

A nova definição do kelvin e implicações na sua *mise-en-pratique*

Eduarda Filipe

SPMet – Sociedade Portuguesa de Metrologia, Est. do Paço do Lumiar, Campus do Lumiar, Edifício D, 1º andar, 1649-038 Lisboa.

e-mail: ecrfilipe@gmail.com, web: <http://www.spmet.pt>

Resumo

A revisão do Sistema Internacional de Unidades (SI) entrou em vigor muito recentemente a 20 de maio de 2019, após aprovação pela 26.^a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) da Convenção do Metro a 16 de novembro de 2018. As sete unidades de base do SI têm agora novas definições, redigidas usando uma formulação designada “de constante explícita”, onde a unidade é definida indiretamente dando explicitamente um valor exato a uma constante fundamental reconhecida. O kelvin passou a ser definido através da constante de Boltzmann que passou a ser uma constante exata. Neste texto, são referidas também as implicações desta revisão do SI na disseminação desta unidade.

1. Introdução

A revisão do Sistema Internacional de Unidades (SI) [1] entrou em vigor muito recentemente, a 20 de maio de 2019, após aprovação pela 26.^a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) da Convenção do Metro a 16 de novembro de 2018. As sete unidades de base do SI têm agora novas definições, redigidas usando uma formulação designada “de constante explícita”, onde a unidade é definida indiretamente dando explicitamente um valor exato a uma constante fundamental reconhecida.

O SI foi formalmente adotado em 1960 pela 11.^a CGPM, com o objetivo de se obter um sistema de unidades, que respondesse às necessidades do séc. XX. O SI definiu, na altura, seis unidades de base, o metro, o quilograma, o segundo, o ampere, o kelvin e a candela para, respetivamente, as grandezas comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica e intensidade luminosa (fig. 1). Em 1971, seria adicionada a unidade de base da quantidade de matéria, a mole, passando o SI a conter sete unidades de base. O SI foi adotado posteriormente em Portugal, em 1983, como o Sistema Legal de unidades de medida.



Fig. 1 - Diagrama do novo SI [BIPM].

O SI, com quase sessenta anos, tem evoluído de um sistema baseado em artefactos para um sistema baseado em constantes fundamentais e processos atômicos. Esta revisão alterou essencialmente as definições das unidades¹ das grandezas massa, corrente elétrica, temperatura termodinâmica e quantidade de matéria tendo sido atribuídos valores para as constantes, agora exatas, de Planck (h), de carga elementar (e), de Boltzmann (k) e de Avogadro (N_A).

Até agora, as unidades eram definidas em termos do valor de uma grandeza escolhida como referência – definições de “unidade explícita”. Apesar de equivalentes, foi considerado serem as definições de constante explícita mais simples, pois ao tornar exatas as constantes fundamentais (sem incerteza), separa a definição da realização das unidades (com incerteza). Nesta revisão, deixou de ser necessária a separação entre as unidades de base e as unidades derivadas, pois estas passam também a ser realizadas a partir das definições, mas foi considerado sensato manter a divisão tradicional, não só por ser útil e bem estabelecido historicamente, como por ser necessário manter a consistência com o Sistema Internacional das grandezas (ISQ) definido pelas normas da série ISO/IEC 80000 e pelo Vocabulário Internacional de Metrologia [2].

Para a realização das unidades são agora utilizados métodos primários, ou seja, diretamente a partir das leis da física. Um método primário caracteriza-se também por permitir que uma grandeza seja medida numa determinada unidade, diretamente da sua definição, utilizando apenas grandezas e constantes que não contêm essa unidade. Esta situação permite assim utilizar outras equações da física.

¹ As outras unidades já tinham definições baseadas em constantes fundamentais e/ou processos atômicos.

O novo SI altera também a ordem das dimensões das grandezas derivadas, seguindo a ordem das grandezas de base (também alterada), onde a grandeza tempo aparece em primeiro lugar (no SI anterior a ordem das grandezas seguia uma ordem histórica).

A dimensão de qualquer grandeza Q passará a ser escrita na forma do produto dimensional:

$$\dim Q = T^\alpha L^\beta M^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta \quad (1)$$

onde os expoentes dimensionais são inteiros positivos, negativos ou nulos.

Os valores das constantes fundamentais estão publicados no CODATA - *Committee on Data for Science and Technology*².

