.br

Victor Manuel Loayza
Chefe do Laboratório de Massa (Lamas)
Divisão de Metrologia Mecânica (Dimec)

1. Introdução

A definição da unidade de massa do Sistema Internacional de Unidades (SI) [1], o quilograma, foi redefinida a partir de uma constante fundamental, a constante de Planck, em 2018 [2] e, a adoção mundial desta nova definição ocorrerá em 20 de maio de 2019, figura 1.

- O processo de redefinição do quilograma, que levou 25 anos para se findar, foi motivado por diversos fatores:
- 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 em redefinir unidades de base em função de constantes fundamentais;
- Viabilidade de redefinir outras unidades de base implementando assim o novo SI, figura 2 [3];
- Deriva da massa do protótipo internacional do quilograma (IPK) detectada na Terceira Verificação Periódica dos protótipos nacionais do quilograma [4].

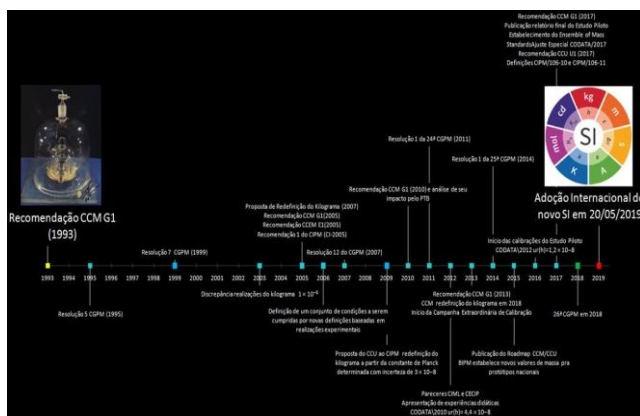


Figura 1 Linha do tempo do processo de redefinição do quilograma.

Neste contexto, este trabalho revisa as motivações e etapas de execução do processo de redefinição do quilograma como também as consequências de sua adoção formal em 2019 para o público em geral e para a comunidade da área de metrologia de massa.

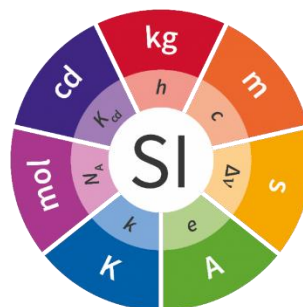


Figura 2 SI Illustration Representação gráfica do SI incluindo as unidades de base e as correspondentes constantes fundamentais que as definem [3].

2. Motivação

2.1 Constantes fundamentais no SI

Constantes fundamentais são verdadeiros invariantes da natureza que compõem muitas das equações que descrevem fenômenos físicos e químicos [5] e cujos valores são determinados experimentalmente por diversos métodos de medição.

No SI, estabilidade de longo prazo com o mais alto nível de exatidão é um requisito para a definição de unidades de medida que deve ser cumprido pelas realizações experimentais que ligam as unidades SI às constantes fundamentais [6]. Assim, acompanhando o desenvolvimento de realizações experimentais cada vez mais precisas das unidades SI [1], a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) desde a primeira redefinição do metro na década de 60 [7] tem decidido substituir as definições de unidades baseadas em padrões físicos ou experiências não reprodutíveis por constantes fundamentais ou atômicas que permitam realizações experimentais das unidades que cumprem os requisitos mencionados.

A relação entre unidades SI e constantes atômicas e fundamentais aparece, por exemplo, nas definições do segundo, do ampere e do metro. O segundo desde 1963 é definido em função da frequência da radiação emitida pelo césio 133 e fixa este valor. A definição do ampere, fixa o valor da constante magnética μ_0 em $4\pi \times 10^{-7}$ H/m e desde 1983 o metro fixa o valor da velocidade da luz no vácuo c_0 em 299 792 458 m/s. Ainda, a partir da física básica estas constantes estão relacionadas à constante elétrica $c_0^2 \mu_0 \epsilon_0 = 1$, desta forma a constante elétrica ϵ_0 também tem seu valor fixado.

As constantes fundamentais e atômicas que definem as unidades do SI apresentam valores sem incerteza [8] e apenas as constantes fundamentais que definem unidades SI são fixadas dentre o conjunto completo de constantes fundamentais que compõem as teorias científicas e cujos valores e incertezas figuram como dados de referência em diversos handbooks. A atribuição de valores numéricos e incertezas de medição aos dados de referência é realizada desde 1969 pelo Grupo de Trabalho sobre Constantes Fundamentais (TGFC) do Committee on Data for Science and Technology (CODATA).

2.1.1 Ajuste de valores das constantes pelo CODATA

O objetivo do CODATA é fornecer periodicamente um conjunto de valores auto-consistentes para constantes e fatores de conversão da física e química com base no ajuste das equações em relação a todos os dados relevantes disponíveis naquele momento. Este ajuste é realizado para todas as constantes fundamentais, exceto para a constante gravitacional G que não está relacionada com as demais e é ajustada separadamente [9] e também para as constantes que definem unidades do SI porque apresentam valores fixos, portanto não são ajustadas periodicamente.

O ajuste das constantes fundamentais é realizado pelo método dos mínimos quadrados ponderados e a análise de dados discrepantes considera o teste de consistência c_2 , o método da Razão de Birge, o coeficiente de auto-sensibilidade, os resíduos normalizados e as diferenças bilaterais [10]. Como resultado, valores numéricos e incertezas de medição são definidos para as constantes.

2.1.2 Fixação do valor numérico de constantes relacionadas às unidades SI

As constantes usadas para definir unidades do SI têm seus valores numéricos fixados e recomendados pelos Comitês Consultivos (CCs) do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), como ocorreu com o comprimento de onda da radiação do kriptônio 86 em 1960 [11] e a velocidade da luz em 1973 [12] utilizadas para definir o metro e também ocorreu em 1963 com a frequência da radiação emitida pelo césio 133, utilizada para definir o segundo [13].

A frequência ou comprimento de onda de uma radiação de um elemento químico específico são exemplos de constantes naturais, no entanto não são consideradas constantes fundamentais e, portanto não são ajustadas pelo CODATA. Da mesma forma, a densidade do mercúrio ou da água [14] sob certas condições podem ser consideradas também constantes naturais e por este motivo a água foi utilizada como referência para o quilograma no sistema métrico até 1799, quando serviu de referência para definição da unidade de massa baseada em um cilindro de platina (Pt), o quilograma dos archives, o qual serviu por último como referência para definição da unidade de massa atual, baseada no cilindro de platina-irídio (Pt-Ir) [15].

O valor de uma constante a ser fixada é um valor de consenso obtido a partir dos valores de maior exatidão das determinações experimentais da constante. Embora o número de dígitos no valor fixado seja escolhido pelo CIPM e seus CCs, em geral, corresponde ao número de dígitos decimais da incerteza com um ou dois dígitos significativos. Uma vez fixado, o valor da constante é considerado como um número aonde os dígitos não especificados a direita são preenchidos com zeros e a incerteza antes atribuída à constante é passada para o valor da unidade obtido experimentalmente.

O valor fixado da constante pelo CIPM é adotado pelo CODATA em seus ajustes das demais constantes fundamentais, como ocorreu por exemplo com o da velocidade da luz, recomendado em 1973 [16].

2.2. Necessidades Conceituais do SI relacionadas à Metrologia Elétrica

Até a década de 60 tanto o metro quanto o segundo eram definidos a partir de grandezas mecânicas ou macroscópicas. O segundo era definido como o período de rotação da terra em torno de seu eixo e requeria para sua medição observações astronômicas de alta exatidão que não estavam disponíveis a todos. O metro era definido como o comprimento entre linhas no protótipo internacional do metro, uma barra feita em Pt-Ir, mantido na França no Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) e desta forma também não era de fácil acesso a qualquer usuário.

Com a primeira redefinição do metro e do segundo ocorreu a substituição destas definições de natureza mecânica por outras de natureza atômica ou quântica e que permitiram realizar as unidades com alta exatidão, estabilidade e, a princípio, em qualquer lugar e por qualquer um habilitado com o nível de conhecimento adequado. Estas definições conferiram praticidade às medições de tempo com alta exatidão e, em conjunto com a definição do metro a partir de uma constante fundamental, evidenciaram vantagens significativas na substituição das antigas definições e que, portanto este deveria ser o caminho a seguir dentro do SI no futuro [17].

Embora seja uma característica desejável, que as unidades do SI se relacionem a constantes fundamentais ou atômicas, é necessário que sejam projetados experimentos que permitam relacionar

suas definições, em geral macroscópicas, a tais constantes. Assim, estes métodos de medição devem ser capazes de amplificar efeitos atômicos ou quânticos para a escala macro mantendo a continuidade em relação à definição anterior, portanto não causando descontinuidade na cadeia de rastreabilidade previamente existente. Esta condição se junta às já mencionadas: melhor estabilidade, realização com a mais alta exatidão disponível a todos e em qualquer lugar e no mínimo a mesma exatidão prévia na realização da unidade.

Dois métodos de medição que amplificam os efeitos quânticos são as realizações do volt e do ohm, respectivamente a partir dos efeitos Josephson e Hall Quântico, os quais relacionam as respectivas unidades às constantes Josephson K_J e Von Klitzing R_H que por sua vez dependem de duas constantes fundamentais: a carga elementar e e a constante de Planck h , equação (1) [18].

$$K_J = 2 \frac{e}{h} \quad R_H = \frac{h}{e^2} \quad (1)$$

No SI o ampere é a unidade de base para grandezas elétricas e no início dos anos 90 era realizado no melhor caso com incertezas relativas da ordem de 4×10^{-7} [19] (mesmo hoje a melhor realização no SI é de 2×10^{-8} [20]) e as constantes Josephson K_J e Von Klitzing R_H e as correspondentes medições de voltagem e resistência a partir dos efeitos Josephson e Hall Quântico podiam ser executadas no SI, respectivamente, com incertezas relativas de 4×10^{-7} e 2×10^{-7} . No entanto, as reprodutibilidades das representações (realização sem rastreabilidade às definições de unidades do SI) do volt e do ohm por padrões Josephson e Hall Quântico eram nesta época da ordem, respectivamente, de 5×10^{-9} e 2×10^{-8} , quando as constantes eram consideradas fixas, portanto, sem considerar incerteza proveniente da rastreabilidade no SI [21-22]. A fim de aproveitar estas melhores reprodutibilidades, que permitiriam representar também o ampere com maior exatidão, o CIPM recomendou a implementação de constantes elétricas convencionais (fixadas fora do SI) para representar o volt e o ohm, respectivamente, a partir dos efeitos de Josephson e Hall Quântico devido à sua melhor reprodutibilidade do que qualquer realização experimental a partir da definição do ampere [23]. Os valores convencionais escolhidos para fixar as constantes, $K_{J,90} = 483\,597,9$ GHz/V

constante de Avogadro. Assim, os resultados dos primeiros dois experimentos (mais exatos, distanciados no tempo por 30 anos e realizados pelo NPL) foram usados para avaliar a estabilidade do IPK indiretamente por meio do protótipo do NPL.

Como resultado, a deriva relativa do IPK foi 1×10^{-9} por ano ($1 \mu\text{g}$ em massa) dentro de um limite superior de 2×10^{-8} por ano. Contudo, se o monitoramento fosse realizado apenas pela balança Kibble, levaria um período de mais de 10 anos para conhecer a deriva do IPK dentro do mesmo limite superior. Assim, não fazia sentido naquele momento monitorar o IPK pela balança Kibble quando já se conhecia sua deriva anual em relação às constantes fundamentais por outros métodos [31].

3. Justificativa

3.1 A deriva do quilograma determinada a partir da Terceira Verificação Periódica Constantes fundamentais no SI

Durante a terceira verificação periódica dos protótipos nacionais (1989 - 1992), os protótipos nacionais, os padrões de trabalho e de uso especial do BIPM e as seis cópias oficiais do IPK, todos feitos em Pt-Ir, foram comparados direta ou indiretamente com o IPK após a limpeza e lavagem (conforme é definida a unidade de massa) [4]. Na figura 4 é mostrada a cadeia de rastreabilidade dos padrões do BIPM.

Protótipo Internacional (IPK)	μg					
Cópias Oficiais	K1	7	8(41) [±]	32	43	47
Protótipos para uso especial	25					
Protótipos para uso rotineiro	9	31	67			

Figura 4 Estrutura hierárquica dos protótipos do BIPM em 1992.

As seis cópias oficiais e o IPK são mantidos, cada um, em uma câmara de vidro tripla e em condições controladas do ar ambiente (sem vácuo), juntos dentro de um cofre. As comparações das seis cópias oficiais evidenciaram uma diminuição na massa do IPK de $50 \mu\text{g}$ desde o seu estabelecimento um século antes (figura 5 [32]).

Considerando que o IPK e suas cópias foram utilizados apenas para verificações periódicas, que eles são feitos a partir do mesmo material e processo de fabricação, e que o método de lavagem e limpeza do

BIPM é altamente reprodutível, foi assumida uma redução anual de massa para o IPK de $0,5 \mu\text{g}$, ou em termos relativos 5×10^{-10} , e atribuída a efeitos de interações do ar com a superfície e/ou desgaste do IPK[33].

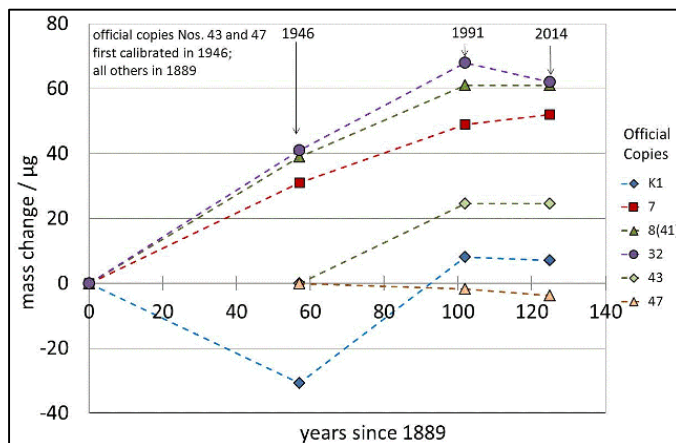


Figura 5 Deriva da massa das seis cópias oficiais do IPK desde 1889. A massa do IPK é o eixo horizontal [32].

3.2 Considerações sobre a deriva do IPK

A frequência de calibração típico da ordem de 10 anos dos protótipos nacionais contra os padrões de trabalho do BIPM acarretaria em uma deriva máxima na massa dos protótipos nacionais de $5 \mu\text{g}$. A fim de contornar este problema o BIPM, após a terceira verificação periódica, decidiu aumentar a incerteza de calibração dos protótipos nacionais para cerca de $6 \mu\text{g}$ [34]. Este aumento de incerteza não representou aumento significativo da incerteza na transferência da unidade de massa entre os protótipos nacionais e os padrões de aço-inox dos INMs, visto que o maior componente de incerteza nesta transferência, deve-se à correção do efeito de empuxo do ar, da ordem de $15 \mu\text{g}$. Portanto, o efeito da deriva do IPK não afetaria a cadeia de rastreabilidade aos protótipos nacionais.

É importante ressaltar que a deriva anual do IPK obtida a partir de comparações (redução da massa) foi estimada assumindo que as cópias oficiais fossem estáveis, em unidades de massa, desta forma esta deriva é relativa. Enquanto isso, a deriva anual do IPK como obtida por realizações elétricas (aumento da massa) é tomada em relação às constantes, portanto, diz respeito ao valor absoluto da unidade de massa e aplica-se tanto ao IPK quanto a suas cópias.

Mesmo não tendo sido constatado impacto sobre a cadeia de rastreabilidade ao IPK oriunda da deriva relativa dos protótipos, as considerações sobre as

derivadas (relativa e absoluta) do IPK somadas às motivações por definições de unidades SI em termos de constantes fundamentais ou atômicas e ainda ao inconveniente de cunho conceitual de a massa do IPK ser ainda a única definição de unidade não realizada experimentalmente (unidade definida sem incerteza) [35] resultaram na recomendação do Comitê Consultivo de Massa e Grandezas Correlatas CCM GI (1993) [36] e na resolução 5 da CGPM (1995) [37] que recomendou que os laboratórios prosseguissem seus trabalhos com o objetivo de monitorar a estabilidade do protótipo internacional, o primeiro passo para a redefinição de quilograma [38].

4. Métodos experimentais para vincular a unidade de massa a constantes fundamentais

Durante o processo de redefinição do quilograma diversos métodos foram desenvolvidos com o propósito de vincular o quilograma às constantes fundamentais [39], entre estes dois foram os mais proeminentes, a balança Kibble figura 6 e o método de cristalografia de raios-X (XRCD) da Coordenação Internacional Avogadro (IAC), figura 7.

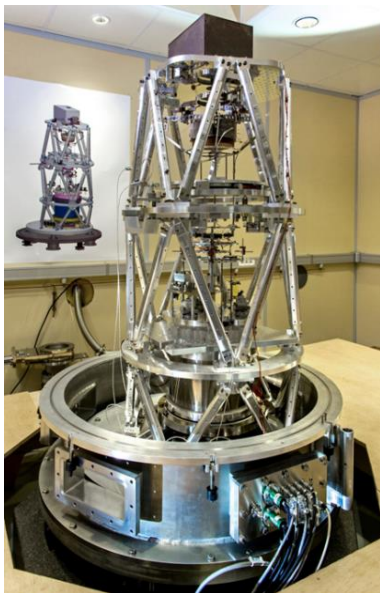


Figura 6 Balança Kibble do BIPM.

4.1 A Balança Kibble

A balança Kibble baseia-se no princípio da igualdade entre as potências mecânica e elétrica surgidas nas etapas de pesagem (figura 8 [40]) e móvel (figura 9 [40]) e entre estas etapas o gradiente de fluxo magnético é considerado constante.



Figura 7 Dezesesseis instituições de diversos países que estiveram envolvidos no estabelecimento das esferas de silício do projeto IAC/XRCD em 2011.

