

A redefinição do ampere e consequências imediatas

Luís Ribeiro¹

¹Instituto Português da Qualidade
lribeiro@ipq.pt

Resumo

Como consequência da recente revisão do Sistema Internacional de Unidades, surge a redefinição da unidade elétrica, o ampere, que passa a ficar definido através de uma constante física fundamental, a carga elementar, e , considerada imutável no tempo e no espaço e pondo de parte a definição obsoleta cuja materialização se tornava impossível de realizar. Os últimos resultados experimentais obtidos permitem atribuir novos valores numéricos às constantes que têm sido utilizadas desde a última convenção de 1990 e cuja revisão implica a introdução de pequenas alterações para as unidades elétricas, mas longe de provocar qualquer intervenção significativa de programas de recalibração.

Introdução

ampere:
valor numérico fixado da carga elementar, e , como sendo $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ quando expressa na unidade coulomb, que é igual a ampere segundo, com o segundo definido em função de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

26.ª Conferência Geral do Pesos e Medidas

É usual ouvir-se dizer que a Natureza está regulada por ciclos. Da mesma forma, o conhecimento que o Homem adquiriu sobre as leis que a regulam também tem sido estabelecido por ciclos que refletem, em cada momento da sua História, o seu grau e o seu nível de aprendizagem.

A evolução do conhecimento sobre o que hoje é designado, de forma genérica, electricidade (ou eletricidade na língua que recentemente usurpou o “c” ao electrão), também tem evoluído por ciclos, tendo cativado, modelado e orientado o conhecimento científico ao longo dos últimos séculos: Tales de Mileto (séc. VI a.c.) tentou explicar a atração de objetos de ferro por um certo tipo de rocha encontrada na cidade de Magnésia [1]; William Gilbert (séc. XVII) usou a palavra “electricus” passando a designar as propriedades atrativas do âmbar [2]; homens da ciência como, por exemplo, Alessandro Volta, Christian Ørsted, André-Marie Ampère, Michael Faraday, Georg Ohm, Friedrich Gauss, Eduard Weber, produziram o conhecimento científico que hoje lhes

é reconhecido no início do séc. XIX; Maxwell estabeleceu as respectivas equações diferenciais que definiram os princípios matemáticos para o eletromagnetismo clássico no princípio da década de 1860; os significativos progressos de engenharia consagrados por nomes como Nikola Tesla, Galileo Ferraris, Thomas Edison, George Westinghouse, Werner von Siemens, Graham Bell ou Lord Kelvin (apenas para nomear alguns dos mais reconhecidos), são apenas exemplos de ciclos do conhecimento que a sociedade testemunha e acredita ao progresso tecnológico aliado ao desenvolvimento do conhecimento científico; até o próprio conceito e significado do termo Metrologia reflete este movimento cíclico do conhecimento: até aos finais do séc. XIX era utilizada para designar o conceito relativo à “medição”, derivando da palavra Grega *μετρον*, absorvendo hoje o moderno significado de “ciência da medição” [3].

A adoção do ampere, do seu símbolo A e da sua definição como unidade de corrente elétrica teve também uma evolução própria e cíclica: começou por ser considerado “*um fenómeno que produzia o depósito de 1 mg de prata por segundo numa solução de nitrato de prata*” [4]; passou em 1948 a ser uma definição mecânica de “*corrente constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de secção circular desprezável e colocados à distância de 1 metro um do outro no vazio, produziria entre estes condutores uma força igual a 2×10^{-7} newton por metro de comprimento*” [5], culminando com a última redefinição do Sistema Internacional de Unidades (SI) que determina a definição do ampere, acabada de ser adotada pela 26.ª Conferência Geral do Pesos e Medidas, como “*o valor numérico fixado da carga elementar, e , como sendo $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ quando expressa na unidade coulomb, que é igual a ampere segundo, com o segundo definido em função de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$* ” [6].

E, entre estas duas últimas definições, decorreram 70 anos - a idade da reforma para a definição do ampere.

A Nova Definição

Foi, portanto, decidido reformar o ampere. Mais concretamente a sua definição.

Esta última reforma representa o resultado e o culminar de discussões científicas que tiveram o seu início em 2005, quando um grupo de metrologistas apelaram à revisão da definição do kilograma que até à data mostrava-se incapaz de fornecer uma referência suficientemente estável. E estas tomadas de posição foram consideradas como perfeitamente

justificáveis, pois esta nova definição permite acabar com a utilização de definições baseadas em leis empíricas, passando o SI a ser um sistema verdadeiramente coerente, que passa a ter por base a fixação de valores para constantes que nos são fornecidas pelo comportamento da natureza e cujos valores resultam da intervenção da ciência na sua determinação, associando uma incerteza resultante das realizações experimentais em cada momento.

