

O novo SI e o seu impacto na metrologia elétrica no Brasil

The new SI and its impact on electrical metrology in Brazil

Regis Pinheiro Landim¹, **Helio Ricardo Carvalho**¹

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro

E-mail: rplandim@inmetro.gov.br

Resumo: Este artigo aborda a proposta de revisão do Sistema Internacional de Unidades, e o seu impacto na metrologia elétrica. Ele 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”.

Palavras-chave: indústria; laboratório de calibração; metrologia elétrica; novo SI.

Abstract: In this paper, the proposed International System of Units (SI) review is addressed, as well as its impact on electrical metrology. This paper is part of a set of actions to be taken by Inmetro in order to help a successful transition to the new SI in Brazil.

Keywords: calibration laboratory; electrical metrology; industry; new SI.

1. INTRODUÇÃO

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 [1]. 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 [1], 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 Internacional 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) [2,3].

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) [3].

Em 1948 as unidades elétricas foram introduzidas no SI, inclusive com o ampere como unidade (de base) da corrente elétrica [2]. 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 [4]. 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, $\Delta\nu_C$) [5]. Em 1979, houve uma redefinição da unidade de intensidade luminosa, que passou a utilizar outra constante física fundamental (a eficácia luminosa, K_{cd}) [5].

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 de luz); assim, o metro passou a ser definido como o comprimento do caminho percorrido pela luz no vácuo em um determinado intervalo de tempo [4]. 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 de 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 [4].

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) [2]. 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 [6,7].

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

Este trabalho abordará a proposta de 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 PROPOSTO

Esta seção originou-se de [8,9]. 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, a nova proposta do SI prevê a redefinição de quatro outras unidades de base a partir de constantes físicas fundamentais: o quilograma (que passaria a utilizar a constante de Planck, h); o ampere (que passaria a utilizar a carga elétrica elementar, e); o kelvin (que passaria a utilizar a constante de Boltzman, k); e o mol (que passaria 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, $\Delta\nu_{Cs}$; a velocidade da luz no vácuo, c ; e a eficácia luminosa, K_{cd}), definirão 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 físicas fundamentais, 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 físicas declaradas na primeira parte, que passam a ser chamadas de “constantes definidoras”.

A expectativa é de que o novo SI seja 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 não perturbado do átomo de césio $133 \Delta\nu_{Cs}$ 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 em azul são definitivos e foram determinados pelo ajuste especial do CODATA 2017. Eles foram calculados a partir de dados avaliados antes de 1º de julho de 2017 [10].

Fixando-se o valor numérico, a unidade torna-se definida, através destas “constantes definidoras”. Rigorosamente falando, a “Parte 1” 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” [9], 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-explicita”) que advém da definição. No texto e,

consequentemente, na forma “constante-explicita” 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-explicita” para a forma “unidade-explicita” (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 em repouso 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-explicita”:

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

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

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

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 em repouso do átomo ^{133}Cs .

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 de 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-explicita”:

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

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 $\Delta\nu_{Cs}$:

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

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. Kilograma, 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-explicita”:

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

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 :

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

$$= 1,475\,521 \dots \times 10^{40} \frac{h \Delta\nu_{Cs}}{c^2}$$

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-explicita”:

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

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

$$1 \text{ A} = \left(\frac{e}{1,602\,176\,634 \times 10^{-19}} \right) \text{s}^{-1} \quad (8)$$

$$= 6,789\,687 \dots \times 10^8 \Delta\nu_{Cs} e$$

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-explicita”:

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

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 $\Delta\nu_{Cs}$:

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

$$= 2,266\,665 \dots \frac{\Delta\nu_{Cs} h}{k}$$

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

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-explicita”:

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

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 $\Delta\nu_{Cs}$:

$$1 \text{ cd} = \left(\frac{K_{cd}}{683}\right) \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ sr}^{-1} \quad (14)$$

$$= 2,614\ 830 \dots \times 10^{10} (\Delta\nu_{Cs})^2 h K_{cd}$$

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 [11]. Das sete unidades de base do SI, apenas o quilograma ainda é 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 afetam as unidades elétricas (pois a definição do ampere está relacionada ao quilograma). O mesmo ocorre 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), possibilitaria a realização da unidade do SI de massa em qualquer lugar, em qualquer hora e por qualquer pessoa capacitada e deixaria 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) [5]. 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 $0,4 \mu\text{V/V}$ [12]).

Com o novo SI, as incertezas de todas as unidades elétricas do SI seriam reduzidas significativamente. Isto ocorreria porque o ampere seria redefinido diretamente da carga elétrica elementar; o quilograma, diretamente da constante de Planck; e as unidades elétricas seriam realizadas direta ou indiretamente através dos efeitos Josephson ou Hall quântico com os valores do SI das constantes K_J e R_K (que passariam a ser exatos, pois serão calculadas diretamente da constante de Planck e da carga elétrica elementar, que serão exatas, ou seja, de incerteza zero). E todos passaríamos 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 [13,14]. 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 :

$$K_J = \frac{2e}{h} \approx \mathbf{483\ 597,848\ 416\ 983\ 6\ GHz\ V^{-1}} \quad (15)$$

O valor numérico truncado foi calculado para 16 dígitos significativos. Os valores em **vermelho** são preliminares e deve-se aguardar os valores definitivos a serem divulgados pelo CCEM.