1.1 A unidade de temperatura termodinâmica – o kelvin

A temperatura é uma das grandezas mais difundidas no dia-a-dia e a sua medição é efetuada na maior parte dos processos industriais, em muitas experiências laboratoriais e científicas, na climatologia entre outros processos. A unidade de base da temperatura termodinâmica, o kelvin, de símbolo K, foi introduzida em 1954 pela 10.^a CGPM e definida a partir duma propriedade intrínseca da matéria, a temperatura do ponto triplo da água – ponto único onde a água coexiste em equilíbrio nos estados líquido, gasoso e sólido, como sendo exatamente igual a 273,16 K.

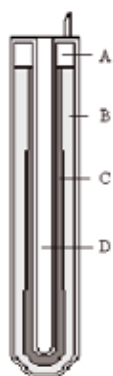


Fig. 2 - Célula do ponto triplo da água.
A - Vapor de água; B - Água no estado líquido; C - "Manto" de gelo em torno do poço D - onde se introduz o termómetro de resistência de platina

–“o kelvin, unidade de temperatura termodinâmica (T), é a fração $1 / 273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água”.

Por razões de natureza histórica, ligadas à maneira como as escalas de temperatura tinham sido anteriormente definidas, é corrente exprimir uma temperatura, pela diferença entre esta temperatura e a do estado equilíbrio térmico inferior em 0,01 K (ponto de gelo) do ponto triplo da água (T_{PTW}). Uma temperatura termodinâmica T , expressa desta maneira é designada por temperatura Celsius, de símbolo t , definida por:

$$t / ^\circ\text{C} = T / \text{K} - 273,15 \quad (2)$$

A unidade (derivada) de temperatura Celsius é o grau Celsius, de símbolo $^\circ\text{C}$, que por definição é igual ao kelvin.

O kelvin e o grau Celsius são também as unidades da Escala internacional de temperatura de 1990 (EIT-90) adotada pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) em 1990. De salientar que a EIT-90 define as grandezas T_{90} e t_{90} que são boas aproximações das temperaturas termodinâmicas correspondentes T e t [3].

A implementação desta definição foi baseada no arte-

facto da fig. 2. A sua realização e especificações foram evoluindo ao longo do tempo. Por exemplo a especificação relativa à composição isotópica da água é, desde 2005, baseada na água com a composição da V-SMOW³.

A CGPM propôs no início deste século definir o kelvin através da constante de Boltzmann, de símbolo k que é uma constante de proporcionalidade entre as grandezas temperatura e energia.

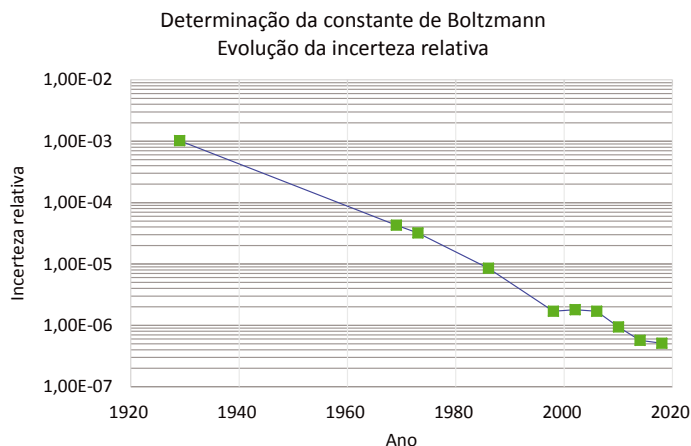


Fig. 3 - Evolução da incerteza relativa na determinação da constante de Boltzmann até 2017. Gráfico realizado a partir de dados históricos.

Para determinar o valor da constante de Boltzmann (k), foram realizadas várias experiências em Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) de todo o mundo onde se destaca o LNM francês⁴ onde o valor obtido para o k contribuiu com 55 % para o valor final da constante (na média ponderada de todos os valores obtidos pelos vários LNM do mundo envolvidos nesta medição e aceites pelo CODATA (fig. 3). Este laboratório propôs e construiu um dispositivo original chamado termómetro acústico quase-esférico, com o princípio de medir a velocidade do som num gás colocado numa câmara quase-esférica (fig. 4) à temperatura do ponto triplo da água.