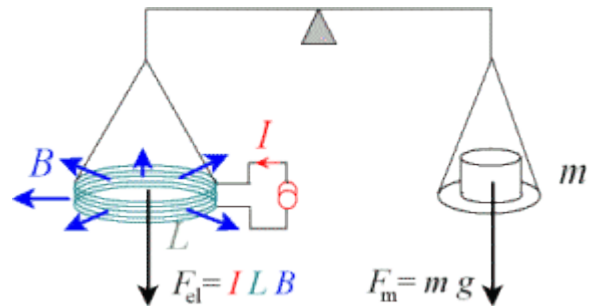


Figura 8 Na fase de pesagem, a balança Kibble funciona como um comparador de massa com uma força restauradora eletromagnética. O padrão de massa é equilibrado por uma força de Lorentz produzida pela circulação de uma corrente I em uma bobina com comprimento L imersa em um campo magnético radial B . A corrente é medida a partir das referências de Josephson e Hall Quântico [40].

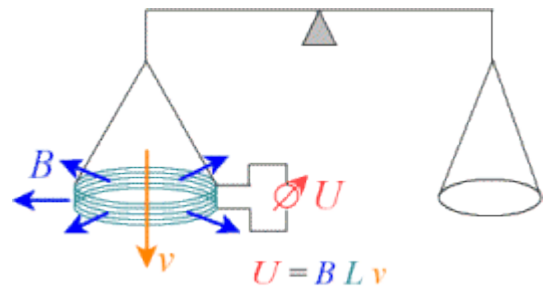


Figura 9 Fase móvel da balança Kibble. A bobina é movida verticalmente com a velocidade v através do mesmo campo magnético B , o que leva a uma tensão induzida U [40].

A relação entre a massa m em quilogramas e a constante de Planck h , equação (2), inclui os valores numéricos das tensões $\{U1\}_{J-90}$ e $\{U2\}_{J-90}$ medidas a partir de referências convencionais Josephson nas fases de pesagem e móvel, o valor numérico para a resistência $\{R_I\}_{K-90}$ medido na fase de pesagem a partir de referências convencionais do efeito Hall Quântico, as constantes elétricas convencionais K_J e R_{FH} , a aceleração de gravidade local g e a velocidade v da bobina na fase móvel [20].

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

4.2 A Esfera de ^{28}Si do método de cristalografia de raios-X (IAC/XRCD)

O método XRCD baseia-se na suposição de que a densidade de uma célula regular unitária de uma esfera de silício 28 (^{28}Si) monocristalino e isotópico é igual à densidade da esfera. Em uma célula unitária de silício monocristalino, existem 8 átomos (um átomo por plano) contido em um volume para o qual o parâmetro de rede é a [34], figura 10.

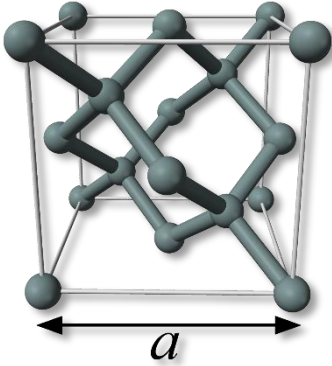


Figura 10 A célula unitária de silício tem um arranjo de empacotamento cúbico de faces centradas de 8 átomos com base. O volume da célula unitária é medido determinando o parâmetro de rede a , que é o comprimento de um dos lados do cubo [41].

$$m_{esf} = \left[\frac{8A_r(^{28}\text{Si})V_{esf}10^{-3}}{a^3} \right] \frac{M_u}{N_A} \quad (3)$$

Embora cada experimento relacione a massa com uma constante diferente, elas podem ser relacionadas a partir da equação (4), que envolve a constante de estrutura fina α , a massa atômica relativa do elétron $A_r(e)$, a velocidade da luz c , a constante de massa molar M_u e a constante de Rydberg R_∞ [5].

$$N_A h = \frac{\alpha^2 c A_r(e)}{2R_\infty} M_u \quad (4)$$

Na equação (4), 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 $4,5 \times 10^{-10}$ [9], portanto, a equação (4) permite converter a constante de Avogadro na constante de

Planck e, desta forma, comparar os resultados da balança Kibble e do método XRCD, com incertezas relativas não menores do que 1×10^{-8} , sem aumento significativo de incerteza [43].

4.3 Incerteza do IPK no novo SI

É possível entender o que acontecerá com o valor de massa de IPK após a definição do quilograma por constantes fundamentais a partir de algumas considerações sobre os valores numéricos $\{m\}$ e $\{m_{esf}\}$ das massas, respectivamente, nas equações (2) e (3).

A partir da propriedade de coerência do SI, estes termos estão relacionadas à unidade de massa, a massa de IPK m_{IPK} , equações (5.a-5.c).

$$m_{IPK} \triangleq 1\text{kg} \quad (5.a)$$

$$m = \{m\}[1\text{kg}] \Rightarrow m = \{m\}m_{IPK} \quad (5.b)$$

$$m_{esf} = \{m_{esf}\}[1\text{kg}] \Rightarrow m_{esf} = \{m_{esf}\}m_{IPK} \quad (5.c)$$

Para entender o princípio sobre o que acontecerá com a unidade de massa após a redefinição, deve-se reescrever as equações (2) e (3) explicitamente em função da massa fixa (sem incerteza) m_{IPK} e, considerando as equações (5.a - 5.c), equações (6.a) e (6.b).

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

$$N_A = \left[\frac{8A_r(^{28}\text{Si})V_{esf}10^{-3}M_u}{a^3 \{m_{esf}\}} \right] \frac{1}{m_{IPK}} \quad (6.b)$$

Estas equações, quando consideradas modelos de medição, podem ser utilizadas para determinar as incertezas relativas, respectivamente, para a constante de Planck $u_r(h)$ e para a constante de Avogadro $u_r(N_A)$, antes que sejam fixadas. 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. Estas incertezas 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 (2), (3) e (5.a - 5.c), a massa IPK pode ser inferida pelas equações (7.a) e (7.b).

$$m_{\text{IPK}} = \left[\frac{\{U_1\}_{\text{J-90}} \{U_2\}_{\text{J-90}} K_{\text{J-90}}^2 R_{\text{K-90}}}{4 \{R_1\}_{\text{K-90}} g v \{m\}} \right] h \quad (7.a)$$

$$m_{\text{IPK}} = \left[\frac{8A_r ({}^{28}\text{Si}) V_{\text{esf}} 10^{-3} M_u}{a^3 \{m_{\text{esf}}\}} \right] \frac{1}{N_A} \quad (7.b)$$

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, que se deve às incertezas relativas dos respectivos termos nos colchetes, equação (8).

$$u_r(m_{\text{IPK}}) = \begin{cases} u_r(h) \\ u_r(N_A) \end{cases} \quad (8)$$

Cabe ressaltar que devido a esta transferência da incerteza relativa das constantes para a unidade de massa, após a redefinição, os experimentos de determinação das constantes passaram a ser chamados experimentos de realização do quilograma.

4.4 Definição da constante utilizada para redefinir o quilograma

Entre 2009 e 2010 as decisões dos comitês consultivos do CIPM definiram a constante que seria utilizada para redefinição do quilograma. A Recomendação QI (2009) do Comitê Consultivo para Quantidade de Substância (CCQM) [44] decidiu que o mol deveria ser definido pela constante de Avogadro, juntamente com o quilograma, uma vez que o quilograma e o mol são unidades interrelacionadas no SI [45]. Em 2010, a recomendação CCM GI [46] estabeleceu que o quilograma deveria ser redefinido fixando o valor da constante de Planck de acordo com as determinações pela balança Kibble e pelo experimento XRCD. Estas decisões foram confirmadas pela Resolução I da 24ª CGPM (2011) [47].

Uma vez que a constante de Planck seria a utilizada para redefinir o quilograma, a incerteza relativa da massa do IPK devido à constante de Avogadro deveria ainda considerar a incerteza relativa da equação (4), caso as incertezas relativas dos resultados fossem menores do que 1×10^{-8} .

5. Justificativa

5.1 Requisitos para Redefinição do Quilograma

Atendendo à solicitação de participação da comunidade científica e técnica especificada na recomendação CI-2005, em 2006 um conjunto de condições que deveriam ser cumpridas por novas definições de unidades baseadas em realizações experimentais foi proposto: universalidade, exatidão, acessibilidade, estabilidade, aceitabilidade da teoria física, compreensibilidade e continuidade [48].

A partir destas condições e levando em conta as considerações, propostas e pontos de vista das comunidades técnicas e científicas apresentados entre 2010 e 2013 [34, 49-52], o CCM publicou recomendação GI (2013) e estabeleceu os requisitos para a redefinição do quilograma [53]:

"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 μg ":

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.

5.2 Análise dos requisitos

Os requisitos tiveram propósitos específicos para alcançar o objetivo: "após a redefinição, 1 kg poderá ser realizado e disseminado com uma incerteza padrão não maior que 20 μg ":

Requisitos I e 2: pelo menos três resultados de experimentos independentes, incluindo dois métodos físicos diferentes balança Kibble e cristalografia de raios-X (XRCD) 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 garantiria que, quando a consistência fosse alcançada, poderia-se verificar o viés entre os experimentos, que os resultados das replicações do mesmo experimento não deveriam ser considerados mais importantes do que os demais e que o resultado não deveria ser uma consequência do método físico. Foi 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 CODATA, seria um pouco menor do que 2×10^{-8} . Isto é importante porque as experiências são realizadas no vácuo, por isso, devido à transição vácuo-ar, a incerteza no ar deve ser aumentada pela incerteza da transição, atingindo uma incerteza no ar de 20 μg (2×10^{-8}), conforme o especificado na recomendação. 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 μg em 1 kg no ar, é fundamental que a consistência entre os resultados fique dentro de incertezas relativas inferiores aos limites estabelecidos.

Requisito 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. Este requisito foi necessário 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.

Requisito 4: os procedimentos para a futura realização e disseminação do quilograma, 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 do quilograma foi executada pelo chamado Estudo Piloto de acordo com o *mise en pratique*.

5.3 Atividades prévias à redefinição do quilograma

A fim de cumprir os requisitos especificados na recomendação GI (2013) o planejamento estratégico de atividades, até a decisão formal pela CGPM em 2018 sobre a redefinição do quilograma, o *Roadmap*, foi publicado em 2015, e atualizado em 2018, figura II [54]. As atividades incluíam a publicação do *mise en pratique*, a calibração extraordinária dos padrões do BIPM, o Estudo Piloto para realização da unidade de massa, o estabelecimento do *Ensemble* de padrões de referência do BIPM, a Recomendação do CCM 2017 e o ajuste especial do CODATA 2017.

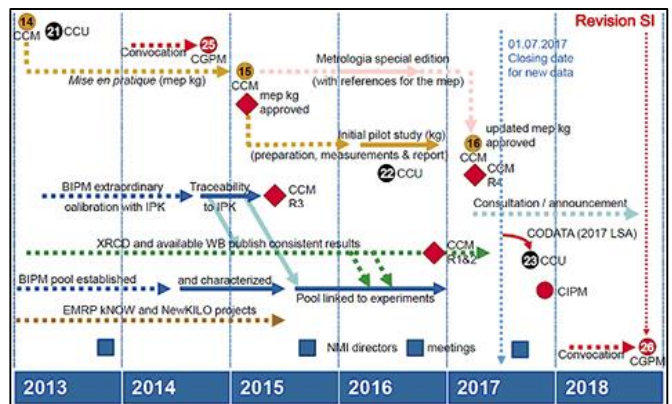


Figura II *Roadmap* para redefinição do quilograma [54].

5.3.1 O *mise en pratique*

No anexo 2 da brochura do SI que é disponibilizado apenas on-line são especificados os procedimentos para executar a realização prática das unidades de base por métodos primários, o *mise en pratique*. A versão draft do *mise en pratique* para a realização do quilograma foi publicada em 2014 e atualizada em 2018 [55].

5.3.2 A Calibração Extraordinária

A fim de garantir o vínculo ao IPK na cadeia de rastreabilidade dos padrões de massa utilizados por INMs em seus experimentos de determinação da constante de Planck, foi realizada uma campanha de calibração utilizando como referência o IPK.

A Campanha Extraordinária de Calibração, executada entre 2013 e 2014, foi implementada 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, protótipos nacionais não participaram da Campanha Extraordinária.

A cadeia hierárquica dos protótipos do BIPM (figura 12) baseia-se na frequência de uso, assim, as seis cópias oficiais do IPK foram usadas apenas em verificações periódicas, os para uso especial foram 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 do conjunto formado pelos protótipos para uso especial e padrões de trabalho, chamado de "*as-maintained mass unit*" [56].

Protótipo internacional (IPK)	\mathcal{K}					
Cópias oficiais	K1	<u>7</u>	8(41)*	32	43	47
Protótipos do BIPM para uso especial			25	73		
Protótipos do BIPM padrões de trabalho	<u>9</u>	31	42'	63	77	88 91 650

Figura 12 Estrutura hierárquica de padrões de do BIPM em 2014, antes da campanha extraordinária de calibração.

Na primeira fase da campanha extraordinária 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 μg e -33 μg 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 μg e 88 μg . Assim, uma correção de -35 μg foi obtida a partir de um ajuste de mínimos quadrados de 51 parâmetros [57]. 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 atualizar o vínculo de seus experimentos ao IPK e corrigir valores de constantes fundamentais [58], cumprindo assim com o requisito 3 da recomendação CCM GI (2013).

De fato, a deriva de massa encontrada na "*as-maintained mass unit*" não era esperada e evidenciou 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 13) para incluir uma diminuição da frequência de uso e evidenciar possíveis derivas nos padrões.

Protótipo internacional (IPK)	\mathcal{K}					
Cópias oficiais	K1	<u>7</u>	8(41)*	32	43	47
Protótipos do BIPM para uso excepcional			25	73	91	
Protótipos do BIPM para uso limitado			<u>9</u>	31	650	
Protótipos do BIPM padrões de trabalho	42'	63	77	88	97	103

Figura 13 Estrutura hierárquica de padrões de do BIPM em 2014, após da campanha extraordinária de calibração.

5.3.3 O Estudo Piloto

O Estudo Piloto teve como objetivo avaliar a medição da unidade de massa realizada pelos experimentos para a realização do quilograma. Os objetivos do estudo, que é um tipo de comparação interlaboratorial, foi 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 os requisitos 1, 2 e 4 estabelecidos na recomendação GI (2013) do CCM seriam atendidas e fornecer recomendações para futuras comparações [59].

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 menor do que 2×10^{-7} , que corresponde a 200 μg na medição de 1 kg.

A comparação foi organizada pelo 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 do método XRCD.

Neste estudo, o valor da constante de Planck obtido do ajuste CODATA 2014 [9] ($6,626\ 070\ 040\ (81) \times 10^{-34}\ \text{J s}$) 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 — utilizados para avaliar os efeitos de interação da superfície dos padrões com o ambiente [60] 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, as condições 1, 2 e 4 da recomendação GI (2013) do CCM foram atendidas [61].

5.3.4 O Ensemble de padrões de massa

A Resolução CGPM I (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 I4 [62]) 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 [63].

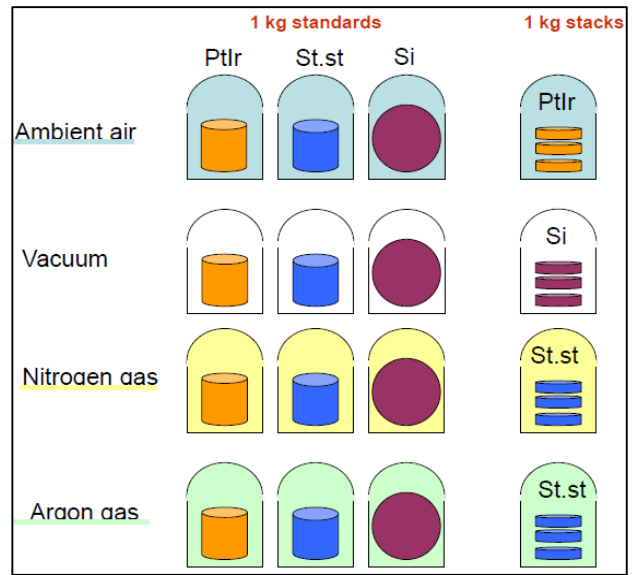


Figura I4 Visão esquemática da configuração inicial do *ensemble* [62].

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, a fim de detectar eventuais desgastes. Assim, ao final de 2014 o *ensemble* tinha sido complementado com outros padrões para implementar esta hierarquia.

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 a padrões nacionais.

5.3.5 A Recomendação CCM 2017

Na 16ª reunião do CCM foi realizada a simulação do ajuste da constante de Planck baseado em dados do experimento XRCD de 2011, 2015 e 2017 e de balanças Kibble entre 2015 e 2017, com $u_r(\hbar) \leq 5 \times 10^{-8}$ [64], e como conclusão foi emitida a

Recomendação G I (2017) onde, embora o CCM tenha reconhecido a falta de consistência entre as determinações da constante de Planck com incertezas relativas inferiores a 5×10^{-8} [65] recomendou ao CIPM que realizasse as etapas necessárias para prosseguir com a redefinição do quilograma planejada para ocorrer na 26ª reunião do CGPM em 2018.

A Recomendação CCM 2017 enunciou:

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.

Estes enunciados tem objetivos específicos:

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.

5.3.6 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 foi realizado em 2017. Este ajuste especial considerou os resultados antigos e novos, publicados no periódico *Metrologia*, até 1º de julho, [66].

Além do ajuste especial dos mínimos quadrados das constantes do SI, foram 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 [5].

O ajuste especial do CODATA foi realizado na reunião do TGFC/CODATA em 04 de setembro de 2018 e o valor final para as constantes SI foram aprovados pelo Comitê Consultivo de Unidades (CCU) [67].

Os dados utilizados para o ajuste da constante de Planck são apresentados na tabela I.

Tabela I Valores da constante de Planck h utilizados no ajuste especial do CODATA 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	$u_r(h)$
IAC - II	6,62606994	$2,0 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-8}$
IAC - I5	6,62607022	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-8}$
NIST-I5	6,62606936	$3,8 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-8}$
NRC - 17	6,626070133	$6,0 \times 10^{-8}$	$9,1 \times 10^{-9}$
IAC - 17	6,626070404	$7,7 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$
NIST-17	6,626069934	$8,8 \times 10^{-8}$	$1,3 \times 10^{-8}$
NMIJ - 17	6,62607013	$1,7 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^{-8}$
LNE -17	6,62607040	$3,8 \times 10^{-7}$	$5,7 \times 10^{-8}$

O dado da balança Kibble NIST-98 foi excluído do ajuste por ser o resultado mais discrepante e com maior incerteza em relação aos demais. O resultado da balança de Joule NIM-2 também não foi considerado devido a sua maior incerteza $u_r(\mathbf{h}) = 2,7 \times 10^{-7}$ [68].

