



O novo Sistema Internacional de Unidades

Índice

1 Editorial

artigo geral

2 A redefinição do quilograma, passado presente e futuro

Pedro Conceição

artigo geral

7 A Intensidade Luminosa: da Vela à Candela

Luís Miguel Bernardo

artigo geral

13 A Redefinição do Ampere e consequências imediatas

Luís Ribeiro

artigo geral

18 Moles de moléculas

Maria Filomena Camões

inovação

24 Fusão Nuclear: Em que estado estamos

António João Caeiro Heitor Coelho

crónicas

28 1919-2019: um século de Lentes Gravitacionais

Carlos Herdeiro

sala de professores

30 Será que as Aprendizagens Essenciais podem contribuir para a melhoria da qualidade das aprendizagens dos alunos?

Carlos Portela

vamos experimentar

33 Qual voa mais tempo?

Constança Providência

36 Notícias

CRÉDITOS

Capa: Padrão Nacional da Massa. Cópia N.º 69 do Protótipo Internacional.

Imagem: IPQ

Há cerca de cem anos, em 1900, num artigo publicado nos *Annalen der Physik*, sobre transições radiativas irreversíveis, a dada altura, referindo-se à equação da entropia de um oscilador, Planck escreveu "...é interessante notar que com a ajuda de duas constantes a e b, é possível estabelecer unidades de comprimento, massa, tempo e temperatura, que, independentemente de corpos específicos ou de substâncias concretas, mantêm a sua validade para todos os tempos e culturas, mesmo para culturas não-terrestres e não-humanas, e que, portanto, podem ser chamadas de unidades de medida naturais ...". No entanto, até recentemente, parte das unidades fundamentais definidas no Sistema Internacional de Unidades estavam ainda suportadas em objetos materiais. Refira-se, em particular, o quilograma que estava baseado num protótipo cilíndrico constituído por uma liga de platina, colocado permanentemente na sede do Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM), em Sèvres, perto de Paris.

O Bureau Internacional dos Pesos e Medidas, responsável pela manutenção do Sistema Internacional de Unidades (SI), foi criado em 20 de maio de 1875 por um tratado diplomático, denominado Convenção do Metro, com representantes de dezassete países, entre os quais Portugal. O sistema SI foi consagrado na sua 11.ª Conferência Geral dos Pesos e Medidas, em 1960, tendo sido adotado em Portugal em 1983. Atualmente, a Convenção do Metro tem 59 países membros e 41 associados, permitindo que o sistema SI seja veículo de comunicação e de transmissão de conhecimento científico a todos os cantos do planeta. O Sistema Internacional de Unidades não é estático. Ele tem sido várias vezes revisto no sentido de o tornar cada vez menos dependente de objetos materiais. É nesse contexto que, em novembro de 2018, ocorreu em Versalhes a 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas. Nela, o quilograma, o ampere, o kelvin e a mole foram redefinidos em função de novos valores

exatos para a constante de Planck, carga elementar, constante de Boltzmann e constante de Avogadro, respetivamente. Foi também decidido manter as definições do metro, do segundo e da candela, uma vez que já se encontram baseadas em constantes cujos valores são considerados fixos. Assim, os valores de todas estas grandezas deixam de ter barras de erro associadas e as respetivas incertezas passam a constar nos resultados de medição de outras que sejam delas derivadas. Por exemplo, a constante de Planck passa a ser considerada exata e a barra de erro anteriormente associada a ela aparece agora na incerteza do quilograma, que anteriormente era considerado fixo. Atendendo a que estas alterações irão entrar em efeito a partir do próximo dia 20 de maio, dia Mundial da Metrologia, a Gazeta inicia nesta edição, a publicação de uma sequência de artigos dedicados ao Sistema Internacional de Unidades. Neste número são já discutidos o quilograma, o ampere, a candela e a mol. Nas próximas edições serão apresentados o kelvin, o segundo e o metro, que formam as restantes unidades de base.

Um século passou desde a ideia fundadora apresentada por Planck. Ao longo dele muitas descobertas científicas e inovações tecnológicas foram desenvolvidas, implicando medidas cada vez mais precisas e a necessidade de colocar de forma mais rigorosa as unidades para as descrever. Atualmente, a exploração de escalas ou dimensões cada vez mais pequenas, como em nanotecnologia ou na deteção de ondas gravitacionais, ou de tamanhos muito grandes, como do buraco negro fotografado recentemente, exigem níveis de precisão ainda mais elevados. A entrada em funcionamento do novo Sistema Internacional de Unidades permite, assim, apoiar a descrição rigorosa destes fenómenos e a sua comunicação e disseminação entre todos. Cumprindo a ideia visionária de Planck, ele ajuda-nos estar preparados para os novos desafios a enfrentar.