Naturalmente que o desenvolvimento tecnológico é também um fator preponderante para o resultado anunciado destas discussões, pois as realizações experimentais hoje disponíveis vieram permitir um salto significativo na qualidade dos valores das incertezas com que são determinados os valores atribuíveis àquelas constantes, como por exemplo, o caso do fenómeno quântico conhecido como *Coulomb blockade*, que veio disponibilizar a capacidade de permitir o controlo, através de dispositivos construídos à base de junções de túnel, à escala nanométrica, do movimento de um eletrão (*single-electron tunneling*) [7].

E, no contexto destas novas definições, as constantes de interesse para o domínio metrológico das grandezas elétricas são as constantes universalmente conhecidas através dos seus símbolos: h e e .

Àquele que é, certamente, o mais significativo pensador do último século, Max Planck, deve-se uma das mais revolucionadoras teorias que determinou a evolução da ciência e da mecânica quântica, permitindo relacionar matematicamente o conteúdo de energia de um *quantum* à sua frequência da radiação. É assim hoje possível à ciência determinar o valor daquela relação, sendo conhecida como h e a que foi dado o nome em sua homenagem, a constante de Planck. A ele foi atribuído o prémio Nobel da física em 1918 [8].

Uma experiência é uma questão que a ciência coloca à Natureza e o resultado de uma medição é o registo da resposta da Natureza.

Max Planck

Relativamente à determinação da carga elementar, e , muito contribuíram os trabalhos de Robert Millikan, um físico experimentalista que veio também a ser agraciado com o prémio Nobel da física em 1923, pelas medições da carga elétrica resultantes dos seus trabalhos no domínio do efeito fotoelétrico [9].

A plenitude do conhecimento significa sempre alguma compreensão das profundezas da nossa ignorância; e isso é sempre favorável à humildade e reverência.

Robert Millikan

E a fixação de valores numéricos a estas duas constantes da física tem sido fundamental para a evolução dos trabalhos no domínio metrológico das grandezas elétricas, pois a conjugação dos valores atribuídos a h e a e tem servido de base para a formulação de outras constantes que se tornaram, nos últimos anos, os padrões *de facto*, para a representação do ohm e do volt, através de realizações experimentais de dois efeitos quânticos macroscópicos:

O efeito de Hall quântico, para o qual os estudos e as experiências de Klaus von Klitzing valeram-lhe a atribuição do prémio Nobel da física em 1985 [10] e que permite materia-

lizar o padrão de resistência elétrica, R_{QHE} através da relação $R_{\text{QHE}} = R_K / n$.

Sempre quis responder a todas as questões que a natureza nos propõe.

Klaus von Klitzing

O efeito de Josephson que transpõe, para o domínio da metrologia primária, as descobertas e os resultados dos trabalhos pioneiros e relativos à supercondutividade e tunelamento, desenvolvidos pelo físico Brian Josephson, também laureado com o prémio Nobel da física em 1973 [11] e que permite materializar o padrão de tensão elétrica, V_{Jos} , através da relação $V_{\text{Jos}} = n \cdot f / K_J$.

Acredito que nós podemos "sentir" o futuro. Apenas ainda não conseguimos estabelecer o mecanismo para que isso aconteça.

Brian Josephson

onde:

n representa um valor inteiro;

f a frequência de radiação que polariza um conjunto de junções no estado superconductor;

R_K representa a constante de von Klitzing;

K_J representa a constante de Josephson.

E estas duas formulações estão definidas em termos da constante de Planck e da carga elementar através dos quocientes:

- $R_K = h / e^2$
- $K_J = 2 \cdot e / h$

Até hoje, os valores que têm vindo a ser utilizados foram consensualmente definidos em 1990 como

- $R_{K-90} = 25\,812,807 \, \Omega$
- $K_{J-90} = 483\,597,9 \times 10^9 \text{ Hz/V}$

e, à data, considerados como valores exatos!

Todos os trabalhos que têm vindo a ser realizados ao longo dos últimos anos, por diferentes laboratórios e através de realizações experimentais distintas, têm sido fundamentais para uma melhor determinação dos valores de h e de e e para a diminuição dos valores das incertezas que lhes são associadas. Esse histórico pode ser acompanhado em permanência através dos resultados do *Task Group on Fundamental Constants*, publicados sob a responsabilidade do comité interdisciplinar *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) do *International Council for Science* (ICSU) [12].