As correlações entre as determinações das constantes de Planck tem origem na utilização dos mesmos valores medidos para os dados de entrada de cada método experimental. São consideradas independentes as medições realizadas por balanças Kibble de países diferentes, as de um mesmo país desde que utilizem sistemas de medição das variáveis de entrada independentes, como no caso das determinações NIST-15 e NIST-17. As determinações baseadas no método XRCD, ao contrário, dependem de medições comuns às determinações em diferentes datas, como a massa molar do ^{28}Si ou o parâmetro de rede, as correlações entre estas determinações são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 Correlação entre os dados do ajuste do CODATA 2017, as demais correlações são nulas.

$r(\text{IAC} - \text{II}, \text{IAC} - \text{I5})$	0,25
$r(\text{IAC} - \text{II}, \text{IAC} - \text{I7})$	0,19
$r(\text{IAC} - \text{II}, \text{NMIJ} - \text{I7})$	0,13
$r(\text{IAC} - \text{I5}, \text{IAC} - \text{I7})$	0,30
$r(\text{IAC} - \text{I5}, \text{NMIJ} - \text{I7})$	0,28
$r(\text{IAC} - \text{I7}, \text{NMIJ} - \text{I7})$	0,21

O ajuste especial do CODATA 2017 foi realizado por mínimos quadrados associado ao método da Razão de Birge e ao teste de consistência χ^2 [10, 69]. Pelo método de Birge nenhum dado é excluído mas a incerteza dos resultados individuais podem ser aumentados caso não haja consistência. Seja \mathbf{h} o vetor coluna com as n medições da constante de Planck, \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 (9) apresenta os valores da média ponderada m e sua incerteza $u(m)$.

$$m = \frac{(\mathbf{1}^T \mathbf{V} \mathbf{h})}{(\mathbf{1}^T \mathbf{V} \mathbf{1})} \quad u(m) = \frac{1}{\sqrt{(\mathbf{1}^T \mathbf{V} \mathbf{1})}} \quad (9)$$

A razão de Birge R_B é calculada a partir do desvio quadrático calculado χ^2 Obs e dos graus de liberdade ν , equação (10).

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

$$R_B = \sqrt{\frac{\chi^2}{\nu}} \quad (10)$$

O valor máximo que é aceito para a Razão de Birge R_{Bmax} é dado pela equação (11).

$$R_{Bmax} = \sqrt{1 + \sqrt{\frac{2}{\nu}}} \quad (11)$$

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 (12).

$$u^*(m) = R_B \times u(m) \quad \mathbf{V}^* = R_B^2 \times \mathbf{V} \quad (12)$$

No teste de consistência χ^2 , existe evidência de inconsistência entre os dados se, quando $\chi^2 \text{Obs} > \nu$ a probabilidade $P\{\chi^2(\nu) > \chi^2 \text{Obs}\}$ de ocorrer valores próximos ou maiores que $\chi^2 \text{Obs}$ é muito menor do que 1. $P\{\chi^2(\nu) > \chi^2 \text{Obs}\} \approx 95\%$ indicam alta consistência entre os dados [9, 70].

O valor da constante de Planck obtido a partir dos dados das tabelas 1 e 2 é $6,626\,070\,150(40) \times 10^{-34}$ J s, no entanto para os dados da tabela 1 $R_B = 1,9 > R_{Bmax} = 1,2$ e $P\{\chi^2(\nu) > \chi^2 \text{Obs}\} = 0\%$, assim não houve consistência entre os dados. Embora o valor da $R_B = 1,9$ tenha sido determinado, no ajuste do CODATA foi escolhido o valor de 1,7 para a razão de Birge. A escolha desse valor ao invés do calculado foi justificado para cumprir com os requisitos especificados na Recomendação CCM GI(2013) e ainda, que pelo menos um resultado da Balança Kibble e do Método XRCD apresentassem, após o aumento de incertezas, $u_r(\mathbf{h}) \leq 2 \times 10^{-8}$. Com o aumento das incertezas pelo fator $R_B = 1,7$, o valor da constante de Planck torna-se $h = 6,626\,070\,150(69) \times 10^{-34}$ J s ($u_r(\mathbf{h}) = 1 \times 10^{-8}$) com $P\{\chi^2(\nu) > \chi^2 \text{Obs}\} = 27\%$.

Apesar do baixo grau de consistência entre os dados, evidenciado pelo teste χ^2 , quando a constante de Planck é ajustada com as demais constantes do CODATA, como foi realizados no ajuste especial, este ajuste com maior número de constantes apresenta $P\{\chi^2(v) > \chi^2 \text{Obs}\} = 95\%$, portanto a baixa consistência no ajuste da constante de Planck não afeta o ajuste especial do CODATA 2017 [71].

6. Redefinição do quilograma

O valor aprovado na 26ª reunião do CGPM para fixar a constante de Planck e que será adotado a partir de 20 de maio de 2019 é $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s. O enunciado da nova definição do quilograma está especificado no apêndice 3 da resolução I da 26ª CGPM [2]:

“O quilograma, símbolo kg, é a unidade de massa do SI. Ele é definido tomando-se o valor numérico fixo da constante de Planck h como sendo 6,626 070 15 $\times 10^{-34}$ quando expresso na unidade J s, que é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, onde o metro e o segundo são definidos em termos de c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.”

É importante destacar que a definição do quilograma, de acordo com seu enunciado, requer além da fixação do valor numérico da constante de Planck h , a definição desta constante, da velocidade da luz c e da frequência de transição do céσιο $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, no SI. Isto ocorre porque a constante de Planck tem natureza física diferente da massa, a primeira é dinâmica, associada ao movimento de partículas elementares, enquanto a massa tem natureza estática, ao representar a quantidade de inércia dos corpos.

As definições das constantes fazem parte da decisão da resolução I:

“...o Sistema Internacional de Unidades, o SI, é o sistema de unidades em que:

- o a frequência de transição hiperfina do estado fundamental não perturbado do átomo de céσιο 133 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ é de 9 192 631 770 Hz,
- o a velocidade da luz no vácuo c é 299 792 458 m / s,
- o a constante de Planck h é 6,626 070 15 $\times 10^{-34}$ J s, ..”

A partir da definição das constantes, dos valores numéricos fixos das constantes e da nova definição

do quilograma é possível expressar, em forma explícita, a relação direta entre a unidade de massa e as constantes, equação (13).

$$1 \text{ kg} = \frac{\{c\}^2}{\{h\}\{\Delta\nu_{\text{Cs}}\}} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2} \quad (13)$$

A equação (13) evidencia que, em sua definição, o quilograma (definido) está fixo, assim como estão as constantes e seus valores numéricos e desta forma esta definição elimina os riscos associados com a definição baseada no IPK. O quilograma definido não tem incerteza, assim como ocorria antes, por outro lado o quilograma realizado, obtido pelos métodos experimentais especificados no *mise en pratique* terá.

7. Consequências

Medições são realizadas 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.

7.1 Impacto da redefinição do quilograma para a indústria, pesquisa científica, comércio e sociedade com base na unidade de massa

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 nas medições de massa para a sociedade e o comércio. No entanto, a substituição da definição da unidade de massa, tem efeito para o cidadão comum ou para a sociedade em nível educacional,

visto que o tema da definição de unidades faz parte do conteúdo de disciplinas em áreas com engenharia, física e química.

A fim de melhorar a compreensão sobre a balança Kibble, considerada pela NATURE em 2012, uma das cinco experiências tão complexas quanto a idealizada para encontrar o Boson de Higgs [72] 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 [73]. 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 [74-75]. 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 [76]. Este último experimento foi testado pelos autores deste trabalho para um cilindro de alumínio e a discrepância da constante de Avogadro e consequentemente para a constante de Planck foi de cerca de 0,1 %, portanto bem dentro do esperado.

Certamente, 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 [34].

7.1.1 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 [77]. Embora varie de forma lenta, a compatibilidade do quilograma realizado pela balança Kibble e pelo método XRCD será afetada. Da mesma forma a dependência da definição do quilograma das definições da velocidade da luz, da frequência do césio 133 e da constante de Planck indica que mudanças nas definições das

constantes poderão alterar a definição do quilograma. Além disso, recentemente, duas abordagens diferentes baseadas em relógios atômicos propõem vincular o quilograma, respectivamente, à frequência do césio 133 pelo experimento da balança Kibble [78] e à frequência Compton do césio 133 por meio do método XRCD [79]. Assim, no novo SI e possivelmente no futuro a definição do quilograma poderá ser alterada, por exemplo, pela substituição da definição do segundo, hoje com base nas frequências do césio 133, para frequências ópticas [80].

7.1.2 Implementação da Redefinição do Quilograma em 2019

Devido as inconsistências detectadas na simulação do ajuste da constante de Planck realizada pelo CCM em 2017 e evidenciadas no ajuste da constante de Planck em 2017, figura 15, o CCM publicou uma instrução em 2018, que esclarece o procedimento de obtenção de um valor de consenso especificado na Recomendação CCM 2017. As fases do procedimento de implementação da redefinição do quilograma após a adoção mundial em 2019 de forma a evitar a propagação da inconsistência para as medições de massa após a adoção do novo SI são [81]:

Fase 0: Antes de 20 de maio de 2019, o IPK se mantém como a definição da unidade de massa e com incerteza nula;

Fase I: A partir de 20 de maio de 2019, a referência internacional para unidade de massa continua a ser a massa do IPK, mas agora com uma incerteza de 10 μg . Nesta fase se inicia uma comparação internacional chave contínua de medição de massa a partir de todos os experimentos que apresentem incertezas relativas menores do que 5×10^{-7} publicados em artigos de revistas com sistema de aprovação por revisores. Ao final desta etapa inicial da comparação, o valor de consenso (KCRV) será determinado e sua incerteza dependerá tanto das incertezas individuais quanto da dispersão entre os participantes. O KCRV será atualizado após novas comparações ou da inclusão de novos participantes, métodos ou faixas de medição. Após a publicação do relatório da comparação inicial os participantes poderão disseminar a unidade aplicando correções aos seus resultados e incluindo em sua incerteza de medição a incerteza proveniente do valor de consenso. Esta fase será mantida até que as discrepâncias entre os experimentos de realização sejam menores que 10 μg ;

Fase 3: Nesta fase as Capacidades de Medição e Calibração (CMCs) requeridas na fase 2 serão publicadas e os procedimentos de comparação e estabelecimento dos graus de equivalência entre os experimentos, de acordo com o CIPM MRA, serão aplicados.

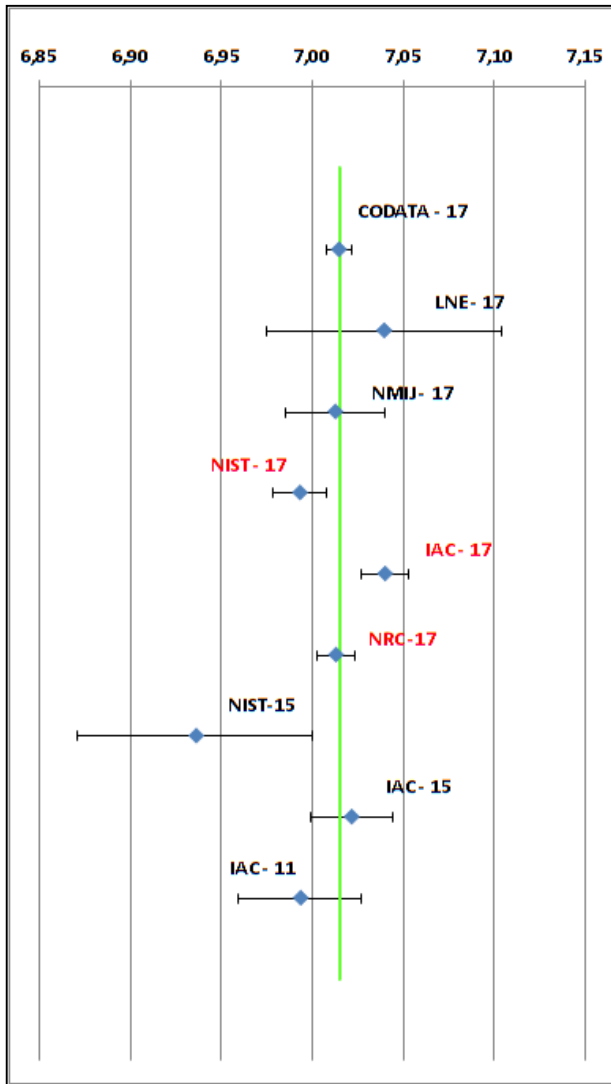


Figura 15 Resultados do ajuste do CODATA 2017. O resultado CODATA - 17 é o valor da constante de Planck do ajuste. Entre os três resultados com menor incerteza, dois são incompatíveis entre si.

7.1.3 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 [82]. 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 as CMCs [83].

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 [84]. Por outro lado, caso haja a possibilidade da transferência em vácuo dos padrões diretamente dos experimentos de realização para os INMs sem experimentos, cabendo a estes o controle sobre a transferência ar-vácuo, eles deveriam atualizar sua infraestrutura para incluir comparadores de massa que realizem pesagens no vácuo.

7.1.4 Impacto na cadeia de rastreabilidade de padrões de massa

No presente trabalho foi realizada a avaliação do impacto da redefinição do quilograma sobre as CMCs de diversos NMIs, de diferentes regiões metrológicas. Esta análise se estendeu à incerteza na cadeia de rastreabilidade de padrões de massa da classe OIML E1 da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) [85], que poderiam ser calibrados por laboratórios acreditados, indústrias de pesagem ou organismos de metrologia legal, e da classe não regulamentada “E₀”, rotineiramente utilizada por INMs para calibração e checagem periódica de seus padrões OIML E₁.

A metodologia empregada está baseada no trabalho de Borys *et al* [34] e foram utilizadas, como fonte de rastreabilidade, as incertezas dos resultados de 2017 (experimentos disponíveis atualmente), na tabela I, aumentadas pelo fator 1,7 e a incerteza relativa do ajuste da constante de Planck em 2017, que será atribuída ao IPK em 2019 (BIPM-19). A partir desta metodologia, foram calculadas as incertezas que seriam fornecidas pelos INMs, laboratórios

acreditados, indústrias de pesagem ou organismos de metrologia legal, de acordo com cada fonte de rastreabilidade.

Na avaliação do impacto sobre as CMCs, foram utilizadas 44 CMCs, disponíveis no sítio do BIPM até julho de 2017, de INMs pertencentes às cinco regiões metroológicas. A análise indicou que se a incerteza relativa do ajuste (BIPM-19) fosse utilizado como a incerteza para a realização da unidade de massa 27 CMCs deveriam ser aumentadas, se a fonte de rastreabilidade fosse NRC-17, NIST-17, IAC-17, 29 INMs teriam que aumentar suas CMCs, se fosse o NMIIJ-17, 34 INMs teriam que aumentar suas CMCs e se a fonte de rastreabilidade fosse o resultado LNE-17, 38 CMCs deveriam ser aumentadas, figura 16. Como pode ser visto, se as fontes de rastreabilidade fossem os resultados do ajuste CODATA 2017, independentemente da fonte de rastreabilidade, muitas CMCs deveriam ser revistas.

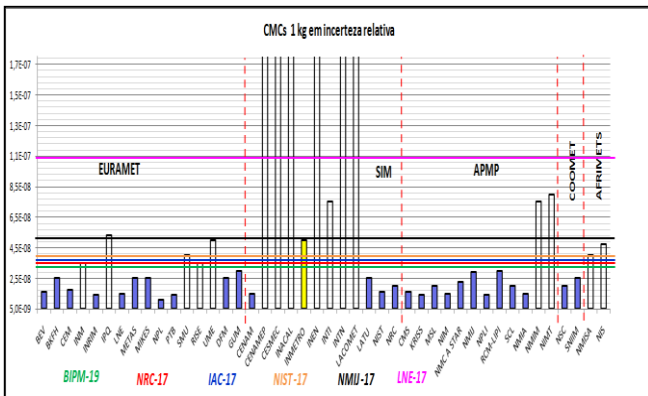


Figura 16 Gráfico indicando as CMCs dos INMs (barras) e as CMCs que um INM teria de acordo com cada fonte de rastreabilidade.

Se as fontes de rastreabilidade do ajustes de 2017 fossem disseminadas, só haveria impacto sobre laboratórios acreditados, indústrias de pesagem ou organismos de metrologia legal que calibrem padrões de massa da classe OIML E1, se a rastreabilidade do INM fosse proveniente do LNE ou NMIIJ, o mesmo ocorre para padrões da classe “E0” de INMs. No entanto, no caso de padrões da classe “E0”, não seria possível calibra-los com a incerteza mínima desta classe, figura 17.

A fim de complementar a análise, deve-se considerar as condições da Recomendação CCM 2017 relacionadas ao KCRV da comparação contínua que será iniciada em 2019. Sob estas condições, as incertezas relativas dos experimentos de realização do

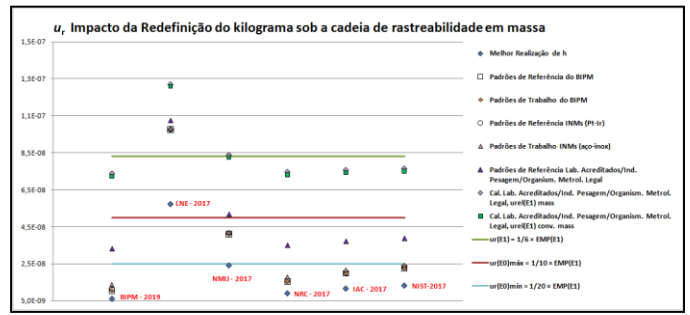


Figura 17 Análise do impacto da redefinição do quilograma na cadeia de rastreabilidade de padrões OIML E₁ e “E₀”.

quilograma deverão considerar a incerteza do KCRV, disseminado por eles, assim as incertezas individuais das realizações corrigidas, para manter o vínculo com o KCRV, serão compostas pela incerteza $u(KCRV) \leq 10 \mu\text{g}$ e pela estabilidade do experimento individual para realização da unidade. Considerando que a estabilidade dos experimentos seja a mesma que a variação dos ajustes do CODATA entre 2014 e 2017 então $u(\text{estab}) \leq 20 \mu\text{g}$, a incerteza disseminada pelos experimentos de realização a partir do KCRV será no máximo $23 \mu\text{g}$. De acordo com a CCM *short note* [81] a incerteza da estabilidade dos padrões do BIPM é $5 \mu\text{g}$, desta forma a incerteza disseminada pelo BIPM, após a comparação, será $12 \mu\text{g}$.