Boas leituras



Ficha Técnica

Estatuto Editorial

<http://www.spf.pt/gazeta/editorial>

Propriedade | Sede | Redacção

Sociedade Portuguesa de Física
Av. da República, 45 - 3º Esq.
1050-187 Lisboa
Telefone: 217 993 665

Director

Bernardo Almeida

Editores

Filipe Moura
Francisco Macedo
Nuno Peres
Olivier Pellegrino

Secretariado

Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

Comissão Editorial

Conceição Abreu - Presidente da SPF
Gonçalo Figueira - Anterior Diretor Editorial
Teresa Peña - Anterior Diretor Editorial
Carlos Fiolhais - Anterior Diretor Editorial
Ana Luísa Silva - Física Atómica e Molecular
Ana Rita Figueira - Física Médica
Augusto Fitas - Grupo História da Física
Carlos Portela - Educação
Carlos Silva - Física dos Plasmas
Constança Providência - Física Nuclear
Joaquim Moreira - Física da Matéria Condensada
José Marques - Física Atómica e Molecular
Luís Matias - Geofísica, Oceanografia e Meteorologia
Manuel Marques - Óptica e Laser, Universidade do Nuno Castro - Física Partículas
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica
Sofia Andringa - Física Partículas

Correspondentes

André Pereira - Delegação Norte
Fernando Amaro - Delegação Centro
José Marques - Delegação Sul e Ilhas

Design / Produção Gráfica

Fid'algo - Print Graphic Design Lda.
Rua da Nau Catrineta, nº 14, 2º Dto. | 1990-186 Lisboa

NIPC 501094628

Registo ICS 110856

ISSN 0396-3561

Depósito Legal 51419/91

Tiragem 1 000 Ex.

Publicação Trimestral

As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Preço N.º Avulso 5,00€ (inclui I.V.A.)

Assinatura Anual 15,00€ (inclui I.V.A.)

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

A redefinição do quilograma, passado presente e futuro

Pedro Conceição¹

¹ Bureau International des Poids et Mesures
pedro.conceicao@bipm.org

Resumo

Em 2018, a definição do quilograma no sistema internacional de unidades (SI) foi revista e, em 2019, a unidade de massa vai ser definida em função de uma constante universal, a constante de Planck. A presente definição, adoptada em 1889, define o quilograma a partir da massa de um artefacto, a massa do protótipo internacional do quilograma (IPK), medida imediatamente após a sua limpeza e lavagem, que se encontra num cofre no laboratório de Massa do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM). É a única unidade que ainda se encontra definida por um objecto, contrariando a base filosófica que foi pensada aquando da criação do SI, de construir um sistema universal de unidades imutáveis e reproduzíveis em qualquer parte do Mundo. Duas realizações experimentais foram seleccionadas para redefinir o quilograma em função da constante de Planck: balança do watt (ou balança de Kibble) e medições da densidade cristalina por intermédio de raios X (*x-ray crystal density* - XRCd). O sucesso da redefinição só foi possível quando ambas as experiências apresentaram consistência entre os resultados, com incertezas compatíveis com os requisitos propostos pelo Comité Consultivo para a Massa e Grandezas Derivadas. A nova redefinição irá alterar profundamente a estrutura do SI e, com ela, novos desafios se levantam. Este artigo descreve resumidamente os passos dados até à nova definição, o seu impacto na comunidade metrológica científica e desafios futuros que podemos esperar.

1. Introdução

Durante cerca de 130 anos, a definição do quilograma esteve ligada a um artefacto, correspondendo ao valor da massa do protótipo internacional do quilograma (IPK), e assim continuará até maio de 2019. Embora esta definição tenha servido os interesses da comunidade científica durante mais de um século, tornou-se imperativo uma mudança para acompanhar o progresso científico cada vez menos tolerável a uma definição, ainda que exata em termos conceptuais, pouco credível em termos de definição universal não imutável.