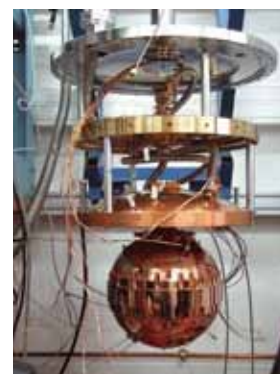


Fig. 4 - Termómetro acústico LNE-CNAM/LCM utilizado para determinar o valor da constante de Boltzmann, k [Laboratoire National d'Essais, <https://www.lne.fr/en/learn-more/international-system-units/kelvin>]

O kelvin foi, como já referido, redefinido nesta revisão do SI para: “O kelvin, de símbolo K, é a unidade da temperatura termodinâmica do SI. O seu valor é definido fixando o valor numérico da constante de Boltzmann k em exatamente $1,380\,649 \times 10^{-23}$ quando expresso em $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$, que é igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, o quilograma, o metro e o segundo são definidos em função de h , c e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (fig. 5).

² Organização que avalia e compila dados essenciais à ciência e à tecnologia e recomenda os valores das constantes físicas fundamentais. Estes valores são publicados no sítio internet do NIST (National Institute of Standards Technology, EUA) - *Reference on Constants, Units, and Uncertainty*.

³ V-SMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water

⁴ Laboratoire commun de métrologie du Laboratoire National d'Essais (LNE-CNAM/LCM)

Onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ é a frequência de césio correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental não perturbado do átomo de ^{133}Cs .”



Fig. 5 - Diagrama do novo SI para a grandeza temperatura termodinâmica [BIPM].

Esta definição implica a relação exata $k = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$. O kelvin é agora definido em função da unidade de energia derivada do SI, o joule. Assim, um kelvin é igual à variação da temperatura termodinâmica T resultante de uma variação da energia térmica $k\cdot T$ de $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}$.

De referir que esta redefinição permitirá, em princípio, realizações primárias do kelvin em qualquer ponto da escala de temperatura.

2. A mise-en-pratique para a realização do kelvin (MeP-K)

O Anexo 2 da nova monografia do SI publicado pelo BIPM em 20 de maio de 2019 [3] contém as *mises-en-pratique* das diferentes unidades de base. A *mise-en-pratique* para o kelvin (MeP-K) foi preparada pelo Comité Consultivo de Termometria (CCT) do CIPM. O termo “realizar uma unidade” significa em estabelecer o valor e a incerteza associada de uma grandeza do mesmo tipo que a unidade de um modo consistente com a definição da unidade. A realização prática da nova definição do kelvin não implica uma experiência particular e qualquer método capaz obter um valor de temperatura rastreável ao conjunto de sete constantes de referência pode, em princípio, ser utilizado. Este anexo apresenta alguns desses métodos que se considera serem mais fáceis de implementar e/ou que fornecem as menores incertezas e que são reconhecidos como métodos primários.

O valor de k adotado para a nova definição é o valor da CODATA 2017. Isto garante que a melhor estimativa do valor de T_{TPW} permaneça a 273,16 K.

Uma das consequências da redefinição do kelvin é a transferência da incerteza relativa na determinação da constante de Boltzmann k , com o valor de $3,7 \times 10^{-7}$, para a temperatura do ponto triplo da água. A incerteza padrão de T_{TPW} é, portanto, agora $u(T_{\text{TPW}}) = 0,1 \text{ mK}$.

O CCT refere ainda que não tem conhecimento de nenhuma tecnologia de termometria que ofereça um valor significativamente reduzido para a incerteza $u(T_{\text{TPW}})$. Assim, é improvável que o valor de T_{TPW} seja modificado num futuro próximo. A reprodutibilidade de T_{TPW} realizada em diferentes células do ponto triplo de água com a aplicação das correções isotópicas definidas, é melhor que $50 \mu\text{K}$. As experiências que requeiram elevada exatidão ou uma exatidão perto da T_{TPW} continuarão a depender da reprodutibilidade do ponto triplo da água. Embora o valor T_{TPW} não seja uma constante fundamental, o ponto triplo da água é um invariante da natureza com a estabilidade inerente a longo prazo das constantes fundamentais.