Ao término da primeira etapa da compração contínua, a incerteza atribuída ao IPK praticamente não se altera e a incerteza a ser, provavelmente, disseminada pelos NMIs é um pouco pior do que NRC-17 e IAC-17. Desta forma se mantém as conclusões anteriores sobre calibração de padrões E1 e “E0”. No entanto, com estas incertezas para as fontes de rastreabilidade diversos NMIs deverão rever suas CMCs.

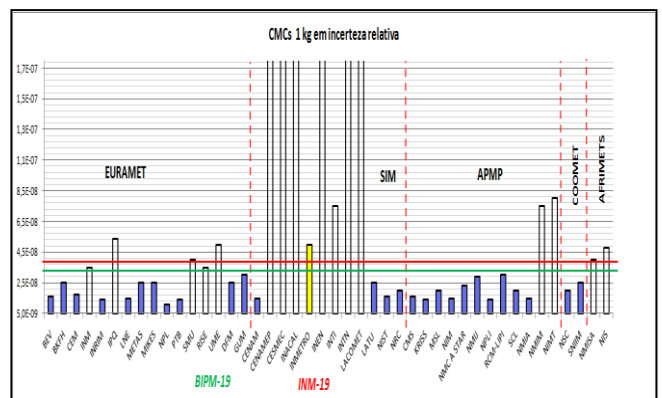


Figura 18 Gráfico indicando o impacto sobre as CMCs dos INMs após a primeira etapa da comparação contínua do CCM.

7.1.5 Futuro da área de Metrologia de Massa

Um aspecto importante da redefinição do quilograma em função da constante de Planck é que padrões primários poderão ser realizados para valores nominais submúltiplos do quilograma diretamente, por exemplo, utilizando uma balança de Kibble projetada especialmente para valores nominais específicos. Assim, a partir da sugestão da Recomendação G I (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 [86], a Balança Kibble de Mesa de 10 g, em desenvolvimento pelo NIST [87] e na faixa de 1 mg - 1 kg, para calibração de padrões de massa das classe de exatidão OIML E1 e E2, a Balança Planck do PTB [88]. 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. Esta mudança causará no futuro impacto sobre a indústria de pesagem e laboratórios acreditados.

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.

7.2 Impacto da redefinição do quilograma para a indústria, pesquisa científica, comércio e sociedade com base na 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 [89] portanto, algumas consequências estão relacionadas a outras áreas da metrologia como a metrologia quântica que abrange a nanometrologia, a metrologia óptica e a elétrica [90-91]. 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 [92] 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 ^{28}Si para o projeto IAC/XRCD. Outros produtos tecnológicos que se beneficiarão da redefinição do quilograma são os dispositivos opto-mecânicos em desenvolvimento pelo projeto NIST ON A CHIP (NOAC) que pretendem medir massas de alguns microgramas a partir da força gerada por um feixe de fótons [93].

8. Conclusão

Neste trabalho foram revisadas as motivações e atividades de preparação para redefinição do quilograma, ocorrida em 2018. As possíveis consequências deste processo, após a adoção mundial em 20 de maio de 2019, são:

- a. Não haverá qualquer impacto da redefinição do quilograma para as medições de massa realizadas para o público em geral, no entanto para que a compreensão da nova definição da unidade seja atingida será requerida, das áreas de ensino acadêmico, uma nova forma de explicar o tema definição de unidades.
- b. O vínculo da nova definição do quilograma com as constantes fundamentais mostram que, no futuro, deve ser dada maior atenção a estabilidade e definição destas constantes visto que alterações serão refletidas na nova definição do quilograma.
- c. Embora o quilograma já esteja definido em função da constante de Planck, devido às inconsistências ainda presentes após o ajuste de 2017, entre 2019 e 2020 o quilograma não será realizado pelos experimentos da balança Kibble ou pelo método XRCD, até lá a referência internacional para o quilograma realizável será, como antes da redefinição, a massa do IPK, no entanto com uma incerteza de 10 μg .
- d. Os INMs sem experimento de realização

poderão obter rastreabilidade a partir de um deles, quando disponível, ou a partir do BIPM. Se for requerida alta exatidão na disseminação da unidade de massa, a partir do controle da transição vácuo-ar de seus padrões, métodos de medição de massa no vácuo deveriam ser implementados.

e. A análise do impacto da redefinição do quilograma na cadeia de rastreabilidade de padrões OIML E1, indicou que não haverá qualquer impacto sobre a calibração destes padrões por laboratórios acreditados, indústrias de pesagem, organismos de metrologia legal ou NMIs, devido as medidas tomadas pelo CCM que garantirão a continuidade e uniformidade da unidade de massa após a adoção em 2019.

f. A avaliação do impacto da redefinição sobre as incertezas de NMIs concluiu que diversos CMCs deverão ser revistos e que não será possível calibrar padrões “E₀”, com a incerteza mínima desta classe.

g. No futuro, com o desenvolvimento de balanças de Kibble compactas, que não necessitarão padrões de massa para calibrá-las, toda a comunidade da área de Metrologia de Massa deverá rever suas atividades.

h. A fixação da constante de Planck e os produtos gerados no processo de redefinição do quilograma possibilitarão desenvolvimentos tecnológicos que, em última instância, serão benéficos para o público em geral.

Agradecimentos

Um dos autores gostaria de agradecer ao programa de bolsas institucionais Pronmetro/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] CGPM 2018 Resolution I adopted by the General Conference on Weights and Measures (26thmeeting)
<https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CGPM-2018/26th-CGPM-Resolutions.pdf>

[3] Book B 2014 Brand book I–I6
<https://www.bipm.org/utis/common/pdf/SI-Brand-Book.pdf>

[4] Girard G 1994 The Third Periodic Verification of National Prototypes of the Kilogram (1988–1992) *Metrologia* 31 317–36

[5] 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

[6] Quinn T J 1995 Base units of the *Système International d’Unités*, their accuracy, dissemination and international traceability *Metrologia* 31 515

[7] Terrien J 1965 Scientific Metrology on the International Plane and the Bureau International des Poids et Mesures *Metrologia* 1 15–26

[8] Inmetro 2012 Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement

[9] 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

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

[11] CCDM 1957
<https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CC L/CCDM2.pdf>

[12] CCDM 1973
<https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CC L/CCDM5.pdf>

[13] CCDS 1963 e1965
<https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CC TF/CCDS3.pdf>

[14] Davis R S 2001 Mass metrology Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants - Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”


[15] Davis R 2003 The SI unit of mass *Metrologia* 40 299–305

[16] Cohen E R 1973 The 1973 Least-Squares Adjustment of the Fundamental Constants *

- [17] Cook A H 1972 Quantum metrology - standards of measurement based on atomic and quantum phenomena Reports Prog. Phys. 35 463
- [18] Petley B W 1995 Electrical Units - the Last Thirty Years Metrologia 31 495
- [19] Kibble B P, Smith R C and Robinson I A 1983 The NPL Moving-Coil Ampere Determination IEEE Trans. Instrum. Meas. 32 141–3
- [20] Stock M 2013 Watt balance experiments for the determination of the Planck constant and the redefinition of the kilogram Metrologia 50 R1
- [21] Pöpel R 1992 The Josephson Effect and Voltage Standards Metrologia 29 153
- [22] Hartland A 1992 The Quantum Hall Effect and Resistance Standards Metrologia 29 175–90
- [23] Quinn T J 1989 News from the BIPM Metrologia 26 69–74
- [24] Taylor B N and Witt T J 1989 New International Electrical Reference Standards Based on the Josephson and Quantum Hall Effects Metrologia 26 47–62
- [25] BIPM
http://www.bipm.org/en/si/si_constants.html
- [26] Quinn T J 2017 From artefacts to atoms - A new SI for 2018 to be based on fundamental constants Stud. Hist. Philos. Sci. Part A 1–13
- [27] Petley B W 1993 Some problems in basic metrology Meas. Tech. 36 1184–93
- [28] Zimmerman N M 1998 A primer on electrical units in the Systeme International Am. J. Phys. 66 324
- [29] CCU 2016 Consultative Committee for Units (CCU) Minutes 2016
- [30] Kibble B P, Robinson L A and Belliss J H Redefining the kilogram via a moving-coil apparatus Conference on Precision Electromagnetic Measurements (IEEE) pp 178–9
- [31] Davis R S 1989 The Stability of the SI Unit of Mass as Determined from Electrical Measurements * 76 75–6
- [32] BIPM
<http://www.bipm.org/en/bipm/mass/ipk/>
- [33] T. Quinn 1991 The kilogram: The present state of our knowledge 40 81–5
- [34] 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
- [35] Kose V and Wöger W 1986 Fundamental Constants and the Units of Physics Metrologia 22 177–85
- [36] CCM 1993 CCM - Rapport de la 5è session (1993)
- [37] CGPM 1995 20e CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES
- [38] Davis R S and Davis R S 2008 Redefining the Kilogram : How and Why ? MAPAN - J. Metrol. Soc. India 23 131–8
- [39] Schwitz W, Jeckelmann B and Richard P 2004 Towards a new kilogram definition based on a fundamental constant Comptes Rendus Phys. 5 881–92
- [40] BIPM
<http://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance>
- [41] BIPM.
<https://www.bipm.org/en/bipm/mass/avogadro/>
- [42] 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
- [43] 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
- [44] CCQM 2009 Consultative Committee for Amount of Substance : Metrology in Chemistry and Biology (CCQM). Report of the 21st meeting
- [45] Milton M J T and Mills I M 2009 Amount of substance and the proposed redefinition of the mole Metrologia 46 332–8
- [46] CCM 2010 Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) 2013 1–24
- [47] CGPM 2011 Résolutions adoptées par la Conférence générale Resolutions adopted by the General Conference on Weights and Measures (24th meeting) 17–21

- [48] 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 I (CI-2005) *Metrologia* 43 227–46
- [49] Davis R 2011 Proposed change to the definition of the kilogram: Consequences for legal metrology *OIML Bull. LII* 5–12
- [50] CIML 2012 OIML statement on the proposed new SI 2012
- [51] CIPM 2011 CECIP Position on possible future revision of the International System of Units-SI
- [52] CIPM 2012 05B_Response_to_CECIP.pdf
- [53] CCM 2013 Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) 2013 I–24
- [54] CCM 2018 Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) I–24
- [55] BIPM
<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-kg-2018.pdf/>
- [56] 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
- [57] 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
- [58] Sanchez C A, et al. 2015 Corrigendum to the 2014 NRC determination of Planck's constant *Metrologia* 52 L23–L23
- [59] 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
- [60] 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
- [61] Stock M, et al. 2017 Report on CCM Pilot Study CCM . R-kg-PI Comparison of future realizations of the kilogram Final Report
- [62] de Mirandés E, 2017 Update on the BIPM ensemble of mass standards, presentation, CCM I6th meeting (2017)
- [63] BIPM
https://www.bipm.org/en/bipm/mass/pool_artefacts/
- [64] Nielsen L 2017 Presentation on I6th CCM Meeting: Status on the conditions stated in Recommendation GI (2013) vol Ipp I–17
- [65] CCM 2017 Consultative Committee for Mass and Related Quantities (CCM) I–24
- [66] CCU 2016 Consultative Committee for Units (CCU) Minutes 2016
- [67] CCU 2017 CCU RECOMMENDATION UI (2017) I 2017–8
- [68] Newell B D 2018 The CODATA 2017 values of h, e, k, and N A for the revision of the SI *Metrologia* 55 L13–16
- [69] Weise K and Wöger W 2000 Removing model and data non-conformity in measurement evaluation *Meas. Sci. Technol.* 11 1649–58
- [70] Mohr P J and Taylor B N 2010 CODATA Recommended values of the fundamental physical constants:2010 *
<https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Preprints/1sa2010.pdf>
- [71] Mohr P J 2018 Data and analysis for the CODATA 2017 special fundamental constants adjustment *Metrologia* 55 125–146
- [72] Jones N 2012 Frontier experiments: Tough science *Nature* 481 14–7
- [73] Chao L S, Schlamming 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
- [74] 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
- [75] Ward R J 2014 Minimal watt balance *Phys. Educ.* 49 277–8

- [76] Davis R S 2015 What Is a Kilogram in the Revised International System of Units (SI)? *J. Chem. Educ.* 92 1604–9
- [77] Klitzing K von 2011 Presentation The New SI: Units of measurement base on fundamental constants I–60
- [78] Haddad D, et al. 2016 Bridging classical and quantum mechanics *Metrologia* 53 A83–5
- [79] 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
- [80] Steele A 2014, presentation, The New International System of Units I–48
- [81] CCM 2018. CCM short note on the dissemination process after the proposed redefinition of the kilogram I–6
<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/short-note-kg-dissemination-2018.pdf>
- [82] Jabbour JJ, et al 2009 Linking air and vacuum mass measurement by magnetic levitation *Metrologia* 53 339–44
- [83] Nielsen L 2016 Disseminating the unit of mass from multiple primary realisations *Metrologia* 46 I306–I6
- [84] Stock M, et al. 2017 Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition *Metrologia* 54 (2017) S99–SSI07
- [85] OIML 2004 International Recommendation OIML R 111-I Edition 2004 (E) Int. Organ. Leg. Metrol. 2004 I–78
- [86] Shaw G A, et al. 2016 Milligram mass metrology using an electrostatic force balance *Metrologia* 53 A86–94
- [87] Chao L, et al. 2019 The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT* 2019 I–7
- [88] Rothleitner C 2018 The Planck-Balance - using a fixed value of the Planck constant to calibrate E1/E2-weights *Meas. Sci. Technol.* 29 074003 9 pp.
- [89] Becker P, et al. 2007 Considerations on future redefinitions of the kilogram, the mole and of other units *Metrologia* 44 I–14
- [90] Williams C J 2016 The SI and Quantum Metrology
- [91] Piquemal F, et al. 2017 Metrology in electricity and magnetism: EURAMET activities today and tomorrow *Metrologia* 54 RI–24
- [92] PTB 2003 Novel electronics for a Quantum computer Contact at PTB: PTBnews
- [93] NIST 2019 NIST on a Chip Program Overview
https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2019/04/02/noac_overview_march_2019.pdf



O Novo SI e Seu Impacto na Metrologia Elétrica no Brasil

Regis Pinheiro Landim

Lab de Metrologia Elétrica Quântica (Lameq)
Divisão de Metrologia Elétrica (Diele)
E-mail: rplandim@inmetro.gov.br

Helio Ricardo Carvalho

Lab de Metrologia Elétrica Quântica (Lameq)
Divisão de Metrologia Elétrica (Diele)

1. Introdução

Este artigo foi inicialmente publicado no *Metrologia* 2017 [1]. A convite, ele passou por uma pequena atualização nos números e nas referências bibliográficas, para ser publicado aqui.

Os romanos influenciaram a França, a Inglaterra e vários outros países europeus no uso de pesos e medidas. Entretanto, não havia consistência (entre países) nos padrões usados por cada país, e até mesmo em um mesmo país (como a França) havia variações significativas entre seus padrões [2]. Isto trazia grandes problemas nos comércios interno e internacional. O primeiro sistema métrico decimal de unidades que se tem notícia foi implantado na França, durante a década de 1790 [2], e serviu de embrião para o atual Sistema Internacional de Unidades (SI).

O SI começou formalmente com a Convenção do Metro, assinada em 1875 por 17 países, incluindo o Brasil, contando atualmente com 58 estados-membros. Este tratado criou o Bureau International de Pesos e Medidas (BIPM, uma organização intergovernamental que tem por missão assegurar a unificação mundial das medições), sob autoridade da Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM, um corpo diplomático representativo de cada um dos signatários deste tratado) e supervisão do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM, composto por cientistas das várias áreas relacionadas às

grandezas do SI). O CIPM é auxiliado por comitês consultivos de várias áreas; dentre eles, podemos citar o Comitê Consultivo para Eletricidade e Magnetismo (CCEM) [3,4].

O SI original foi criado com quatro unidades de base, todas baseadas em artefatos físicos: o segundo (relacionado à rotação da terra em torno do seu eixo); o metro (relacionado à circunferência da terra e realizado através de uma barra de metal); o kelvin (relacionado à escala de temperatura baseada nos pontos fixos da água); e o quilograma (relacionado à massa de um decímetro cúbico de água e realizado através de um peso de metal de irídio e platina) [4].

Em 1948 as unidades elétricas foram introduzidas no SI, inclusive com o ampere como unidade (de base) da corrente elétrica [3]. Em 1960, foi decidido na CGPM pela substituição do então padrão de comprimento (um artefato), por um padrão atômico (definido em termos do comprimento de onda de certa linha espectral do ^{86}Kr). Em 1967/68, o segundo também passou a ser definido em termos de padrão atômico [5]. Nota-se, entretanto, que também se usou uma constante física fundamental na redefinição do segundo (a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133, $\Delta\nu_{Cs}$) [6]. Em 1979, houve uma redefinição da unidade de intensidade luminosa, que passou a utilizar outra constante física fundamental (a eficácia luminosa, K_{cd}) [7].

Em 1983, foi decidido na CGPM que a definição da unidade de comprimento passaria a ser feita (pela primeira vez diretamente) em termos de uma constante física fundamental (a velocidade da luz); assim, o metro passou a ser definido como o comprimento do caminho percorrido pela luz no vácuo em um determinado intervalo de tempo [5]. Portanto, desde 1983 as unidades de base do SI são definidas de três maneiras diferentes: em termos de um artefato (por exemplo, o protótipo internacional do quilograma); em termos de um padrão atômico (por exemplo, o segundo é definido em termos do padrão atômico de césio, ^{133}Cs); e em termos de uma constante física fundamental (por exemplo, o metro é definido em termos da velocidade da luz, c). Este breve histórico mostra a evolução na definição das unidades de base: padrões por artefato => padrões atômicos => padrões baseados em constantes físicas fundamentais [5].