Os esforços para alterar esta definição iniciaram-se há cerca de 40 anos e intensificaram-se nestas duas últimas décadas. Com efeito, estima-se que o valor da massa do IPK terá sofrido perdas desde a sua criação [1]: os resultados de comparações realizadas entre as cópias oficiais depositadas em Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) e o protótipo internacional do quilograma demonstraram divergências ao longo do tempo, em cerca de 35 μg [1] desde a sua primeira calibração há mais de 100 anos atrás... e, independentemente dessas perdas, a definição do quilograma continuou a ser exactamente a mesma. Qualquer alteração que ocorresse no IPK implicaria sempre um reajustamento de todas as medições de que dependem do seu valor.

Outro problema da actual definição é a sua realização ser possível apenas num local, i.e. no BIPM, onde se encontra armazenado o IPK: isso choca com a ideia base do SI de construir um sistema universal de unidades cujas definições sejam possíveis de serem reproduzidas em qualquer parte do Mundo.

Agora, ao fim de mais de um século, em maio de 2019, tudo irá mudar e o quilograma passará a ser definido em função de uma constante universal.

Assim, de acordo com o anexo 3 da resolução 1 da 26.ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) de 2018 [2], o quilograma define-se por:

« O quilograma, símbolo kg, é a unidade SI da massa. É definido fixando o valor numérico da constante de Planck h em $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$, quando expressa em unidades J s, que é igual a $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, com o metro e o segundo definidos em função de c (velocidade da luz) e $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ (frequência de transição hiperfina do cézio) ».

Na prática, a CGPM fixou, em novembro de 2018, o valor da constante de Planck, o quantum de energia, em $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s, este valor não devendo sofrer mais alterações no futuro.

O quilograma ficará então definido em função de

uma constante universal, a constante de Planck. Porque definir o quilograma em função da constante de Planck?

Em termos conceptuais, a constante de Avogrado seria uma candidata perfeita. A definição do quilograma poderia ser feita simplesmente tendo por base um determinado número de átomos de carbono 12.

Existem porém varias razões para optarmos por uma via menos intuitiva e preferir a constante de Planck [3]:

- a revisão do SI não implicará apenas a redefinição do quilograma, o ampere será redefinido fixando o valor da carga elementar e . Deste modo, ambos os valores de h e e serão valores exatos finais e, por consequência, a constante de von Klitzing ($R_K = \frac{h}{e^2}$) e a constante de Josephson ($K_J = \frac{2e}{h}$), usadas para a medição de grandezas elétricas de alta exatidão, terão também valores exatos;

- ao fixarmos a constante de Planck para a definição do quilograma, permitimos que o número de Avogrado seja fixado livremente para a definição da mole, tal como proposto no novo SI;

- do ponto de vista da Física, a constante de Planck conceptualmente tem um papel mais importante e central que o número de Avogrado. É uma constante fundamental da mecânica quântica e existe por isso um grande interesse em fixar o respetivo valor, tal como se fez por exemplo com a velocidade da luz na redefinição do metro.

2. Redefinição do quilograma

O mapa de trabalho para a redefinição do quilograma foi estabelecido em 2013 em conjunto pelo Comité Consultivo da Massa e grandezas derivadas (CCM) e o Comité Consultivo das Unidades (CCU).

O CCM estabeleceu quatro condições para se estabelecer a redefinição [4]:

- 1 – A existência de três medições independentes da constante de Planck realizadas por dois métodos diferentes com incertezas-padrão relativas menores que 5 partes por 10^8 ;

- 2 – Pelo menos, uma das medições deveria ter uma incerteza-padrão relativa de 2 partes por 10^8 ;

- 3 – A obrigatoriedade de todos os padrões utilizados nas experiências estarem diretamente rastreados à mesma referência;

- 4 – Os participantes da validação da realização prática do quilograma no novo SI assumem um mesmo valor para a constante de Planck e determinam a massa de um conjunto de padrões circulantes que serão enviados para o BIPM que funcionará como laboratório piloto e cujos valores serão comparados.

Dois métodos foram seleccionados para as realizações das medições: o método para determinação das estruturas cristalinas por raios X (ou *x-ray-crystal-density*, XRCD) e a utilização de uma balança do watt (ou *Kibble balance*, em homenagem ao inventor da balança, Bryan Kibble).