Medições diretas da temperatura termodinâmica requerem um termómetro primário baseado num sistema físico bem compreendido cuja temperatura pode ser derivada de medições de outras grandezas. Infelizmente, a termometria primária é geralmente complicada e demorada, e é, portanto, raramente utilizada como

um meio prático para disseminar o kelvin. Como uma alternativa, as Escalas de Temperatura em vigor fornecem procedimentos internacionalmente aceites para realizar e disseminar a temperatura de uma maneira direta e reprodutível, como a EIT-90 e a Escala Provisória para as Baixas Temperaturas de 2000 (EPBT-2000) para $T < 1 \text{ K}$.

2.1 Conceitos relacionados com os métodos de realização do kelvin

O MeP-K define os seguintes conceitos: termometria primária e escalas de temperatura, do seguinte modo:

1 - Termometria primária: quando é realizada utilizando um termómetro baseado num sistema físico bem conhecido, para o qual a equação de estado descrevendo a relação entre a temperatura termodinâmica T e outras grandezas independentes, como a lei dos gases perfeitos ou a lei de Planck, podem ser expressas explicitamente sem constantes desconhecidas ou significativamente dependentes da temperatura. A temperatura termodinâmica pode ser obtida medindo as grandezas independentes.

1.1 - A termometria primária absoluta permite medir a temperatura termodinâmica diretamente em função da definição da unidade de base, o kelvin, ou seja, o valor numérico definido para a constante de Boltzmann;

1.2 - A termometria primária relativa permite medir indiretamente a temperatura termodinâmica usando uma equação de estado especificada, com um ou mais parâmetros-chave determinados a partir de pontos fixos de temperatura, cujos valores para a temperatura termodinâmica T e suas incertezas são conhecidos a priori pela termometria primária absoluta ou relativa anterior.

2 - Escalas definidas de temperatura - permitem atribuir valores de temperatura, determinados por termometria primária, a uma série de estados de ocorrência natural e altamente reprodutíveis (por exemplo, a congelação e pontos triplos de substâncias puras). Também cobrem as especificações dos instrumentos de interpolação ou extrapolação para intervalos de temperatura especificados e definem as equações de interpolação ou extrapolação necessárias. As escalas definidas são altamente prescritivas e definem as temperaturas da escala T_{XX} que fornecem aproximações próximas da temperatura termodinâmica T e têm a mesma unidade que T , ou seja, o kelvin. Os valores de temperatura atribuídos aos pontos fixos de cada escala são considerados exatos e não são alterados enquanto a escala estiver em vigor.

2.2 Realização prática do kelvin por termometria primária

Embora a redefinição de 2018 do kelvin em função da constante de Boltzmann não tenha impacto imediato na EIT-90 e na EPBT-2000, esta redefinição apresenta benefícios significativos nas medições de temperatura inferiores a 20 K e superiores a 1300 K, onde os termómetros primários apresentam uma incerteza menor que os utilizados na EIT-90 e EPBT-2000. Com a evolução previsível dos métodos primários, os termómetros primários gradualmente substituirão as escalas referidas.

Os principais métodos de termometria primária cumprem os seguintes critérios:

- O cálculo das incertezas foi avaliado e aprovado pelo CCT;
- A incerteza da realização do kelvin não é mais do que uma ordem de magnitude maior do que a incerteza do estado da arte alcançada com a termometria primária ou escalas de temperatura definidas;
- Existem pelo menos duas realizações independentes aplicando o método com a incerteza necessária;
- Foi já realizada uma comparação com os resultados dos métodos;
- Os métodos são aplicáveis a intervalos de temperatura aceitáveis para a metrologia, ciência ou indústria;
- A técnica experimental necessária para aplicar os métodos é documentada em literatura aberta, para que os especialistas em metrologia possam realizar de um modo independente.

O *MeP-K* descreve os métodos de termometria primária que foram utilizados nomeadamente na medição da constante de Boltzmann, como o da termometria absoluta acústica a gás (AGT) que explora a relação entre a velocidade num gás ideal e a temperatura termodinâmica T do gás, como é o caso do termómetro acústico quase-esférico referido em 1.1 (ver fig. 4); a termometria relativa acústica a gás (AGT relativo) que determina os *ratios* de temperaturas termodinâmicas a partir de *ratios* de velocidades de som. O AGT relativo foi utilizado num amplo intervalo de alguns kelvins até temperaturas superiores a 550 K.