Com a descoberta do efeito Josephson, pôde-se relacionar a tensão (através de uma junção Josephson) à frequência de irradiação e a constante Josephson ($K_J = 2e/h$, onde h é a constante de Planck e e é a carga elétrica elementar). Analogamente, o efeito Hall quântico relaciona a resistência elétrica de um gás de elétrons bidimensional à constante de von Klitzing ($R_K = h/e^2$). Devido à reprodutibilidade dos resultados dos sistemas baseados nos efeitos Josephson e Hall quântico ser muito superior à da própria realização das unidades (pela definição do SI) de tensão e resistência elétrica, respectivamente, em 1988 o CIPM recomendou a utilização do efeito Josephson para obtenção da representação da unidade de tensão elétrica (volt) e a utilização do efeito Hall quântico para obtenção da representação da unidade de resistência elétrica (ohm) [3]. Assim, estas unidades passaram a ser representadas através de constantes físicas fundamentais (a constante de Planck e a carga elétrica elementar). Mais detalhes sobre os sistemas Josephson e Hall quântico podem ser vistos em [7,8].

Desta forma, a evolução natural do SI passa pela utilização de constantes físicas fundamentais.

Este trabalho abordará a revisão do Sistema Internacional de unidades, os seus impactos na metrologia elétrica, e algumas ações necessárias de preparação para estas mudanças.

2. O novo SI

Esta seção originou-se de [9,10]. De maneira similar ao que foi feito em 1983 com a utilização da constante física fundamental c (velocidade da luz) e a redefinição do metro, o novo SI redefine quatro outras unidades de base a partir de constantes físicas fundamentais: o quilograma (que passa a utilizar a constante de Planck, h); o ampere (que passa a utilizar a carga elétrica elementar, e); o kelvin (que passa a utilizar a constante de Boltzmann, k); e o mol (que passa a utilizar a constante de Avogadro, N_A).

Estas quatro constantes físicas fundamentais (h , e , k e N_A), juntamente com as outras três já utilizadas no SI (a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$; a velocidade da luz no vácuo, c ; e a eficácia luminosa, K_{cd}), definem as sete unidades de base do SI (relacionadas às grandezas tempo, comprimento, massa, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de substância e intensidade luminosa).

A definição do novo SI é apresentada em duas partes. Na primeira parte, todo o sistema é definido através da declaração do valor numérico exato (e tornado imutável) de sete constantes, quando elas são expressas em termos das suas respectivas unidades SI. Na segunda parte, as sete unidades de base do novo SI (as mesmas do SI atual) são definidas em termos destas constantes, declaradas na primeira parte, que passam a ser chamadas de “constantes definidoras”.

O novo SI foi aprovado na reunião da CGPM em novembro de 2018, e implementado mundialmente no Dia Internacional da Metrologia, em 20 de maio de 2019.

2.1 Parte 1 da definição do novo SI

Os valores numéricos exatos de cada constante, quando são expressos nas unidades correspondentes do SI, são mostrados a seguir:

- A frequência de transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ é 9 192 631 770 Hz,

- A velocidade da luz no vácuo c é 299 792 458 m/s,

- A constante de Planck h é 6,626 070 15 $\times 10^{-34}$ J s,

- A carga elétrica elementar e é $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C,
- A constante de Boltzmann k é $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- A constante de Avogadro N_A é igual a $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- A eficácia luminosa K_{cd} de uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz é 683 lm/W.

Os valores numéricos das sete constantes definidoras não têm incerteza (são valores exatos).

Os valores de h , e , k e N_A foram determinados pelo ajuste especial do CODATA 2017. Eles foram calculados a partir de dados avaliados antes de 1º de julho de 2017 [11].

Fixando-se o valor numérico, a unidade torna-se definida, através destas “constantes definidoras”. Rigorosamente falando, a “Parte I” já é suficiente para a completa definição do novo SI, pois todas as unidades estão automaticamente definidas; a segunda parte foi mantida por questões históricas, didáticas, e para facilitar a transição para o novo SI.

2.2 Parte 2 da definição do novo SI

A seguir, baseado no “*Draft of the ninth SI Brochure*” [10], primeiramente será apresentado o texto da nova definição de cada unidade da base do SI. Depois, apresentaremos a relação exata da constante definidora relacionada a esta unidade (uma forma chamada “constante-implícita”) que advém da definição. No texto e, consequentemente, na forma “constante-implícita” podem aparecer outras unidades, além daquela que está sendo definida no momento, mas, didaticamente a ordem com que as definições são apresentadas faz com que as unidades extras que aparecem, já estejam definidas anteriormente. Depois disto é feita a inversão da relação “constante-implícita” para a forma “unidade-implícita” (na qual a unidade é definida diretamente através das constantes definidoras). Se for o caso, são usadas as definições anteriores para substituir as outras unidades que apareçam, pelas constantes definidoras correspondentes. No final, há um pequeno texto que esclarece a implicação desta definição direta da unidade, em termos das constantes definidoras.

2.2.1 Segundo, unidade de tempo

A definição do segundo passa a ser: “O segundo, símbolo s, é a unidade do SI de tempo. Ele é definido usando-se o valor numérico fixo da frequência do césio $\Delta\nu_{Cs}$, que é a frequência de transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133, igual a 9 192 631 770 quando expresso na unidade Hz, a qual é igual a s⁻¹”.

Forma “constante-implícita”:

$$\Delta\nu_{Cs} = 9\ 192\ 631\ 770\ \text{Hz} \quad (1)$$

Invertendo-se (1), obtém-se uma expressão para o segundo em termos do valor da constante definidora $\Delta\nu_{Cs}$ (forma “unidade-implícita”):

$$1\ \text{s} = \text{Hz}^{-1} = \frac{9\ 192\ 631\ 770}{\Delta\nu_{Cs}} \quad (2)$$

O efeito desta definição é que o segundo é igual à duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo ¹³³Cs.

2.2.2 Metro, unidade de comprimento

A definição do metro passa a ser: “O metro, símbolo m, é a unidade do SI de comprimento. Ele é definido usando-se o valor numérico fixo da velocidade da luz no vácuo c igual a 299 792 458 quando expresso na unidade m s⁻¹, onde o segundo é definido em termos da frequência do césio $\Delta\nu_{Cs}$ ”.

Forma “constante-implícita”:

$$c = 299\ 792\ 458\ \text{m s}^{-1} \quad (3)$$

Invertendo-se (3) e substituindo-se s, na expressão resultante, pela expressão em (2), obtém-se uma expressão exata para o metro em termos das constantes definidoras c e $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1\ \text{m} = \left(\frac{c}{299\ 792\ 458} \right) \text{s} = 30,663\ 319 \dots \frac{c}{\Delta\nu_{Cs}} \quad (4)$$

O efeito desta definição é que um metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299 792 458 de segundo.

2.2.3 Quilograma, unidade de massa

A definição do quilograma passa a ser: “O quilograma, símbolo kg, é a unidade do SI de massa. Ele é definido usando-se o valor numérico da constante de Planck h igual a $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ quando expresso na unidade J s, a qual é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, onde o metro e o segundo são definidos em termos de c e $\Delta\nu_{Cs}$ ”.

Forma “constante-implícita”:

$$h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

Invertendo-se (5) e substituindo-se, na expressão resultante, m e s, obtém-se uma expressão para o quilograma em termos dos valores das três constantes definidoras h , $\Delta\nu_{Cs}$ e c :

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg} &= \left(\frac{h}{6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}} \right) \text{ m}^2 \text{ s} \\ &= 1,475\ 521 \dots \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{Cs}}{c^2} \quad (6) \end{aligned}$$

O efeito desta definição é definir a unidade $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ (a unidade das grandezas físicas ação e momento angular). Juntamente com a definição do segundo e do metro, obtém-se a definição da unidade de massa expressa em termos do valor da constante de Planck h .

2.2.4 Ampere, unidade de corrente elétrica

A definição do ampere passa a ser: “O ampere, símbolo A, é a unidade do SI de corrente elétrica. Ele é definido usando-se o valor numérico fixo da carga elétrica elementar e igual a $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ quando expresso na unidade C, a qual é igual A s, onde o segundo é definido em termos de $\Delta\nu_{Cs}$ ”.

Forma “constante-implícita”:

$$e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ A s} \quad (7)$$

Invertendo-se (7) e substituindo-se s, obtém-se uma expressão exata para a unidade ampere em termos das constantes definidoras e e $\Delta\nu_{Cs}$:

$$\begin{aligned} 1 \text{ A} &= \left(\frac{e}{1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}} \right) \text{ s}^{-1} \\ &= 6,789\ 687 \dots \times 10^8 \Delta\nu_{Cs} e \quad (8) \end{aligned}$$

O efeito desta definição é que o ampere é a corrente elétrica correspondente ao fluxo de $1/(1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19})$ cargas elétricas elementares por segundo.

2.2.5 Kelvin, unidade de temperatura termodinâmica

A definição do kelvin passa a ser: “O kelvin, símbolo K, é a unidade de temperatura termodinâmica do SI. Ele é definido usando-se o valor numérico fixo da constante de Boltzmann k igual a $1,380\ 649 \times 10^{-23}$, quando expresso na unidade J K^{-1} , a qual é igual $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$, onde o quilograma, o metro, e o segundo são definidos em termos de h , c e $\Delta\nu_{Cs}$ ”.

Forma “constante-implícita”:

$$k = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (9)$$

Invertendo-se (9) e substituindo-se kg, m e s, obtém-se uma expressão exata para a unidade kelvin em termos das constantes definidoras k , h e $\Delta\nu_{Cs}$:

$$\begin{aligned} 1 \text{ K} &= \left(\frac{1,380\ 649}{k} \right) 10^{-23} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2} \\ &= 2,266\ 665 \dots \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k} \quad (10) \end{aligned}$$

O efeito desta definição é que um kelvin é igual à mudança da temperatura termodinâmica que resulta em uma mudança da energia térmica kT de $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J.

2.2.6 Mol, unidade de quantidade de substância

A definição do mol passa a ser: “O mol, símbolo ‘mol’, é a unidade do SI de quantidade de substância de uma entidade elementar especificada, que pode ser um átomo, molécula, íon, elétron, qualquer partícula ou um grupo específico de partículas. Ele é definido usando-se o valor numérico da constante de Avogadro N_A igual a $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$, quando expresso na unidade mol^{-1} ”.

Forma “constante-implícita”:

$$N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (11)$$

Invertendo-se (11), obtém-se uma expressão exata para o mol em termos da constante definidora N_A :

$$1 \text{ mol} = \frac{6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}}{N_A} \quad (12)$$

O efeito desta definição é que o mol é igual à quantidade de substância de um sistema que contém $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementares especificadas.

2.2.7 Candela, unidade de intensidade luminosa

A definição da candela passa a ser: “A candela, símbolo cd, é a unidade do SI de intensidade luminosa em uma dada direção. Ela é definida usando-se o valor numérico fixo da eficácia luminosa de uma radiação monocromática de frequência de 540×10^{12} Hz, K_{cd} igual a 683, quando expresso na unidade lm W^{-1} , que é igual a cd sr W^{-1} , ou $\text{kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \text{ cd sr}$, onde o quilograma, o metro e o segundo são definidos em termos de h , c e $\Delta\nu_{Cs}$ ”.

Forma “constante-explicita”:

$$K_{cd} = 683 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ s}^3 \text{ cd sr} \quad (13)$$

O esterradiano (sr) é a unidade do ângulo sólido (adimensional), sendo que 1 sr é o ângulo sólido a partir do centro de uma esfera que define, na superfície desta, uma região circular cuja área é igual ao quadrado do raio da esfera. Como a definição de ângulo sólido é a razão entre a área desta superfície e o quadrado deste raio, então $1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2 / \text{m}^2 = 1$.

Invertendo-se (13) e substituindo-se as unidades kg, m, s (obtidas anteriormente) e $\text{sr} = 1$, obtém-se uma expressão exata para a unidade candela em termos das constantes definidoras K_{cd} , h e $\Delta\nu_{Cs}$:

$$\begin{aligned} 1 \text{ cd} &= \left(\frac{K_{cd}}{683}\right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} \\ &= 2,614\ 830 \dots \\ &\quad \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd} \end{aligned} \quad (14)$$

O efeito desta definição é que a candela é a intensidade luminosa, em uma dada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz e que tem uma intensidade radiante nessa direção de $1/683 \text{ W/sr}$.

3. Os motivos para o novo SI e seu impacto na metrologia elétrica

Esta seção originou-se de [12]. Das sete unidades de base do SI, apenas o quilograma ainda era definido em termos de um artefato material (o “Protótipo Internacional do Quilograma”, IPK, mantido no BIPM, em Paris, França). Os resultados das comparações entre as cópias oficiais e o IPK apresentaram algumas divergências significativas com o passar do tempo (até $50 \mu\text{g}$ em 100 anos). As variações no padrão de massa afetavam as unidades elétricas (pois a definição do ampere estava relacionada ao quilograma). O mesmo ocorria com as definições do mol e da candela. Assim, a definição da unidade de massa baseada em uma constante física fundamental (conforme proposto no novo SI), possibilita a realização da unidade do SI de massa em qualquer lugar, em qualquer hora e por qualquer pessoa capacitada e deixa de impactar negativamente as unidades elétricas.

Conforme mencionado na introdução deste artigo, os efeitos Josephson e Hall quântico são usados para fazer a representação das unidades de tensão e resistência elétrica, usando os valores convencionais das constantes de Josephson (K_J) e de von Klitzing (R_K), respectivamente. Posteriormente, esta representação foi reconhecida como uma das formas de realização destas unidades, no sentido mais geral (o sentido mais estrito de realização seria pela definição da unidade) [6]. Rigorosamente falando, desde 1990, a disseminação destas unidades (volt e ohm) tem sido feita em unidades V e Ω convencionais, e não nas unidades V e Ω do SI. Em termos práticos, considerando que todos usam as unidades V e Ω convencionais, embora o uso destas unidades seja conceitualmente incorreto, a diferença entre as unidades convencional e as do SI é irrelevante, (por exemplo, a incerteza padrão do volt convencional com relação ao volt do SI é de $0,4 \mu\text{V/V}$ [13]). Com o novo SI, as incertezas de todas as unidades elétricas do SI serão reduzidas. Isto porque, no novo SI, o ampere é redefinido diretamente da carga elétrica elementar; o quilograma, diretamente da constante de Planck; e as unidades elétricas são realizadas direta ou indiretamente através dos efeitos Josephson ou Hall quântico com os valores do SI das constantes K_J e R_K (que passam a

ser exatos, pois são calculadas diretamente da constante de Planck e da carga elétrica elementar, que são exatas, ou seja, de incerteza zero). E todos passam a usar, de fato as unidades V e Ω do SI.

3.1 Realização das unidades elétricas no novo SI

Esta seção originou-se de [14,15]. O termo “realizar uma unidade” significa estabelecer o valor e a incerteza associada de uma grandeza do mesmo tipo que a unidade, e que seja consistente com a definição da unidade. Assim, qualquer método consistente com as leis da física e baseado no conjunto das sete constantes de referência pode ser usado para realizar a unidade do SI (de base ou derivada). Portanto, a lista abaixo não esgota todas as possibilidades.

3.1.1 Realização prática do ampere (A)

(a) Através da lei de Ohm, da relação de unidades $A = V/\Omega$, e usando realizações práticas das unidades derivadas do SI, do volt (V) e do ohm (Ω), baseadas nos efeitos Josephson e Hall quântico, respectivamente; ou

(b) Através do transporte de elétron único (SET), da relação de unidades $A = C/s$, do valor de e , e da realização prática do SI, do segundo (s); ou

(c) Através da relação $I = C \cdot dU/dt$, da relação de unidades $A = F \cdot V/s$, da realização prática das unidades derivadas do SI, do volt (V) e do farad (F), e da unidade de base do SI, o segundo (s).

3.1.2 Realização prática do volt (V)

Através do efeito Josephson e usando o seguinte valor da constante de Josephson K_J :

$$K_J = \frac{2e}{h} = 483\,597,848\,416\,984 \text{ GHz V}^{-1} \quad (15)$$

O valor numérico truncado foi calculado para 15 dígitos significativos [14].

O valor de K_J na eq. (15) é menor do que o valor $K_{J-90} = 483\,597,9 \text{ GHz V}^{-1}$ (adotado pelo CIPM em 1990 para uso na representação do volt usando o efeito Josephson), pela quantidade fracional $106,665 \times 10^{-9}$. Ou seja, $K_J / K_{J-90} = (1 - 106,665 \times 10^{-9})$. Isto implica que a unidade de tensão realizada através do K_{J-90} era maior do que a unidade do novo SI realizado usando o valor da eq. (15), pela

mesma quantidade fracional. Assim, o valor numérico de uma tensão medida em termos de K_{J-90} é menor na mesma quantidade fracional do que o valor numérico da tensão idêntica medida hoje em termos do volt do novo SI realizado usando o valor de K_J dado pela eq. (15). Ou seja, uma tensão medida no dia da implementação (usando K_J) sofreu um degrau de valor $+106,665 \times 10^{-9} \text{ V/V}$ com relação ao mesmo valor medido no dia anterior (usando K_{J-90}).

3.1.3 Realização prática do ohm (Ω)

(a) Através do efeito Hall quântico em uma maneira consistente com as Diretrizes do CCEM [16] e usando o seguinte valor da constante de von Klitzing R_K :

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25\,812,807\,459\,304\,5 \, \Omega \quad (16)$$

O valor numérico truncado foi calculado para 15 dígitos significativos [14].