2.1 Método para determinação de estruturas cristalinas por difração de raios-X

O método XRCD [5] foi utilizado até então para a determinação do número de Avogrado através da contagem do número de átomos num cristal enriquecido de silício ^{28}Si [5]. Seria portanto possível utiliza-lo para a determinação da massa de uma esfera de Si com o valor de 1 kg. O valor da constante de Planck obtém-se através da seguinte relação [5]:

$$N_A = \frac{M(X)}{m(X)} = \frac{M_u A_r(X)}{h} \left(\frac{h}{m(X)} \right)$$

Em que $M(X)$ e $A_r(X)$ representam a massa molar e a massa atômica relativa do átomo X, $M_u = 0,001 \text{ kg mol}^{-1}$, a constante da massa molar, e $m(X)$ a massa do átomo X.

Apesar de a realização da unidade pela contagem de átomos numa esfera de silício em termos conceptuais ser mais intuitiva e direta, o processo de fabricação de uma esfera de silício exige varias estruturas de apoio ao seu fabrico, tornando-se num método bastante exigente em termos de recursos necessários para a sua realização.

2.2 Balança do watt

A balança do watt [6] foi inventada no *National Physical Laboratory* (NPL), o LNM do Reino Unido, em 1975 por Bryan Kibble. A sua utilização permite relacionar grandezas mecânicas com grandezas elétricas.

Essa relação é obtida graças a uma bobina elétrica suspenso num braço da balança quando submetida a um campo magnético de alta intensidade.

As medições são feitas em dois modos de funcionamento [6]: o modo de pesagem e modo de movimento.

No modo de pesagem, o peso Mg de uma massa M é contrabalançado por uma força vertical gerada por uma corrente elétrica I que percorre uma bobina de comprimento l num meio sob a ação de campo magnético B .

Ao atingir-se o equilíbrio, obtém-se [6]:

$$Mg = B l I$$

No modo de movimento, a massa é removida e a bobina é movimentada no mesmo campo magnético com uma velocidade v , induzindo uma tensão elétrica na bobina igual a $U = B l v$.

Assumindo que o produto $U I$ é constante, obtém-se a relação entre grandezas mecânicas e elétricas [6]:

$$U I = M g v$$

De referir que a balança do watt não faz uma conversão direta entre energia elétrica e energia mecânica. Existem sempre processos dissipativos (fricção, etc.) durante uma

medição.

A medição da tensão elétrica e da resistência elétrica percorrida pela corrente elétrica é feita por intermédio do efeito Josephson e efeito Hall quântico e, através destes, é possível relacionar a constante de Planck com a massa utilizada no modo de pesagem.

2.3 Resultados de ambas as realizações experimentais

Os resultados publicados das diferentes realizações experimentais para a determinação dos valores da constante de Planck e da constante de Avogadro encontram-se descritos na Figura 1 [4].

A menor incerteza foi obtida pelo *National Research Council of Canada* (NRC), o LNM do Canadá, com 18 partes em 10^9 .

Em comparação, resultados recentes relativos ao projeto Avogadro apresentam uma incerteza de 20 partes em 10^9 , e o valor publicado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), o LNM dos Estados Unidos da América, possui uma incerteza da ordem de 34 partes em 10^9 [4].

As linhas verticais a cinzento correspondem aos valores recomendados presentemente pelo grupo de trabalho das constantes fundamentais do *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA).

Os valores obtidos estão em concordância, dentro do que foi exigido pelo CCM e a primeira e segunda condição foram satisfeitas.

A terceira condição foi satisfeita através das chamadas ‘calibrações extraordinárias’, tendo sido usado como referência padrão o IPK, que foi usado pela primeira vez, nos últimos 22 anos.

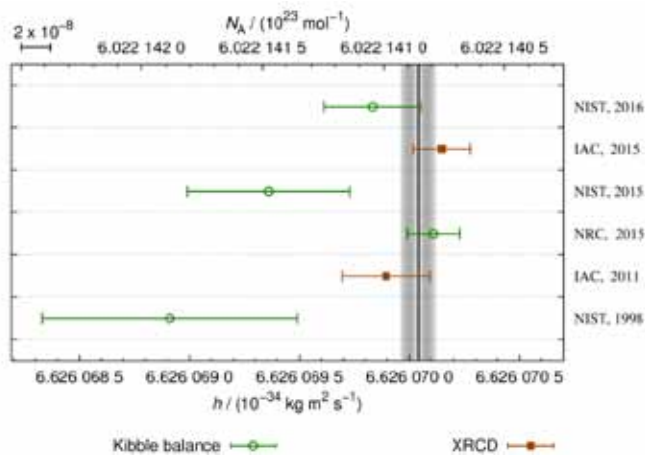


Fig. 1 - Determinação da constante de Planck e da constante de Avogadro e respectivas incertezas [4]

Foram calibradas as cópias oficiais do BIPM e de diversos protótipos internacionais do quilograma, que foram usados mais tarde nas diferentes medições.