É a partir da relação entre uma nova abordagem científica e uma fixação de novos valores sobre estas constantes que se concretiza a redefinição do SI que entrará em vigor no próximo dia 20 de maio de 2019 e que adota os valores de:

- $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ Js}$

Consequências

A reformulação da definição do ampere não implica

uma reformulação na prática quotidiana da metrologia onde estejam envolvidas as grandezas elétricas, quer sob a forma de padrões, artefactos ou instrumentos de medição.

De facto, para sociedade em geral, a aplicação das constantes como base da reformulação do SI e as próprias novas fixações numéricas não trazem, na prática quotidiana, qualquer alteração. Apenas as mais exigentes experiências e realizações, praticadas nos mais avançados laboratórios, vão “sentir” estas alterações.

No entanto, existe uma exceção!

Com efeito, para algumas medições realizadas no domínio da utilização da unidade de tensão elétrica, o volt, apesar da alteração da fixação dos novos valores numéricos para h e e levarem a resultados na ordem dos 10^{-9} , quer para R_K quer para K_J , a eliminação da truncagem, estabelecida em 1990, nos respetivos cálculos, faz desta forma “saltar” esta alteração para valores na ordem de 10^{-8} para a constante de von Klitzing e na ordem de 10^{-7} para a constante de Josephson, pelo que essas variações ficam assim estabelecidas:

- $\Delta R_K = \Delta R_K / R_{K-90} - 1 = 1,779 \times 10^{-8}$
- $\Delta K_J = \Delta K_J / K_{J-90} - 1 = -1,067 \times 10^{-7}$

Vejamos o seu impacto nestes domínios.

Resistência elétrica

O impacto nas medições de resistência elétrica torna-se diminuta, pois as incertezas típicas obtidas com os sistemas experimentais usados por alguns Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) que implementam o efeito de Hall quântico, e por consequência têm vindo a utilizar o valor da constante de von Klitzing, R_{K-90} , apresentam valores na ordem de algumas partes em 10^9 , enquanto que as melhores incertezas associadas às medições de resistências-padrão de melhor desempenho, raramente têm valores inferiores a várias partes em 10^8 , devido a limitações intrínsecas aos próprios dispositivos a medir e sistemas de medição utilizados.

Consequentemente, uma alteração de $0,02 \mu \Omega/\Omega$ na determinação de valores de resistências devido a uma alteração de R_{K-90} para R_K , só poderá ser visível ou “sentida” por algumas das mais exigentes realizações operadas pelos laboratórios primários.

Tensão elétrica

Para além das experiências e realizações mais exigentes já referidas, as determinações que recorrem ao efeito de Josephson têm vindo a ser até hoje realizadas com a utilização de K_{J-90} . Assim e para os laboratórios que têm vindo a apresentar uma incerteza, naquelas determinações, reconhecidas a valores de incerteza expandida iguais ou superiores a $0,2 \mu V/V$, a alteração às constantes não produz qualquer efeito visível nas determinações dos resultados das suas calibrações.

O mesmo não acontece para os laboratórios que declaram incertezas menores, onde é normal encontrarem-se valores de incertezas declaradas da ordem de $0,1 \mu V/V$ para as calibrações de referências eletrónicas de tensão baseadas em díodos zener, quando realizadas por recurso a padrões de Josephson e que estão, portanto, no limite da variação agora verificado na redefinição do SI.

Contudo, apesar de ser possível detetar as variações produzidas por aplicação de ΔK_J , as mesmas podem ser absorvidas pelo comportamento que alguns dispositivos apresentam e consequente com a sua estabilidade de longo prazo.

Vejamos um exemplo aplicacional, onde o comportamento a longo prazo assimila a variação produzida pela alteração que se introduzirá, em maio de 2019, com a entrada em vigor do reformulado SI.

A Figura 1 apresenta o comportamento típico de uma referência mantida durante 14 anos em condições laboratoriais e quando comparada com um padrão de Josephson: observa-se um declive, não exatamente constante por períodos de alguns meses, mas perfeitamente descrito por uma função linear e próprio deste tipo de dispositivos a longo prazo, de cerca de $(-0,2 \mu V/V)/ano$. A sua instabilidade e ruído intrínseco de curto prazo são visíveis e representados pelos resíduos relativos à função de ajuste.