O valor de R_K na eq. (16) é maior do que o valor $R_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega$ (adotado pelo CIPM em 1990 para uso na representação do ohm usando o efeito Hall quântico), pela quantidade fracional $17,794 \times 10^{-9}$. Ou seja, $R_K / R_{K-90} = (1 + 17,794 \times 10^{-9})$. Isto implica que a unidade de resistência realizada através do R_{K-90} é maior do que a unidade do novo SI realizado usando o valor da eq. (16), pela mesma quantidade fracional. Assim, o valor numérico de uma resistência medida em termos de R_{K-90} é menor na mesma quantidade fracional do que o valor numérico da resistência idêntica medida hoje em termos do ohm do novo SI realizado usando o valor de R_K dado pela eq. (16). Ou seja, uma resistência medida no dia da implementação (usando R_K) sofreu um degrau de valor $+17,794 \times 10^{-9} \, \Omega/\Omega$ com relação ao mesmo valor medido no dia anterior (usando R_{K-90}).

(b) Através da comparação de uma resistência desconhecida com a impedância de uma capacitância conhecida usando, por exemplo, uma ponte em quadratura, onde, por exemplo, a capacitância tenha sido determinada através de um capacitor calculável e o valor da constante elétrica dada pela expressão $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$.

3.1.4 Realização prática do farad (F), do henry (H), do watt (W), do siemens (S), coulomb (C), tesla (T) e weber (Wb)

Os detalhes das realizações práticas destas unidades podem ser vistos em [14].

3.2 Os impactos do novo SI

O novo SI não afetará a grande maioria dos serviços de calibração. Entretanto, ele trará impactos significativos em duas áreas da metrologia:

(a) Para a realização de massa, em vez de rastrear a massa ao IPK, a realização da massa será baseada nas grandezas elétricas de tensão e resistência, usando o “quilograma eletrônico” ou a balança de Watt [17] (recentemente renomeada para “balança de Kibble”). Entretanto, para a disseminação da unidade de massa, ainda serão utilizados os pesos-padrão (artefatos).

(b) Grandezas elétricas contínuas: conforme visto na seção anterior, os valores aceitos dos padrões de tensão e resistência sofreram um degrau de até 0,1 ppm.

No caso particular da tensão, estima-se um degrau de, aproximadamente, 0,1 $\mu\text{V}/\text{V}$ desde o topo até o final da cadeia de rastreabilidade (comparando-se o valor de uma medição de um padrão feita no dia anterior ao da implementação, com o valor da medição do mesmo padrão, feita no dia da implementação). No topo da cadeia de rastreabilidade estão os sistemas Josephson.

No caso particular da resistência, estima-se um degrau de, aproximadamente, 0,02 $\mu\Omega/\Omega$ desde o topo até o final da cadeia de rastreabilidade (comparando-se o valor de uma medição de um padrão feita no dia anterior ao da implementação, com o valor da medição do mesmo padrão, feita no dia da implementação). No topo da cadeia de rastreabilidade estão os sistemas Hall quântico.

As consequências e ações referentes às grandezas elétricas contínuas serão vistas na próxima seção.

4. Ações necessárias para implementação do novo SI (metrologia elétrica)

4.1 Padrões primários (Inmetro)

O Inmetro possui padronização primária apenas nas grandezas tensão e resistência elétrica (no Laboratório de Metrologia Elétrica Quântica – Lameq). Os programas automatizados de calibração relacionados a estes sistemas tiveram os valores das suas constantes atualizados (vide Eqs. (15) e (16)). Além disso, todos os documentos do Sistema da Qualidade do Lameq foram atualizados para fazer referência aos novos valores, onde necessário. Por fim, os bancos de dados foram copiados (como cópia de segurança) e os bancos de dados em uso tiveram seus valores anteriores (ao novo SI) atualizados aos valores do novo SI, de forma a manter a consistência do histórico e projeções de valores.

4.1.1 Tensão elétrica

No Brasil, as incertezas mínimas de calibração de padrões de referência de tensão contínua (Zener) praticadas são as seguintes [18]:

Tabela I Incertezas na calibração de Zeners no Inmetro.

Valor Nominal de tensão	Padrão de tensão de estado sólido Incerteza expand. ($\mu\text{V}/\text{V}$)	Padrão de tensão Josephson Incerteza expand. (nV/V)
1 V	0,10	40
1,018 V	0,10	40
10 V	0,04	25

O degrau de 0,1 $\mu\text{V}/\text{V}$ é maior ou igual às incertezas praticadas. Assim, a partir do dia da implementação do novo SI, será necessário recalibrar os padrões de referência do Lameq (usados no Sistema Secundário) antes de usá-los. Isto será feito através dos sistemas Josephson do Lameq, já atualizados para o novo SI.

4.1.2 Resistência elétrica

No Brasil, o sistema Hall quântico está em fase de implementação. A data de comparação-chave com o sistema Hall quântico do BIPM está prevista para ocorrer em 2020. Desta forma, não se espera nenhum impacto com relação à calibração de padrões de clientes.

4.2 Padrões secundários (Inmetro e laboratórios da Rede Brasileira de Calibração que são clientes do Inmetro)

4.2.1 Tensão elétrica

O Lameq não calibra seus padrões no Sistema Secundário. Portanto, nenhuma ação será necessária.

Quanto aos clientes do Lameq, recomendamos uma análise prévia da necessidade de uma recalibração antes da data planejada de acordo com a periodicidade normal. Um critério a ser usado pode ser quanto à incerteza expandida da calibração. Por exemplo, se ela for maior do que o dobro do valor do degrau devido à mudança para o novo SI (no caso, se $U > 0,2 \mu\text{V}/\text{V}$), não seria necessária uma recalibração antes da periodicidade normal de calibração do padrão. Este critério é conservador porque, no limite, dois pontos sucessivos de calibração são consistentes se estão no alcance da soma das suas respectivas incertezas expandidas. Caso contrário (se $U \leq 0,2 \mu\text{V}/\text{V}$), pode ser necessário enviar o padrão para recalibração; ou fazer uma adequada correção numérica; ou aumentar adequadamente a incerteza do padrão.

No caso de uma nova calibração ser necessária, recomendamos o prévio agendamento para envio dos seus padrões para calibração logo após o dia da implementação do novo SI. No caso de laboratórios do Inmetro (que são clientes do Lameq) que prestam serviços de calibração em outras grandezas elétricas diretamente dependentes da calibração de Zeners (como é o caso do Laboratório de Calibração em Metrologia Elétrica – Lacle), seus padrões já são recalibrados várias vezes ao ano no Lameq, e foram recalibrados logo após a implementação do novo SI. No caso de laboratórios do Inmetro (que são clientes do Lacle), que prestam serviços de calibração em outras grandezas elétricas indiretamente dependentes da calibração de Zeners (tal como o Laboratório de Metrologia em Energia Elétrica – Lamel), os seus

padrões serão recalibrados após as recalibrações dos padrões do Lacle. Isto se refletirá na rastreabilidade dos serviços de calibração de fontes e medidores, de tensão e corrente, contínua e alternada, bem como de potência e energia.

4.2.2 Resistência elétrica

Atualmente (enquanto o sistema Hall quântico não é implementado), a rastreabilidade em resistência elétrica (no Inmetro) é obtida através da calibração de padrões de resistência do Laboratório de Metrologia em Padronização Elétrica (Lampe) no BIPM. Seguindo-se critério semelhante ao do caso de tensão elétrica (seção 4.2.1), se $U > 0,04 \mu\Omega/\Omega$, o padrão poderia aguardar a próxima calibração periódica. Caso contrário, será avaliada a possibilidade de efetuar uma correção numérica; ou uma recalibração no BIPM logo depois do dia da implementação (já pelo novo SI); ou o aumento adequado da incerteza do padrão.

O mesmo critério pode ser seguido pelos clientes do Inmetro, para decidir quando enviar seus padrões para a próxima calibração no Inmetro.

4.2.3 Corrente, capacitância, indutância e potência elétricas

O Inmetro não possui padronização primária nestas grandezas. Portanto pode-se usar o mesmo critério das seções 4.2.1 e 4.2.2 (o mesmo vale para laboratórios clientes do Inmetro). Para isto, basta usar uma estimativa do valor do degrau para cada grandeza, em decorrência da mudança do SI atual para o novo SI. As seguintes estimativas foram obtidas de [17] (valores em módulo), para as grandezas corrente, capacitância, indutância e potência elétricas, respectivamente: $0,083 \mu\text{A}/\text{A}$; $0,017 \mu\text{F}/\text{F}$; $0,017 \mu\text{H}/\text{H}$; $0,183 \mu\text{W}/(\text{VA})$.

4.2.4 Considerações gerais

No caso de laboratórios que não são clientes do Inmetro (portanto, são clientes de laboratórios da RBC, ou clientes destes clientes), é mais provável que suas incertezas estejam bem acima dos degraus de variação devido ao novo SI, descritos nas seções acima, sendo desnecessária qualquer ação além do envio do padrão para recalibração de acordo com a periodicidade normal. Mas isto deve ser avaliado pelo responsável técnico do laboratório.

No caso de laboratórios que mantenham um adequado controle do histórico do padrão, o seu responsável técnico pode avaliar a possibilidade de fazer a readequação do histórico ao novo SI, conforme mencionamos na seção 4.1.

O CCEM preparou um documento com diretrizes a serem seguidas para a implementação do novo SI (preparação, critérios para recalibração etc.) [19].

4. Conclusões

Este artigo apresentou a revisão do Sistema Internacional de Unidades (SI), sob coordenação do BIPM, e o seu impacto na metrologia elétrica, no Brasil. Foram apresentados os principais motivos para a mudança do SI, os pontos de mudança propostos, como ficou o novo SI, e quais os impactos relacionados às grandezas elétricas. Foram, também, sugeridas ações preliminares e posteriores para a implementação do novo SI, no Brasil. Este artigo faz parte do conjunto de ações a serem tomadas pelo Inmetro de forma a ajudar o Brasil a fazer uma transição bem-sucedida ao novo SI.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer Gregory A. Kyriazis pela contribuição e revisão técnica do artigo.

Referências

- [1] Landim R P e Carvalho, H R. O novo SI e o seu impacto na metrologia elétrica no Brasil. Em anais do Metrologia, 2017.
- [2] Smeaton W A. The Foundation of the Metric System in France in the 1790s. Platinum Metals Rev., vol. 44 no. 3, 2000, p. 125-134.
- [3] <http://www.bipm.org>. Acessado em 13/04/2019.
- [4] Wood B. Proposed Changes to the SI and Their Impact on Electrical Metrology. NCSL International Workshop and Symposium, 2007.
- [5] Chyla W T. Evolution of the International Metric System of Units SI. Acta Physica Polonica A, vol. 120, 2011, p. 998-1011.
- [6] Sistema Internacional de Unidades : SI. Duque de Caxias, RJ : Inmetro/Cicma/Sepin, 2012. 94 p.
- [7] Jeanneret B and Benz S P. Application of the Josephson effect in electrical metrology. Eur. Phys. J. Special Topics, vol. 172, 2009, p. 181-206.
- [8] Carvalho H R, Silva J R B and Briones R E M. Estabelecimento da Base da Escala do Ohm no Inmetro a partir da Padronização Quântica de Resistência. Em anais do X SEMETRO, 2013.
- [9] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N and Williams E R. Adapting the International System of Units to the 21st Century. Phil. Trans. R. Soc. A, vol. 369, 2011, p. 3907-24.
- [10] Draft of the ninth SI Brochure, 10 November 2016. <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2019.pdf>. Acessado em 13/04/2019.
- [11] David B Newell et al 2017 Metrologia in press <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a> . The CODATA 2017 Values of h, e, k, and NA for the Revision of the SI.
- [12] www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/. Acessado em 13/04/2019.
- [13] Recomendação no. 1 do CIPM, 1998. www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/1/. Acessado em 13/04/2019.
- [14] CCEM. Mise en pratique for the ampere and other electric units in the International System of Units (SI). <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-mep/MeP-a-2018.pdf> . Acessado em 13/04/2019.
- [15] Fletcher N, Rietveld G, Olthoff J, Budovsky I and Milton M. Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values. NCSLI Measure J Meas. Sci., vol. 9, no.3, 2014, p. 30-35.
- [16] Delahaye F and Jeckelmann B. Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance. Metrologia, vol. 40, no.5, 2003, p. 217-223.
- [17] Zimmerman N M, Pratt J R, Moldover M R, Newell D B and Strouse G F. The Redefinition of the SI: Impact on Calibration Services at NIST. NCSLI Measure J Meas. Sci., vol. 10, no.2, 2015, p. 36-41.
- [18] http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=BR&iservice=EM/DC.I.I.I. Acessado em 13/04/2019.
- [19] CCEM Guidelines for Implementation of the 'Revised SI'. 8/12/2017 Version 1.0. https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CC/CC-EM/ccem_guidelines_revisedSI.pdf. Acessado em 13/04/2019.



O Novo Kelvin no SI

Klaus Natorf Quelhas

Chefe do Laboratório de Termometria (Later)

Divisão de Metrologia Química e Térmica (Dimqt)

E-mail: knquelhas@inmetro.gov.br

1. Introdução

Em 20 de maio de 2019, Dia Internacional da Metrologia, em homenagem ao dia da assinatura da Convenção do Metro em 1875, da qual o Brasil foi um dos 17 signatários originais, entra em vigor a nona edição do Sistema Internacional de Unidades (SI). Esta edição, contudo, tem um caráter especial, uma vez que todas as sete grandezas de base passarão a ser definidas em termos de constantes fundamentais, e dentre estas se encontra a temperatura termodinâmica T , cuja unidade é o kelvin, de símbolo K [1].

O conceito de temperatura e sua medição está presente em inúmeros processos e situações, desde as mais simples e rotineiras até as mais complexas. Antes de sair de casa, por exemplo, nos certificamos – mesmo que através da sensação corporal – da temperatura ambiente, para escolher adequadamente qual roupa usar. Processos produtivos, em geral, demandam medições de temperatura com elevada exatidão, como por exemplo nos setores metalúrgico, automotivo, aeroespacial e alimentício; processos químicos e biológicos; modelos meteorológicos para previsão do tempo e mudanças climáticas, dentre diversos outros. Medições de temperatura são empregadas como ferramentas de controle de qualidade de produtos, porém podem também exercer um papel crítico no controle de riscos à segurança e à saúde.

Termodinamicamente falando, a temperatura está diretamente relacionada ao grau de agitação a nível molecular – ou energia térmica – de um sistema. Ou seja, quanto maior a energia térmica de um sistema, maior a sua temperatura. Para se medir a temperatura termodinâmica de forma direta se faz necessário medir outras grandezas, cujas relações com a temperatura são bem conhecidas e descritas pelas leis da física, tais como a pressão de um gás a volume constante, a velocidade do som em um gás, a radiação emitida por um corpo negro, dentre outras. Termômetros que se baseiam nestas relações são ditos primários, não requerendo calibração contra outros padrões de temperatura, como o Ponto Triplo da Água (PTA), por exemplo. Entretanto, medições primárias de temperatura termodinâmica são complexas, demoradas e por vezes pouco reprodutíveis, o que tornam os termômetros primários pouco práticos para a disseminação do kelvin a nível global [2].

Como alternativa à termometria primária, foram adotadas escalas de temperatura, baseadas em pontos fixos – estados de equilíbrio térmico durante transições de fase (fusão, solidificação ou ponto triplo, por exemplo), para os quais os valores de temperatura atribuídos foram determinados com o auxílio de métodos primários [3] – assim como em padrões de interpolação, termômetros de elevada exatidão e reprodutibilidade, que são calibrados nos pontos fixos definidos dentro da faixa de medição

estabelecida. Estes termômetros não são primários, uma vez que as relações entre as grandezas medidas e a temperatura são empíricas, porém fornecem a melhor aproximação possível da temperatura termodinâmica de uma forma bem mais prática, precisa e reprodutível. O Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) adotou escalas internacionais de temperatura em 1927, 1948, 1968 e 1990, como forma de superar as dificuldades de medição de temperaturas termodinâmicas e de uniformizar as medições de temperatura nos países membros com o emprego de escalas universalmente aceitas. A escala em vigor atualmente é a Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90), baseada em 17 pontos fixos e três instrumentos interpoladores: Termômetro de gás a volume constante, termômetro padrão de resistência de platina e termômetros de radiação monocromática [4]. Uma escala de temperatura provisória foi também adotada em 2000 (*Provisional Low Temperature Scale of 2000* – PLTS 2000) para temperaturas abaixo de 0,65 K, limite inferior da EIT-90 [5].

2. O kelvin

Desde 1954, após a 10ª Convenção Geral de Pesos e Medidas (CGPM), o kelvin é definido como sendo a razão $1/273,16$ da temperatura termodinâmica do Ponto Triplo da Água. O PTA é o estado de equilíbrio da água pura no qual as três fases – sólida, líquida e gasosa – coexistem a uma única temperatura constante, sendo sua temperatura fixada em exatamente 273,16 K, ou 0,01 °C [6]. Esta definição, portanto, estabeleceu o PTA como o alicerce da metrologia térmica, vinculando a realização do kelvin à sua realização, através de uso de células de PTA, que são constituídas de ampolas seladas, em geral de vidro ou quartzo, contendo água de elevada pureza, conforme ilustrado na figura I. À temperatura ambiente, a ampola contém somente água e vapor de água (não há ar em seu interior). Ao resfriar a água no interior da célula até a formação de uma fração de sólido (mas sem congelá-la totalmente), obtém-se as três fases em equilíbrio térmico, realizando-se então o PTA. A grande vantagem em adotá-lo como temperatura de referência é a sua excelente reprodutibilidade, da ordem de algumas dezenas de μK (microkelvin, ou 10^{-6} K), em comparação com os demais pontos fixos conhecidos. Além disso, células de PTA são portáteis, de construção relativamente simples e de baixo custo [7].



Figura I Célula de Ponto Triplo da Água construída no Inmetro. Fonte: Later.

Contudo, vincular a definição da unidade à realização do PTA possui algumas desvantagens. Em primeiro lugar, a pureza da água e sua composição isotópica (concentração de diferentes isótopos de hidrogênio e oxigênio nas moléculas de água) são fatores determinantes para a temperatura de seu ponto triplo [8]. A primeira depende da capacidade de purificação de água do fabricante da célula, enquanto a segunda depende basicamente da região onde a água é extraída, assim como do processo de fabricação da célula. O Comitê Consultivo para Termometria (CCT) do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM) estabeleceu uma composição isotópica ideal para células de PTA, bem como métodos para correção da sua temperatura em razão de composições diferentes das estabelecidas, para se alcançar máxima exatidão. Além desses fatores, problemas relacionados à estabilidade de células de PTA a longo prazo são de conhecimento geral, o que compromete a reprodutibilidade das medições ao longo do tempo. Desta forma, uma definição da unidade de temperatura desvinculada destes fatores, universal e independente de qualquer realização e suas limitações era necessária.