A quarta e última condição foi obtida através de um estudo piloto, coordenado pelo BIPM, em que todos os participantes assumiram um mesmo valor para a cons-

tante de Planck e usaram-no para a realização do quilograma, transferido para um conjunto de padrões de massa que circularam entre os diversos participantes.

Os resultados foram bastante satisfatórios, tendo sido demonstrada concordância entre os resultados para 4 dos 5 participantes [11].

3. Qual o impacto desta alteração no atual SI ?

Presentemente o SI é formado por 7 unidades de base: o metro, o segundo, o quilograma, o ampere, o kelvin, a mole e a candela. A redefinição do quilograma irá alterar profundamente a estrutura do SI e, a partir desse momento, todas as unidades de base passarão a estar definidas por uma constante. Para a sua realização prática, porém, no caso do quilograma, serão necessárias três constantes. Na tabela 1, podemos ver a nova estrutura do SI tendo por base as definições das unidades de base:

Constantes (1)	k	N_A	e	K_{cd}	$\Delta\nu_{Cs}$	c	h
Unidades base (2)	K	mol	A	cd	s	m	kg

Tabela 1 - Nova estrutura do SI: dependência das unidades de base de constantes fundamentais. (1) Constantes usadas para a realização das unidades: constante de Boltzmann, constante de Avogadro, carga elementar, eficácia luminosa, frequência hiperfina de transição do célio, velocidade da luz no vácuo, constante de Planck (da esquerda para a direita); (2) Unidades de base: kelvin, mole, ampere, candela, segundo, metro e quilograma.

O que irá mudar em termos de rastreabilidade à unidade da massa, o quilograma?

Antes da redefinição, esta unidade era dada unicamente pelo BIPM, através do protótipo internacional (IPK), segundo a figura 2:

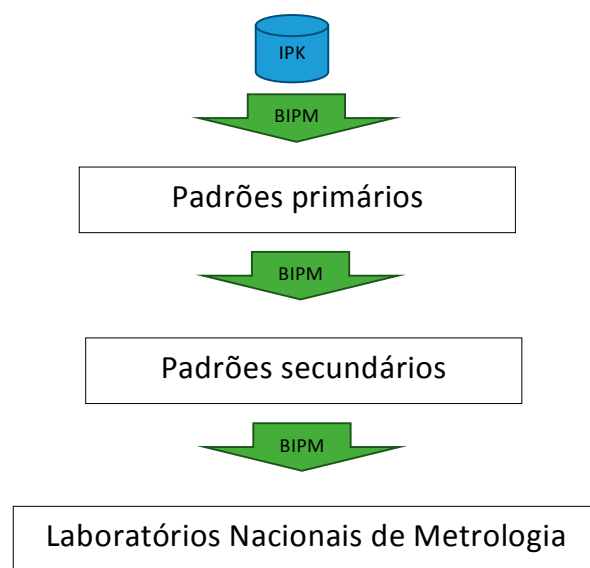


Fig. 2 - Determinação do valor da unidade quilograma nos Laboratórios Nacionais de Metrologia, até 20 de maio de 2019

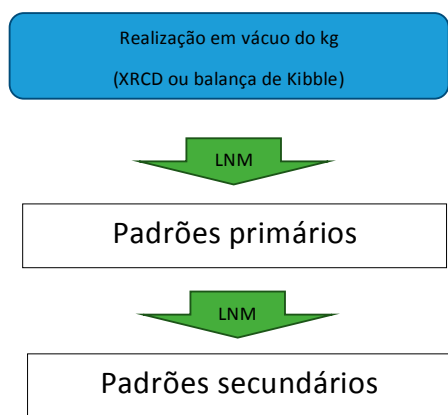


Fig. 3 - Determinação do valor da unidade quilograma nos Laboratórios Nacionais de Metrologia, após 20 de maio de 2019

Apos a redefinição, a rastreabilidade à unidade o quilograma poderá ser em teoria dada por qualquer Laboratório Nacional de Metrologia que tenha meios para realizar a redefinição [7] segundo apresentado na Figura 3.