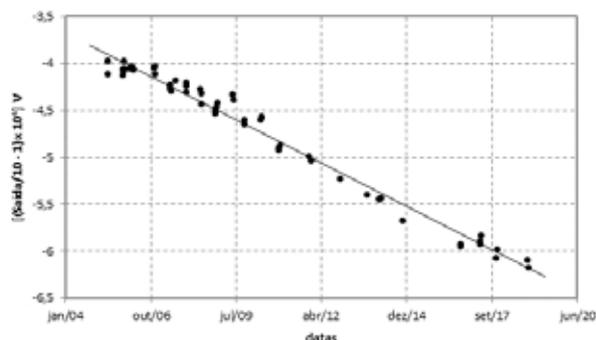


Fig. 1 - Comportamento em função do tempo de uma referência eletrónica de tensão.

Na Figura 2, é avaliado o mesmo comportamento, mas apenas no período correspondente aos 2 últimos anos. Nesta figura é também propositadamente incluído o salto provocado, nas mesmas determinações, apenas por simulação da alteração do valor do K_{J-90} para o atual K_J . Como se pode avaliar, o salto provocado por variação de valor igual a ΔK_J confunde-se com a própria instabilidade de curto prazo do dispositivo em estudo, do seu ruído intrínseco e é absorvido pela incerteza da

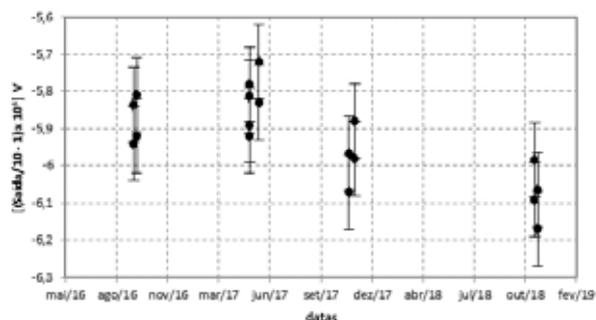


Fig. 2 - Conjunto de dados reais e dados simulados por variação de K_J (barras de erro correspondentes a incertezas típicas).

medição.

Na Figura 3, mostram-se os dois conjuntos de dados, agora perfeitamente diferenciados por cor e pelo respetivo ajuste linear.

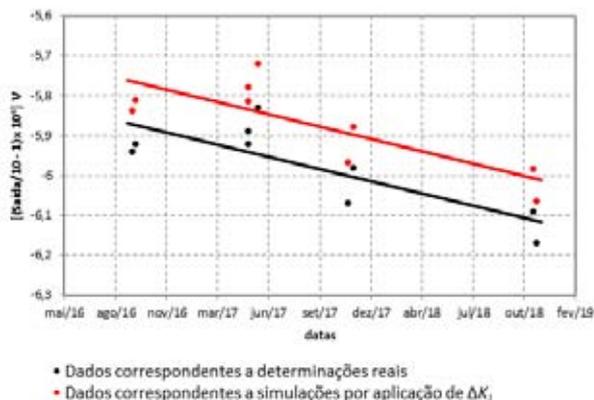


Fig. 3 - Conjuntos de dados diferenciados por aplicação de ΔK_j .

Conclui-se, portanto, que em dispositivos desta natureza, onde o comportamento representado pelos resíduos relativos uma função de ajuste e consequentes com a sua estabilidade e ruído intrínseco de curto prazo são da mesma ordem de grandeza da alteração provocada pela aplicação de K_j em vez de K_{j-90} , ainda é possível avaliar e demonstrar essa variação, apesar de se encontrar no limite das incertezas típicas das respetivas determinações, pelo que a sua aplicação vai depender da exigência do processo de medição em causa.

Outras grandezas ou instrumentos

As alterações provocadas pelos degraus de ΔR_k na variação em resistência e de ΔK_j na variação em tensão serão de todo marginais nos trabalhos associados aos restantes domínios metrológicos.

Os voltímetros de elevada exatidão têm especificações de algumas partes em 10^6 pelo que, apesar dos mais bem caracterizados equipamentos apresentarem resoluções que permitem mensurar aquele degrau, em situações laboratoriais excecionais e em situações onde as correções são aplicadas, os mesmos serão na prática absorvidos pelo ruído intrínseco que os mesmos apresentam.

No domínio da impedância e da admitância, apesar da rastreabilidade direta passar a ser determinada pelo novo valor de R_k , uma alteração de algumas partes em 10^8 está longe das incertezas alcançadas pelos mais modernos sistemas de medição de capacidade, de indutância ou mesmo de resistência em regime alternado.