O valor de K_J na eq. (15) é menor do que o valor $K_{J-90} = 483\ 597,9\ GHz\ V^{-1}$ (adotado pelo CIPM em 1990 para uso na representação do volt usando o efeito Josephson), pela quantidade fracional $\mathbf{106,665} \times 10^{-9}$. Ou seja, $K_J / K_{J-90} = (1 - \mathbf{106,665} \times 10^{-9})$. 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} teria sido menor na mesma quantidade fracional do que o valor numérico da tensão idêntica que seria 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) sofreria um degrau de valor $+\mathbf{106,665} \times 10^{-9}\ V/V$ 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 [15] e usando o seguinte valor da constante de von Klitzing R_K :

$$R_K = \frac{h}{e^2} \approx \mathbf{25\ 812,807\ 459\ 304\ 50\ \Omega} \quad (16)$$

O valor numérico truncado foi calculado para 16 dígitos significativos. Os valores em **vermelho** são preliminares e deve-se aguardar os

valores definitivos a serem divulgados pelo CCEM.

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} era 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} teria sido menor na mesma quantidade fracional do que o valor numérico da resistência idêntica que seria 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) sofrerá 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 [13].

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 seria

baseada nas grandezas elétricas de tensão e resistência, usando o “quilograma eletrônico” ou a balança de Watt [16] (recentemente renomeada para “balança de Kibble”). Entretanto, para a disseminação da unidade de massa, ainda serão utilizados os pesos-padrão (artefatos), da mesma maneira que é feita atualmente.

(b) Grandezas elétricas contínuas: conforme visto na seção anterior, os valores aceitos dos padrões de tensão e resistência sofrerão 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 terão os

valores das suas constantes atualizados (vide Eqs. (15) e (16)). Além disso, todos os documentos do Sistema da Qualidade do Lameq serão atualizados para fazer referência aos novos valores, onde for necessário. Por fim, os bancos de dados serão copiados (como cópia de segurança) e os bancos de dados em uso terão 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 [17]:

Tabela 1. Incertezas na calibração de Zeners no Inmetro.

Valor nominal de tensão	Padrão de tensão de estado sólido Incerteza expand. ($\mu\text{V/V}$)	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 $0,1 \mu\text{V/V}$ 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 ainda está para ser definida, podendo ocorrer antes ou depois do dia da implementação do novo SI. É bastante provável que todas as etapas de

reconhecimento internacional do sistema Hall quântico do Inmetro estejam completadas apenas depois do dia da implementação do novo SI. 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 $U > 0,2 \mu\text{V/V}$), 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 $U \leq 0,2 \mu\text{V/V}$), 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 – Lacel), seus padrões já são recalibrados várias vezes ao ano no Lameq, e serão

recalibrados logo após a implementação do novo SI. No caso de laboratórios do Inmetro (que são clientes do Lancel), 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 logo após as recalibrações dos padrões do Lancel. 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.

Aos clientes externos (ao Inmetro), pode ser possível, também, solicitar a recalibração de seus padrões um pouco antes da data de implementação do novo SI, com um pedido específico de recalibração já adequada ao novo SI.

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 antes ou 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 [16] (valores em módulo), para as grandezas corrente, capacitância, indutância e potência elétricas, respectivamente: $0,083 \mu A/A$; $0,017 \mu F/F$; $0,017 \mu H/H$; $0,183 \mu W/(VA)$.

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 está preparando um documento com diretrizes a serem seguidas para a implementação do novo SI (preparação, critérios para recalibração etc.) que será divulgado em tempo hábil para o dia da implementação.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a proposta de 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 ficará 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.

6. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] <http://www.bipm.org>. Acessado em 04/08/2017.
- [3] Wood B. Proposed Changes to the SI and Their Impact on Electrical Metrology. *NCSL International Workshop and Symposium*, 2007.
- [4] Chyla W T. Evolution of the International Metric System of Units SI. *Acta Physica Polonica A*, vol. **120**, 2011, p. 998-1011.
- [5] Sistema Internacional de Unidades : SI. Duque de Caxias, RJ : INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012. 94 p.
- [6] 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.
- [7] 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. *X SEMETRO*, 2013.
- [8] 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.
- [9] Draft of the ninth SI Brochure, 10 November 2016. www.bipm.org/utils/common/pdf/si-brochure-draft-2016b.pdf. Acessado em 04/08/2017.
- [10] 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 N_A for the Revision of the SI.
- [11] www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/. Acessado em 04/08/2017.
- [12] Resolução no. 1 do CIPM, 1998. www.bipm.org/en/CIPM/db/1988/1/. Acessado em 04/08/2017.
- [13] CCEM. Mise en pratique for the ampere and other electric units in the International System of Units (SI). www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/30/CCEM-17-08.1-mise-en-pratique.pdf. Acessado em 04/08/2017.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] http://kcdb.bipm.org/appendixC/country_list_search.asp?CountSelected=BR&iservice=EM/D C.1.1.1. Acessado em 04/08/2017.

AGRADECIMENTOS

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