Mas tal configuração não acontecerá no imediato. Existirá primeiro um período de transição [8] em que o BIPM irá organizar uma comparação internacional entre diversas realizações primárias para ser determinado um valor consensual para o quilograma.

Um Laboratório Nacional de Metrologia, que tenha capacidade para realizar a definição do quilograma e queira calibrar os seus padrões de massa usando unicamente os seus próprios meios, terá sempre de usar o valor determinado por esta comparação ('*consensus value*') na sua realização prática [8].

Os Laboratórios Nacionais de Metrologia, que não tenham capacidade para realizar a nova definição do quilograma, poderão ficar rastreados ao valor consensual através dos serviços de calibração disponíveis no BIPM.

Quando já não for necessária a utilização de um valor consensual, i.e. quando a dispersão de valores for compatível com a incerteza das realizações primárias, os laboratórios terão unicamente de participar regularmente em comparações laboratoriais periódicas para demonstrar as suas capacidades de medição, tal como é feito para as outras unidades [8].

Como as incertezas associadas a estas novas realizações do quilograma são maiores que as que estavam associadas à definição do quilograma através do IPK, as incertezas para o utilizador final serão também mais elevadas, mas não deverão comprometer a sua utilização, mesmo nas medições mais exigentes.

4. Futuro, novos desafios que a redefinição transporta

Presentemente, ainda não é possível garantir o

acesso contínuo a qualquer uma das realizações experimentais do quilograma. Para colmatar este problema, será necessário estabelecer e manter um conjunto de padrões de massa cuja rastreabilidade esteja ligada a umas realizações. Estes padrões deverão encontrar-se no BIPM, o que permitirá difundir a rastreabilidade pelos restantes Laboratórios Nacionais de Metrologia, tal como era feito aquando da anterior definição.

Ambos os métodos utilizados para a realização da unidade são executados em vácuo, um meio diferente do ar, onde se pretende realizar posteriormente a disseminação da unidade. A incerteza associada à transferência dos padrões entre o vácuo e o ar é de apenas algumas microgramas, mas tem sido observado que a transferência repetida entre estes dois meios pode afetar o valor da massa dos padrões envolvidos nos primeiros ciclos de transferência [9]. Os efeitos possíveis aquando da transferência ar-vácuo-ar terão de ser bem compreendidos e será certamente uma matéria de investigação contínua no futuro.

A preservação das massas de referência usadas na definição também é um assunto em discussão (em vácuo/ar e em que condições)[12].

A redefinição também abre novas portas e, pela primeira vez, será possível realizar a definição do quilograma para diferentes valores nominais diferentes de 1 kg usando diferentes tipos de balanças eletrostáticas [9] e, com isto, pela primeira vez, começa-se a vislumbrar a possibilidade de, no futuro, os padrões de massa atualmente utilizados nos laboratórios de metrologia deixarem de ser necessários para a disseminação da unidade.

Referências

- [1] Davis R, Barat P, Stock M, A brief history of the unit of mass: continuity of successive definitions of the kilogram Metrologia 53 (5) A12-A18 (2016)
- [2] <https://www.bipm.org/en/cgpm-2018/> consultado a 2019-03-18.
- [3] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J, Taylor B N, Williams E R, Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) Metrologia 43 (3) 227-246 (2006)
- [4] Bettin H, Schlamminger S, Realization, maintenance and dissemination of the kilogram in the revised SI Metrologia 53 (5) A1-A5 (2016)
- [5] Ujii K, Bettin H, Becker P, Massa E, Rienitz O, Pramann A, Nicolaus A, Kuramoto N, Busch I, Borys M, Realization of the kilogram by the XRCD method Metrologia 53 (5) A19-A45 (2016).
- [6] Robinson I A, Schlamminger S, The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass Metrologia 53 (5) A46-A74 (2016).
- [7] Richard P, Fang H, Davis R, Foundation for the redefinition of the kilogram Metrologia 53 (5) A6-A11 (2016)
- [8] Stock M, Davidson S, Fang H, Milton M, de Mirandés E, Richard P, Sutton C, Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition Metrologia 54 S99-S107 (2017).