Ao definir o kelvin em termos de uma constante fundamental – no caso, a constante de Boltzmann k – os problemas inerentes à realização do PTA são eliminados, e abre-se portas para uma nova era na metrologia térmica. Uma vez que a definição da unidade não é mais dependente da realização de um estado termodinâmico particular, e à medida que a tecnologia e os métodos de medição evoluem, é possível desenvolver novos métodos de realização e disseminação da unidade sem a necessidade de uma redefinição da mesma [1].

3. A constante de Boltzmann k e o novo kelvin

A constante de Boltzmann corresponde a um fator de conversão entre temperatura e energia, de maneira que após a redefinição do kelvin, temperaturas serão efetivamente medidas em termos de energia térmica. De fato, após a redefinição, as temperaturas poderiam inclusive ser efetivamente expressas em unidades de energia, contudo isso iria requerer que os termômetros passassem a indicar temperaturas em joule [8], sem mencionar que a sociedade em geral, a indústria e o comércio teriam que passar a interpretar medidas de temperatura em uma unidade muito pouco familiar, o que seria uma mudança muito drástica. Isso significaria dizer, por exemplo que a energia térmica média de um ambiente aumentou em $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J, quando seria muito mais simples dizer que a temperatura da sala subiu $1\ ^\circ\text{C}$.

Pensando nisso, e em outras consequências da redefinição, um requisito para a mesma foi a consistência em relação à definição anterior, de maneira que o impacto sobre os setores não-científicos da sociedade fosse mínimo ou nulo. Em outras palavras, para a comunidade em geral, $1\ ^\circ\text{C}$ vai continuar sendo $1\ ^\circ\text{C}$ (ou seja, a temperatura em kelvin menos 273,15) após 20 de maio de 2019. Em adição, o CIPM estabeleceu, seguindo as recomendações do CCT, que a constante de Boltzmann deveria ser determinada com uma incerteza relativa não maior do que 1×10^{-6} (1 ppm, ou uma parte por milhão), através de ao menos dois métodos fundamentalmente diferentes, dentre os quais ao menos um deveria ter uma incerteza relativa menor do que 3×10^{-3} [9], como forma de assegurar que a temperatura do Ponto Triplo da Água permaneça igual a 273,16 K após a redefinição.

Ao longo das últimas três décadas, os avanços em termometria primária – antes dominada pela termometria a gás em volume constante (de incerteza elevada) e termometria acústica – permitiram medições da constante de Boltzmann com incertezas gradativamente menores, abrindo caminho para a nova definição do kelvin [7]. Na última década foi realizado um esforço conjunto para a determinação de k envolvendo diversos Institutos Nacionais de Metrologia (INMs), e finalmente, em julho de 2017, prazo limite para o envio de resultados das medições, os critérios foram atendidos, sendo a constante de Boltzmann determinada não apenas por dois, mas por três métodos independentes, sendo que com todos eles uma incerteza relativa menor do que 3×10^{-6} foi alcançada. A figura 2 ilustra as contribuições dos INMs para o ajuste do valor de k . Os métodos empregados foram:

i) *Termometria Acústica de Gás*

Neste método, o valor de k é medido a partir de medições da velocidade do som em um gás monoatômico a baixas pressões. O gás é confinado em ressonadores, cavidades metálicas – geralmente de aço ou cobre – cilíndricas, esféricas ou quase-esféricas, dentro das quais a velocidade do som é medida em termos de suas frequências de ressonância a 273,16 K.

Este foi o método que contribuiu de maneira mais significativa para a determinação de k , contando com o maior número de medições, haja visto que apresenta uma série de vantagens que permitiram alcançar incertezas relativas menores que 1×10^{-6} , o que não foi possível através dos demais métodos primários [10], tais como a sua baixa sensibilidade a variações de pressão e volume da cavidade [7]; a possibilidade de medições redundantes a diferentes frequências de ressonância; a possibilidade de uso simultâneo de micro-ondas para se medir a velocidade do som em termos de razões desta com a velocidade da luz c , bem como medir as dimensões da própria cavidade; e a disponibilidade de valores teóricos das propriedades termodinâmicas dos gases utilizados, em especial do hélio e do argônio [8]. Contudo, estima-se que a termometria acústica alcançou um nível de precisão que não será superado num futuro próximo.

ii) *Termometria de Constante Dielétrica*

Esta técnica consiste em determinar a k através da medição da permissividade elétrica relativa, ou

constante dielétrica, de um gás a uma temperatura termodinâmica T , em função da pressão p . A determinação da permissividade elétrica se dá através da medição da capacitância de um capacitor preenchido com hélio a uma pressão p , a uma temperatura T igual a 273,16 K, medindo em seguida a sua capacitância sob vácuo, e tomando a razão entre as duas capacitâncias para o cálculo da constante dielétrica [11].

Dentre os INMs envolvidos na redefinição do kelvin, apenas o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB, Alemanha) contribuiu com medições de k em termos de medições de constante dielétrica, relatando uma incerteza relativa igual a $1,9 \times 10^{-6}$ [8]. Dentre os principais obstáculos para a obtenção de um valor de k com baixas incertezas destacam-se as medições de pressão do gás e capacitância, que demandam medições com incertezas menores que 1×10^{-6} ; a determinação da compressibilidade do capacitor, cujas dimensões variam em função da pressão do gás e dependem do design e dos materiais empregados na sua construção; e a elevada sensibilidade do método à presença de impurezas no gás [12].

iii) *Termometria de Ruído Johnson*

Esta técnica, apesar de ser conceitualmente muito diferente das duas técnicas anteriores, guarda semelhanças muito interessantes. Enquanto as duas primeiras medem propriedades de um gás – velocidade do som e constante dielétrica – em função da agitação térmica de suas moléculas confinadas em um invólucro, seja ele um ressonador ou um capacitor, a termometria de ruído Johnson permite a medição da temperatura termodinâmica em função da agitação dos elétrons livres de um condutor [11], que se comportam de maneira análoga a de um gás

confinado. Essa agitação de cargas gera um ruído elétrico – ou ruído Johnson – cuja densidade espectral de potência da tensão pode ser medida e relacionada diretamente com a temperatura, e por consequência com k . Em comparação com os métodos anteriores, a grande vantagem deste método reside no fato dele não ser limitado pelo comportamento não-ideal de gases reais.

Dada a pequena intensidade das tensões de ruído medidas, de ordem de nanovolts (ou 10^{-9} V), da sua natureza aleatória, e da necessidade de se medir o ruído em grandes larguras de frequência por longos períodos, medições de temperatura em termos de ruído Johnson requerem cuidados especiais, tais como a medição do ruído do elemento do sensor em comparação a uma fonte de ruído de referência; proteção contra ruídos externos (inclusive da própria instrumentação), o que requer blindagem de todas as partes sensíveis; e transmissão de sinais via fibra ótica. O experimento mais bem sucedido com termometria de ruído Johnson foi realizado em uma parceria entre o NIM (*National Institute of Metrology*, China) e o NIST (*National Institute of Standards and Technology*, Estados Unidos), no qual todo o aparato experimental foi montado em uma sala blindada subterrânea, em um campus distante do centro de Pequim, sendo as medições realizadas com as luzes apagadas no Ponto Triplo da Água ao longo de 100 dias para minimizar as diversas fontes de incerteza, inclusive as de natureza estatística. Além disso, neste experimento foi empregada uma fonte de ruído de tensão quântica, desenvolvida no NIST, o que permitiu a medição de k em termos da constante de Plank e da constante de Josephson com uma incerteza relativa de $2,7 \times 10^{-6}$.

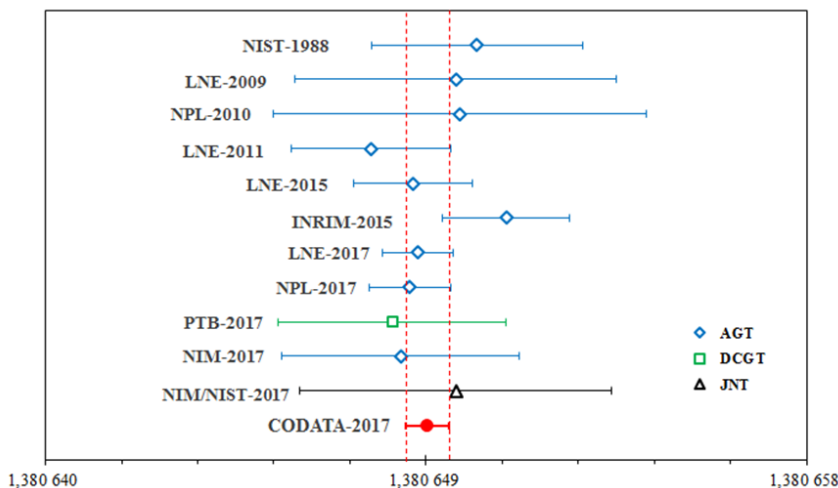


Figura 2 Determinações de k por diferentes métodos, e seu novo valor ajustado (em vermelho). AGT: Termometria acústica de Gás (*Acoustic Gas Thermometry*); DCGT: Termometria de Constante Dielétrica de Gás (*Dielectric Constant Gas Thermometry*); JNT: Termometria de Ruído Johnson (*Johnson Noise Thermometry*). Fonte: CODATA (2017).

Uma vez atendidos todos os requisitos, o novo valor ajustado da constante de Boltzmann k foi definido em 2017 como sendo igual a $1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, com uma incerteza relativa de $3,7 \times 10^{-7}$, o que corresponde a uma incerteza na temperatura termodinâmica do Ponto Triplo da Água de 0,1 mK, assegurando assim que após a redefinição a temperatura do PTA permanecerá, ao menos por enquanto, igual a 273,16 K. Desta forma, assegurada a consistência com a definição anterior, a nova definição do kelvin (traduzida para o Português), aprovada em novembro de 2018 e em vigor a partir de 20 de maio de 2019, é:

“O kelvin, símbolo K, é a unidade do SI de temperatura termodinâmica. Ela é definida tomando-se o valor numérico fixo da constante de Boltzmann como sendo $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quando expressa na unidade J K^{-1} , que é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, onde o quilograma, metro e segundo são definidos em termos de h , c e $\Delta\nu_{Cs}$.”

Desta forma, o novo SI emprega a definição explícita da constante de Boltzmann na redefinição do kelvin. Isso significa, conforme o texto do próprio SI, que “um kelvin é igual à mudança na temperatura termodinâmica que resulta em uma mudança na energia térmica kT de $1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J}$ ” [1]. Em outras palavras, com a nova definição, as medições de temperatura serão uma comparação indireta entre uma quantidade de energia térmica medida e a energia padrão especificada pela definição da constante de Boltzmann, e não mais a comparação de uma temperatura desconhecida com a temperatura do PTA [12].

É importante observar que a energia térmica é de fato uma propriedade medida a nível molecular, podendo ser definida como a quantidade média de energia por grau de liberdade molecular, de forma que ela é expressa em joules por grau de liberdade, sendo este último adimensional, razão pela qual a unidade da energia térmica kT é o joule. Isso implica em dizer que a energia térmica acima definida é, assim como a temperatura termodinâmica, uma grandeza intensiva.

O novo SI também define o grau Celsius, de símbolo $^{\circ}\text{C}$, cuja temperatura t permanece sendo igual à subtração da temperatura T em kelvin por 273,15, destacando também que ambas as unidades kelvin e grau Celsius são unidades da Escala Internacional de Temperatura de 1990, que define duas grandezas

T_{90} e t_{90} como sendo aproximações das temperaturas termodinâmicas T e t , respectivamente [1].

3. O que muda com a nova definição?

Conforme declaração elaborada pelo CCT para compor o comunicado para divulgação do novo SI, “A redefinição do kelvin não terá efeito imediato na prática de medição de temperatura ou na rastreabilidade das medições de temperatura, e para a maioria dos usuários, passará despercebida” [13]. Desta forma, assegura-se que a população, a indústria e as relações comerciais em todo o mundo não serão afetadas pela nova definição. Medições de temperatura continuarão sendo realizadas da mesma forma, sendo a rastreabilidade assegurada pela consistência da nova definição em relação à anterior.

A consequência mais imediata da redefinição é que o Ponto Triplo da Água perde seu status especial, sendo “rebaixado” à mesma categoria dos demais pontos fixos. Apesar disso, o PTA continuará sendo de fundamental importância para medições práticas (não-termodinâmicas) de temperatura, em razão das características que fazem dele o ponto fixo de mais alta reprodutibilidade em termometria. Ainda assim, apesar de a temperatura do PTA permanecer – por enquanto – igual a 273,16 K ou 0,01 $^{\circ}\text{C}$, ela agora não será mais fixa, tendo uma incerteza relativa de $3,7 \times 10^{-7}$, equivalente a 0,1 mK.

Assim que o novo SI entrar em vigor, será publicada uma recomendação (*mise en pratique*) para a realização da nova definição do kelvin, contendo instruções para medições da temperatura termodinâmica T por diversos métodos [8], incluindo termometria acústica, de radiação, de constante dielétrica, de índice de refração e de ruído Johnson. O documento conterà também informações suplementares de conversão para temperaturas termodinâmicas das temperaturas medidas em termos das escalas internacionais de temperatura (EIT-90 e PLTS-2000) [12], que permanecerão válidas após a redefinição, sendo o PTA mantido como o ponto fixo de referência da EIT-90.

A nova definição permite medições primárias em temperaturas muito distantes do PTA, especialmente acima de 1300 K e abaixo de 20 K, faixas nas quais termômetros primários poderão medir temperaturas termodinâmicas com incertezas menores do que as

alcançáveis com as escalas de temperatura correntes. Um exemplo é o termômetro de radiação, que é um instrumento de interpolação da EIT-90, e poderá ser utilizado como termômetro primário [8] – uma vez que sejam seguidas as recomendações do *Mise en pratique*.

A elaboração de uma nova escala, em substituição às escalas vigentes, ou a restrição das escalas vigentes a uma faixa menor de temperatura, ou ainda o completo abandono delas para a adoção apenas de medições termodinâmicas é ainda uma questão em aberto, que não será respondida em um futuro próximo. Hoje o consenso é que o custo da adoção de uma nova escala é muito maior que os ganhos [7]. Por enquanto, as escalas de temperatura vão coexistir com as medições termodinâmicas e, à medida que novas técnicas primárias de medição se consolidem, alternativas serão discutidas. Um exemplo destas técnicas é a termometria de espalhamento Doppler, com a qual foi possível medir k com uma incerteza de 24×10^{-6} através de espectroscopia. A nova definição do kelvin estabelece as fundações para o desenvolvimento de novos métodos de medição de temperatura, livres de limitações materiais e tecnológicas.

Referências

- [1] BIPM, The new SI Brochure (draft, 9th ed.), 2019 (<https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2019.pdf>)
- [2] CCT/BIPM, *Mise en Pratique for the definition of the kelvin in the SI (draft, version 2.0)*, 2019 (<https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018.pdf>)
- [3] Rusby R. L. et al, Thermodynamics Basis of the ITS-90, *Metrologia* 28, 1991
- [4] Preston-Thomas H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27, 1990
- [5] Rusby R. L. et al, The Provisional Low Temperature Scale from 0.9 mK to 1 K, *PLTS 2000 J. Low. Temp. Phys.* 126, 2002
- [6] BIPM, Resolução 3 da IOa CGPM, 1954 (<https://www.bipm.org/en/CGPM/db/IO/3/>)
- [7] Moldover M. R., Tew W. L., Yoon, H. W., *Advances in thermometry*, *Nature Physics* 12, 2016
- [8] Fischer J. et al, The Boltzmann project, *Metrologia* 55, 2018
- [9] CCT/BIPM, Report of the 27th Meetin, 2014 (<https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CC/CCT/CCT27.pdf>)
- [10] CODATA, The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI, *Metrologia* 55, 2018
- [11] Pitre L. et al, Determinations of the Boltzmann constant, *Comptes Rendus Physique*, 2018
- [12] Machin G., The kelvin redefined, *Meas. Sci. Technol.* 29, 2018
- [13] CCT, 2017 Report from TG-SI (https://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/28/TG-SI_report_2017_revised-2017-15.pdf)



A Redefinição do Mol: Avanços nas Medições em Química e Biologia

Bruno Carius Garrido

Laboratório de Análise Orgânica (Labor)

Divisão de Metrologia Química e Térmica (Dimqt)

E-mail: bcgarrido@inmetro.gov.br

O mol é a unidade básica da química e da biologia e é a unidade mais “jovem” do Sistema Internacional de Unidades (SI). Apesar de ter sido proposto por Avogadro em 1811 e sistematizado por Ostwald em 1893, foi apenas em 1971 que a comunidade metrológica internacional, após longas discussões entre químicos e físicos, abraçou a definição do mol aceitando-o como a sétima unidade base do SI (BIPM, 2006). Ostwald não aceitava ainda em seu tempo a existência de átomos ao declarar “permitamo-nos de forma geral fazer referência à massa em gramas de uma substância que é numericamente igual ao peso molecular daquela substância como um mol”. Estabeleceu assim uma definição que, considerando todo o conhecimento acumulado até os dias de hoje, parece bastante simplista. Entretanto, há dois fatos notáveis sobre essa definição: tem uma relação com a massa (e, portanto, com o SI) e teve aceitação global no seu tempo (incluindo aqueles que utilizavam o sistema imperial como o Reino Unido e EUA).