Também o domínio da potência e energia fica imune a este degrau, pois o estágio atual de desenvolvimento nestas determinações consegue atingir, nas melhores implementações, valores de algumas partes em 10^6 .

Em conclusão

As alterações inevitáveis provocadas por uma alteração tão significativa para o mundo científico tocam, ao de leve, os limites de visibilidade para os utilizadores mais exigentes nas calibrações de resistência e tensão - sendo esta última a que

evidencia uma alteração mais significativa. Contudo, essas alterações são longe de provocar a intervenção de programas de recalibração, como aconteceu com as alterações introduzidas em 1990 em algumas unidades do SI.

Referir que os padrões com base nos efeitos quânticos macroscópicos de Hall e de Josephson provaram ser os mais consistentes para as realizações experimentais na materialização das unidades ohm e volt, de tal forma que sustentam, eles próprios, as alterações agora decididas pela comunidade científica.

Finalmente, e como a história o demonstra, é importante referir que todo o conhecimento é evolutivo, pois assiste-se já ao desenvolvimento de esforços no sentido de se adotar novas definições, nomeadamente, estará já para breve (previsivelmente em 2026) uma redefinição do segundo, uma vez que a determinação do seu valor com cada vez menores incertezas a isso deve conduzir.

Em 1989 e por ocasião da escolha de K_{j-90} e de K_{j-90} foi afirmado que

“estes valores foram escolhidos pois é improvável que necessitem de alterações significativas num futuro previsível”.

Mas... esse futuro chegou agora e chega sempre!

Referências

1. Tales de Mileto, https://en.wikipedia.org/wiki/Thales_of_Miletus, consultado em 2019-04-16;
2. William Gilbert, [https://en.wikipedia.org/wiki/William_Gilbert_\(astronomer\)](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Gilbert_(astronomer)), consultado em 2019-04-16;
3. Kind, D. & Lübbig, H., “Metrology - the present meaning of a historical term”, Metrologia, IoP Publishing, 2003, 40, 255-257;
4. Elmquist, R. E. et al. “The Ampere and Electrical Standards” Journal of research of the National Institute of Standards and Technology vol. 106,1 65-103. 1 February 2001, doi:10.6028/jres.106.005;
5. Résolution 6 - Proposal for establishing a practical system of units of measurement. 9e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). 12-21 Octobre 1948, BIPM;
6. Résolutions Adoptées - 29e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). 13-16 Novembre 2018, BIPM;
7. Piquemal F., et al, “Single charge transport standards and Quantum Metrological triangle experiments”, in Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”, Volume: Course CXLVI, Recent Advances in Metrology and Fundamental Constants Course CXLVI, IOS Press, January 2007;
8. Max Planck, “The Genesis and Present State of Development of the Quantum Theory”, Nobel Lecture, June 2, 1920;
9. Robert Millikan, “The electron and the light-quant from the experimental point of view”, Nobel Lecture, May 23, 1924;

10. Klaus von Klitzing, "The Quantized Hall Effect", Nobel Lecture, December 9, 1985;
11. Brian D. Josephson, "The Discovery of Tunneling Supercurrents", Nobel Lecture, December 12, 1973;
12. CODATA, "Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants", <http://dx.doi.org/10.18434/T4WW24>; consultado em 2019-02-28;



Luís Filipe Ribeiro, nasceu em Lisboa em 1957. Frequentou o curso de Engenharia Eletrotécnica no Instituto Superior Técnico e obteve a categoria de Técnico Superior dos quadros da Administração Pública, iniciando funções no INETI em 1979 no domínio dos ensaios ambientais em equipamento elétrico e eletrónico. Desde 1988 trabalha no laboratório primário das grandezas elétricas. Esteve envolvido nas implementações do efeito de Josephson (padrão primário de Tensão DC), do efeito de Hall Quântico (padrão primário de Resistência) e do sistema primário interferométrico para calibração de acelerómetros. Em 2009 integrou o IPQ e é responsável pelos domínios metrológicos de eletricidade (Corrente e Tensão DC; Corrente e Tensão AC) e Vibração. Está nomeado como contact person nos comités técnicos da EURAMET TC-EM (Eletricidade e Magnetismo), EURAMET TC-AUV (Acústica, Ultrassons e Vibração), na comissão técnica da RELACRE CTR04-Metrologia (coordenador do subgrupo de eletricidade) e na CT de Normalização 28-SC4-Vibrações e Choques.