Para temperaturas superiores a 1235 K, é utilizada a termometria radiométrica primária que utiliza a lei de Planck – equação que relaciona a luminância espectral de um corpo negro ideal com a temperatura termodinâmica T . Incertezas-padrão de 0,1 K para 2800 K são possíveis com a termometria radiométrica absoluta primária. Na termometria radiométrica relativa, são feitas medições em um ou mais corpos negros, pontos fixos com temperatura termodinâmica conhecida. Os Guias: *Absolute primary radiometric thermometry*; *Relative primary radiometric thermometry* e *Uncertainty estimation in primary radiometric temperature measurement* estão anexos ao *MeP-K*.

A *MeP-K* também descreve outros métodos primários como o *primary polarizing gas thermometry* (PGT), *Dielectric-constant gas thermometry* (DCGT) *Refractive-index gas thermometry* (RIGT) e *Johnson noise thermometry* (JNT).

2.3 Realização prática do kelvin aplicando as escalas de temperatura em vigor

A EIT-90, para temperaturas superiores a 0,65 K, e a EPBT-2000, para temperaturas entre 0,9 mK e 1 K, permanecerão em uso, pois, permitem “boas” aproximações, reprodutíveis e práticas à temperatura termodinâmica.

A EIT-90 estabelece valores numéricos a estados reprodutíveis de equilíbrio térmico - pontos fixos termométricos. Deve-se notar que os valores das temperaturas dos pontos fixos atribuídas na EIT90 são exatos em relação à respetiva temperatura da escala - não há incerteza atribuída,

e fixos pois o valor permanecerá inalterado durante toda a vida da escala. Em particular, entre -250 °C (ponto triplo do hidrogénio) e 960 °C (o ponto de congelação da prata), as medições de temperatura continuarão por enquanto a ser rastreáveis aos termómetros de resistência de platina calibrados de acordo com a EIT-90.

Para realizar as escalas EIT-90 e EPBT-2000, devem ser considerados os Guias e Suplementos das escalas [4, 5] e o Anexo Técnico da *MeP-K* [6] que fornecem e faz referência à informação necessária para realizar uma medição da temperatura, de acordo com o SI, no mais alto nível de exatidão.

Como consequência, a definição de o kelvin em função da constante de Boltzmann não tem efeito sobre os valores de temperatura ou das incertezas de realização das escalas internacionais de temperatura.

3. Sumário

Este artigo pretendeu fazer uma resenha de diferentes documentos publicados e relativos à redefinição do kelvin, alguns deles publicados recentemente a 20 de maio de 2019, no dia Mundial da Metrologia. Estes documentos estão disponíveis on-line no sítio *internet* do BIPM.

Referências

1. BIPM, The International System of Units (SI), 9ª ed., Sèvres, France, (2019) em <https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>;
2. Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012) (1ª edição luso-brasileira, autorizada pelo BIPM, da 3.ª edição internacional do VIM - International Vocabulary of Metrology - Basic and general concepts and associated terms - JCGM 200:2012), IPQ, Portugal, 2012, em: http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Documents/VIM_PQ_INM-TRO_2012.pdf;
3. BIPM, Estimates of the Differences between Thermodynamic Temperature and the ITS-90, Sèvres, France, (2010) em https://www.bipm.org/utls/common/pdf/ITS-90/Estimates_Differences_T-T90_2010.pdf
4. BIPM, Guide to the Realization of the ITS-90, Sèvres, France, (2018), <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guide-its90.htm>
5. BIPM, Supplementary Information for the Realization of the PLTS-2000, Sèvres, France, (2010) <https://www.bipm.org/utls/common/pdf/ITS-90/Guide-PLTS-2000.pdf>
6. BIPM, Appendix 2 of the SI Brochure - Mise en pratique for the definition of the kelvin in the SI, Sèvres, France, (2019) em <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-kelvin.pdf>



Eduarda Filipe, Engenheira Eletrotécnica pelo Instituto Superior Técnico (1974), Lisboa e Mestre em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (1997). Presidente do Conselho Diretivo da SPMet - Sociedade Portuguesa de Metrologia desde 2006 e foi, de 1999 e até à sua aposentação em 2015, Diretora do Laboratório Central de Metrologia e do Departamento de Metrologia do IPQ (Instituto Português da Qualidade). Membro do *Comité Français de la Métrologie*. Especialista em Metrologia pela Ordem dos Engenheiros.