À medida em que a clareza sobre a existência dos átomos aumentou, tornou-se importante entender como o mol poderia ser usado para expressar aquela nova grandeza que surgiria e seria definida como a “quantidade de matéria”. Foi então que se passou a entender que havia uma relação entre o mol e o número de átomos ou moléculas contidas em um mol, de forma que essa poderia ser a expressão numérica para a quantidade de matéria (STILLE, 1955). Assim, a primeira definição do mol chegou

ao SI com a seguinte redação (INMETRO, 2012):

- 1. O mol é a quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quantos átomos existem em 0,012 quilograma de carbono 12; seu símbolo é “mol”.*
- 2. Quando se utiliza o mol, as entidades elementares devem ser especificadas, podendo ser átomos, moléculas, íons, elétrons, assim como outras partículas ou agrupamentos especificados de tais partículas.*

Apesar de ter sido a redação aceita à época, há alguns problemas graves com essa definição, que nada mais é do que uma “atualização” da definição de Ostwald, sendo aplicada para o carbono 12. Porém um fato que parecia uma vantagem anteriormente, tornou-se uma desvantagem com o passar dos anos. A definição é baseada na massa de forma que não reflete completamente os anseios da química em poder expressar a quantidade de matéria de uma forma mais pura, considerando que reações químicas são baseadas no número de entidades e não em massa. Além disso, a relativa instabilidade do protótipo internacional do quilograma (IPK) acabava influenciando diretamente o mol. Mais grave, no entanto, é que a definição se baseia em uma massa definida de carbono 12, permitindo a interpretação de que exista algum material formado por átomos não ligados de carbono 12 em repouso e em seu estado fundamental, o que não é verdade. Dessa forma, a definição se tornou pouco prática e pouco

foi absorvida pelos próprios químicos. Pouquíssimos livros didáticos de química trazem a definição e/ou a compreensão correta da unidade nesse formato e essa sempre foi uma questão de preocupação para a metrologia química.

Ademais, por conta da relação direta feita na redação da unidade com a massa, tornou-se extremamente comum em química a expressão do conteúdo de compostos químicos em termos de concentração ou fração mássica e não em termos de quantidade de matéria.

A Revisão do SI anunciada em 2011 teve diretrizes muito claras para todas as unidades: fixar sempre que possível os valores das constantes fundamentais e definir as unidades com base nessas constantes. No caso do mol, foi ainda considerada a posição da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), que desejava uma definição mais clara em termos didáticos. O trabalho de redefinição foi feito em colaboração contínua entre os principais interessados até chegar à seguinte redação (BIPM, 2019):

O mol, símbolo mol, é a unidade do SI para quantidade de matéria. Um mol contém exatamente $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementares. Esse número é o valor numérico fixo da constante de Avogadro N_A , quando expresso na unidade mol⁻¹ e é chamado número de Avogadro.

A quantidade de matéria, símbolo n, de um sistema é a medida do número de entidades elementares especificadas. Uma entidade elementar pode ser um átomo, uma molécula, um íon, um elétron, ou qualquer outra partícula ou grupo especificado de partículas.

Essa nova definição traz a clareza de que o mol é uma unidade de contagem de entidades. Além disso, a definição marca a necessidade de se identificar aquilo que se mede pelo uso do termo genérico “entidades elementares”. Assim, a nova definição deixa extremamente claro que o primeiro passo em qualquer medição em química e biologia é identificar e definir inequivocamente aquilo que se deseja medir. A partir dessa definição, o número de Avogadro passa a ser fixo e sem incerteza, sendo a constante de Avogadro esse mesmo número quando expresso na unidade mol⁻¹.

A redefinição foi possível graças à capacidade analítica atual que atingiu níveis de incerteza de medição capazes de permitir a redefinição do mol em termos do número explícito de entidades elementares. Ainda que os efeitos práticos dessa redefinição sejam sutis, ela

realinha a definição do mol com a forma compreendida pela maioria dos químicos.

Uma implicação prática em química é que a definição do mol de 1971 marcava uma relação exatamente igual a 1 entre o peso atômico (ou molecular) e a massa molar de um átomo ou molécula. Com a nova definição, esse número deixa de ser exato de forma que a relação entre peso molecular em unidades de massa atômica (ou Daltons) e a massa molar em gramas deixa de ser exatamente igual a 1. Tal relação, porém, mantém-se muito próxima de 1 com uma diferença negligenciável para todos os efeitos práticos, sendo menor do que uma parte em 10⁹.

A definição da IUPAC sobre entidades elementares define tais entidades como quaisquer objetos ou eventos contáveis (NIČ et al., 2009). Assim sendo, pode-se considerar células, vírus, bactérias e outros organismos vivos como entidades elementares, a depender da capacidade de determiná-los por meio de contagem, sendo esse potencialmente um grande avanço prático trazido por essa definição. Caso esse entendimento seja confirmado pela comunidade internacional, a definição passaria a englobar medições de importância para a biologia, uma área até então negligenciada pelo SI.

A nova definição do mol é extremamente bem-vinda já que atende aos anseios de longa data dos químicos por uma redação que reflita claramente a prática da ciência química além de abrir horizontes completamente novos na área de rastreabilidade metrológica em biologia. Finalmente, a nova definição deixa claro o que é um mol, sem necessidade de uma interpretação a respeito das suas sutilezas, resolvendo as questões da harmonização para fins didáticos e da própria forma como os cientistas entendem a quantidade de matéria.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer a Wagner Wollinger pela revisão do texto e comentários técnicos.

Referências

- [1] BIPM. Draft SI Brochure. 9a edição. Sèvres: 2019.
- [2] BIPM. Le système International d'Unités. 8a edição. Sèvres: 2006.
- [3] INMETRO. Sistema Internacional de Unidades SI. 1a edição. Rio de Janeiro: 2012.
- [4] STILLE, U. Messen und Rechnen in der Physik. Wiesbaden: 1955.

Metrologia 4.0: Indústria 4.0 e Internet das coisas.

Luiz Vicente Gomes Tarelho

Pesquisador

Divisão de Metrologia em Tecnologia da
Informação e Telecomunicações(Dmtic)

E-mail: ltarelho@inmetro.gov.br

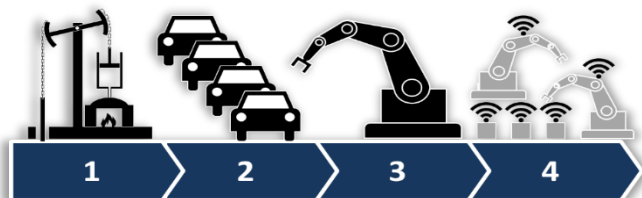
Durante a Revolução Industrial na Inglaterra entre 1760-1780, segundo Hobsbawn [1], o modo de produção agrícola e manufaturado foi sendo substituído pelo uso de máquinas e equipamentos mecanizados com uso da energia a vapor, sendo o tear mecânico um exemplo dessa mecanização do processo produtivo, denominado de Indústria 1.0. A partir da utilização de linha de montagem proposta por Ford, a produção assumiu uma escala maior com uso de energia elétrica e termoelétrica baseada em carvão, dando origem ao período da Indústria 2.0. Nesse contexto, a metrologia surgiu a partir da necessidade de padronização dos processos de produção e dos bens produzidos. Dentre outras características desse período segundo Toffler [2], estão a especialização da mão de obra, a sincronização das linhas de montagem, a concentração dos insumos para a produção do bem na fábrica, a maximização da escala de produção, e uma centralização da tomada de decisões.

Rodolfo Saboia Lima de Souza

Chefe da Divisão de Metrologia em
Tecnologia da Informação e
Telecomunicações(Dmtic)

Com o advento da Era da Informação na década de 60, enquanto onda de desenvolvimento econômico, as características da produção nesse período solicitariam uma maior automação do processo produtivo com uso de autômatos, braços mecânicos e robôs com uso de eletrônicos para controle e acompanhamento do processo de produção, culminando com a disseminação da internet na década de 80. Sendo assim surgiu a classificação de Indústria 3.0 para esse período.

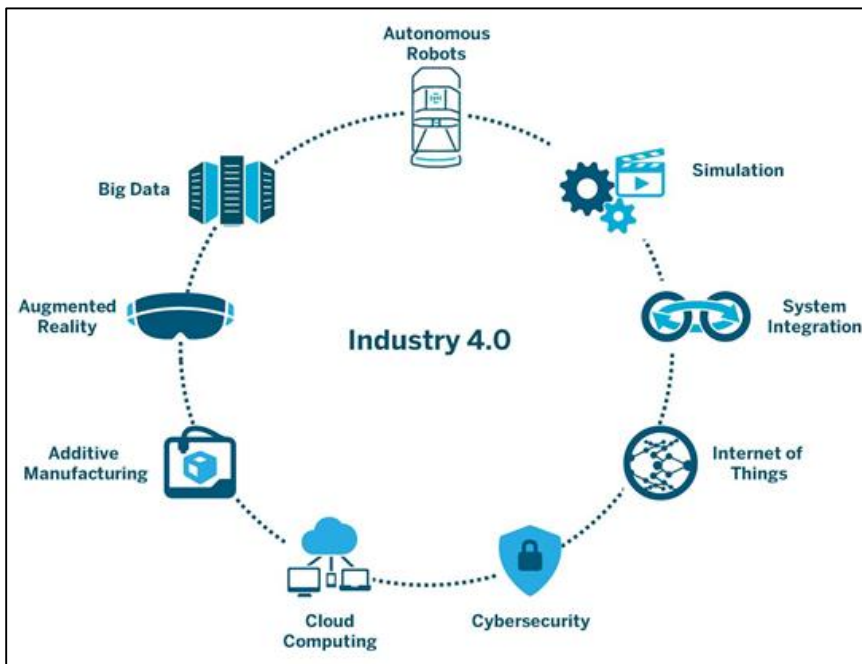
Atualmente, estamos vivenciando a convergência entre os processos produtivos físicos e virtuais, com o uso de sistemas ciberfísicos compostos por sensores e chips de controle e automação dando origem aos sistemas cibernéticos e internet das coisas com uso da rede mundial para comunicação entre todas as etapas do processo produtivo, inclusive embarcando capacidade de decisão nos sistemas de informação usados para controle e automação, criando sistemas sencientes, com capacidade de percepção do ambiente produtivo e a partir de algoritmos estatísticos tomarem decisões de controle desse ambiente. Esses sensores inteligentes são os oráculos do processo produtivo com capacidade de prevenção e predição de possíveis condições falhas na operação da linha de produção.



Novamente citando Toffler [2], as características dessa Indústria 4.0 podem ser representadas por: diversificação da padronização, necessidade de conhecimento multidisciplinar para a efetiva atuação dos recursos humanos, temporização entre linhas de produção e sistemas gerenciais com sincronização ubíqua, onipresente, bem como disponibilidade em qualquer lugar do globo dos dados de controle e automação da produção devido à globalização do processo de produção entre matrizes, filiais, fábricas, fornecedores de insumos distribuídos em países diferentes. Nós vivemos um período de miniaturização dos sensores e eletrônicos usados no controle e automação com uma integração em larga escala com uso de *software* embarcado nesses chips que devem prover uma descentralização da tomada de decisão, oferecendo possibilidades de uso de algoritmos que atribuam aos sensores a capacidade de controlar e atuar no processo produtivo a partir dos dados coletados e virtualizados. Nesse ambiente surge a necessidade de evolução da metrologia desenvolvida para atender esses desafios da implantação da Indústria 4.0, com uma capacidade de dar suporte a diversas padronizações e normatizações de maneira interdisciplinar aliando os conhecimentos tecnológicos de física e engenharia aos conhecimentos de tecnologias da informação e comunicação. Trazendo para os institutos nacionais de metrologia a necessidade de desenvolver serviços de calibração e ensaio condizentes com os desafios dessa indústria possuidora de processos produtivos virtualizados.

As principais tecnologias que se tornaram pilares para o desenvolvimento da Indústria 4.0 [3] podem ser discutidas a partir de uma classificação de 9 tecnologias capacitadoras: Sistemas Integrados, Manufatura Aditiva, Simulações, Robôs Autônomos, Big Data, Realidade Aumentada, Segurança da Informação, Internet das Coisas, e Computação em Nuvem. A metrologia tem um papel importante para a viabilização dessas tecnologias para que elas possam ser absorvidas pela indústria nacional.

No caso de sistemas integrados, a integração entre os sensores e dispositivos usados no monitoramento dos processos produtivos e chips com sistemas embarcados pode ser amplamente utilizado em sistemas micro eletromecânicos, micro-eleto-ópticos possibilitando um avanço nos sistemas de medição disponíveis para a indústria. Uma das iniciativas mais inovadoras nessa integração é o projeto NIST on a Chip [4], em que algumas das padronizações das unidades de medida do SI estão materializadas no chip, permitindo ao usuário do chip possuir uma referência de alta qualidade metrológica instalada no seu processo produtivo. Essa visão de futuro, com a difusão dessa tecnologia, modifica o papel de um instituto nacional de metrologia que necessita evoluir de uma condição de depositário de padrões nacionais de referência metrológicos e provedor de ensaios e calibrações para um papel de agente atuante no desenvolvimento de inovações tecnológicas aliadas à indústria oferecendo o conhecimento metrológico para viabilizar o uso dessas tecnologias de maneira remota e em tempo real.



Para o funcionamento confiável e seguro dessas tecnologias que envolvem uso intensivo de armazenamento e processamento em Nuvem com volume extenso de dados, a Segurança da Informação [5] assume importância fundamental para garantir a confidencialidade do acesso aos dados, permitindo que somente usuários autorizados tenham acesso a informações de monitoramento e controle de uma unidade industrial mas que tenham disponibilidade a qualquer tempo e local, garantindo também que os dados mantenham sua integridade.

Um dos aspectos interessantes, da Indústria 4.0 é a integração entre o mundo virtual e o mundo físico, a partir da integração entre as redes de comunicação e os sistemas físicos, sensores e dispositivos usados na linha de produção, dando origem à Internet das Coisas: objetos físicos interconectados por rede que trocam informações de dados de monitoramento mas também informações de controle e atuação, podem modificar as condições de produção, otimizando-as através de métodos estatísticos e algoritmos de controle de processos. Para viabilizar a comunicação desses sensores e dispositivos inteligentes é necessária uma tecnologia robusta para a comunicação sem fio, disponível de maneira onipresente nos locais necessários com taxas de troca de informação de alta velocidade e confiabilidade como por exemplo no uso da tecnologia 5G [6].

Os desafios para o desenvolvimento da metrologia que dá suporte à internet das coisas podem ser divididos nas 4 camadas de atuação da tecnologia: sensores, rede, aplicações integradas e segurança da informação. A metrologia 4.0 necessita oferecer serviços de calibração e ensaios para esses sensores e dispositivos inteligentes com possibilidade de atuação remota, em tempo real, atendendo às características de ubiquidade e descentralização inerentes à indústria 4.0. Na camada de redes de comunicação, o desafio é a interoperabilidade das operações com padrões diversos, estabelecendo protocolos confiáveis e seguros para o transporte dos dados de uma rede local sem fio para um rede metropolitana com fibras ópticas [7].

Para o ecossistema produtivo, todas as operações relacionadas ao processo produtivo devem estar interconectadas, como por exemplo o fornecimento de insumos, a distribuição dos produtos, trazendo para a camada de aplicações integradas a necessidade de desenvolvimento de uma logística e transporte inteligentes que envolvem uso de sensores de posição e

navegação, soluções de otimização de carga e atendimento de demandas em tempo real. Nesse aspecto, as soluções para distribuição de energia inteligente, “*smart grid*”, e o próprio conceito de uma “*smart city*”, permitiria desenvolver aplicações que auxiliariam a promover um ecossistema produtivo seguro e confiável.

Cabe ressaltar que a segurança da informação também é uma tecnologia viabilizadora para a internet das coisas pois além de permitir os aspectos de confidencialidade, integridade e disponibilidade discutidos anteriormente ela permite assegurar a autenticidade dos dados trocados entre os vários objetos físicos pertencentes à rede, identificando-os de maneira inequívoca, aumentando a confiabilidade da rede de comunicação utilizada.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer a Wagner Wollinger pela revisão do texto e comentários técnicos.

Referências

- [1] Eric J Hobsbawn, The Age of revolutions: 1789-1848, Ist Vintage Books ed., 1996.
- [2] Alvin Toffler, A Terceira Onda, Editora Record, 2001.
- [3] Alasdair Gilchrist, Industry 4.0: The Industrial Internet of Things, Apress, 2016.
- [4] Nist on a chip project, accessed 05/10/2019 <https://www.nist.gov/pml/nist-chip-atomic-vapor>
- [5] NIST Special Publication 800-53, Security and Privacy Controls for Federal Information Systems and Organizations Rev.4, 2013.
- [6] Recommendation ITU-R M.2083 - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, ITU, 2015.
- [7] Recommendation ITU-T Y.4455, Reference architecture for Internet of things network capability exposure, ITU, 2017.

Créditos das Imagens

p.02
https://brasil.elpais.com/brasil/2018/11/13/ciencia/1542109733_360096.html

Ilustração do Protótipo Internacional do Quilograma fora de suas redomas protetoras. / Greg L (Wikimedia Commons)

p.24
<https://www.thomsonreuters.com/en/reports/electric-vehicles.html>

p.36
<https://br.freepik.com/search?dates=any&format=search&page=18&query=term%C3%B4metro&sort=popular>

p.39
<https://cultura.culturamix.com/ciencias/biologia/biologia-ensino-medio>

p.41
<http://pentare.com.br/2016/09/26/internet-das-coisas/>

Expediente

Ministro da Economia: Paulo Guedes

Secretário Especial de Produtividade, Emprego e Competitividade: Carlos Alexandre da Costa

Presidente do Inmetro: Angela Flôres Furtado

Diretor de Metrologia Científica e Tecnologia: Valnei Smarçaro da Cunha

Editores Executivos: Gelson Martins da Rocha e Silvio Francisco dos Santos

Editores Assistentes: Aline O. Coelho, Rafael de Oliveira Lattanzi Vaz, Eveline De Robertis

Diagramação: Eveline De Robertis

Os artigos assinados são de responsabilidade dos autores e não expressam necessariamente a opinião do Inmetro. A reprodução de qualquer artigo é permitida mediante prévia autorização.

Cadernos de Metrologia [recurso eletrônico] / Diretoria de Metrologia Científica e Tecnologia do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Vol. 1, n. 1 (2019) Abr/Jun. - Duque de Caxias, RJ: Inmetro, 2019.

Modo de acesso: <http://www.inmetro.gov.br/imprensa/releases/cadernos-de-metrologia.pdf> (este exemplar).

Trimestral

1. Metrologia - Periódicos. I. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

CDD. 389.1

Catálogo: Biblioteca do Inmetro