- [9] Davidson S, Berry J, Abbott P, Marti K, Green R, Malengo A, Nielsen L, Air-vacuum transfer; establishing traceability to the new kilogram *Metrologia* 53 (5) A95-A113 (2016)
- [10] Shaw G A, Stirling J, Kramar J A, Moses A, Abbott P, Steiner R, Koffman A, Pratt J R, Kubarych Z J, Milligram mass metrology using an electrostatic force balance *Metrologia* 53 (5) A86-A94 (2016)
- [11] Stock M, Barat P, Pinot P, Beaudoux F, Espel P, Piquemal F, Thomas M, Ziane D, Abbott P, Haddad D, Kubarych Z, Pratt J R, Schlamminger S, Fujii K, Fujita K, Kuramoto N, Mizushima S, Zhang L, Davidson S, Green R G, Liard J, Sanchez C, Wood B, Bettin H, Borys M, Busch I, Hämpke M, Krumrey M, Nicolaus A, A comparison of future realizations of the kilogram *Metrologia* 55 (1) T1-T7 (2018).
- [12] Davidson S, Characterization of the long-term stability of mass standards stored in vacuum by weighing and surface analysis *Metrologia* 49 (3) 200-208 (2012)



José Pedro Conceição nasceu em Luanda em 1973. Licenciou-se em Engenharia Física na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Em 2001, trabalhou no detetor de partículas ATLAS da *European Organization for Nuclear Research (CERN)* em Genève, como Programador Científico. Em 2004, após uma breve passagem

pela empresa SIEMENS de Portugal no sector de programação e desenvolvimento no domínio das novas tecnologias, iniciou as suas funções no Laboratório de Massa do Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade como Técnico Superior. Em 2008, assume as funções de Responsável Técnico pelos domínios metrológicos da Massa e Massa Volúmica de Sólidos, tendo como uma das suas principais funções realizar a disseminação e dar rastreabilidade à unidade de massa a nível nacional, estando nomeado posteriormente como contact person no comité técnico da EURAMET TC-M (Massa). Em 2014/2015, trabalhou durante 15 meses no *National Physics Laboratory (NPL)*, em Teddington – Londres (Reino Unido), como investigador no âmbito do projeto europeu da EURAMET «Developing a practical means of disseminating the new kilogram», participando na criação e caracterização física de novos padrões de massa, no desenvolvimento de novos métodos de armazenamento, limpeza de padrões de massa e estudo dos efeitos da transferência de padrões de massa entre ar e vácuo, tendo em vista a redefinição do kilograma em 2019. Em 2016, acumulou funções como auditor técnico do IPAC para os domínios da Massa e Pressão. Desde novembro de 2018, trabalha como técnico principal no Laboratório de Massa no *Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)* em Sèvres - Paris, sendo atualmente o responsável pela calibração da massa e massa volúmica dos protótipos nacionais a nível internacional realizadas neste Laboratório, para além de apoiar e participar nas mais diversas áreas de investigação do BIPM.

A Intensidade Luminosa: da Vela à Candela

Luís Miguel Bernardo¹

¹ Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

Resumo

A intensidade luminosa é uma das mais relevantes grandezas físicas associadas à luz visto que quantifica o brilho de uma fonte luminosa. Neste artigo, apresenta-se a definição desta grandeza, os padrões e unidades que para ela se criaram e, finalmente, discute-se a candela, a unidade da intensidade luminosa do Sistema Internacional de Unidades (SI), cuja definição foi pela primeira vez estabelecida por convenção internacional, em 1948, e foi sendo melhorada ao longo dos últimos setenta anos.

1. Introdução

Quando se pretende medir uma determinada grandeza física, recorre-se a uma unidade, previamente estabelecida, que é muitas vezes definida por meio de um padrão. A estabilidade e a reprodutibilidade do padrão garantem a imutabilidade da unidade e consequentemente a precisão e a universalidade das medidas.

Entre as várias grandezas associadas à luz, encontram-se a *intensidade radiante* (I_e) e a *intensidade luminosa* (I_v). A primeira é uma grandeza radiométrica e define-se como a potência (ou o fluxo da energia) emitida, reflectida, transmitida ou recebida numa dada direcção por unidade de ângulo sólido, sendo expressa em unidades de $W\ sr^{-1}$ (watt por esterradiano). Como as grandezas associadas à luz são habitualmente dependentes do comprimento de onda (λ) (ou frequência), é necessário definir grandezas diferenciais que representem o valor daquelas grandezas para um dado comprimento de onda (ou frequência). A *intensidade radiante espectral* $I_e(\lambda)$ é definida como a derivada da intensidade radiante em ordem ao comprimento de onda (ou frequência) sendo expressa em unidades de $W\ sr^{-1}\ m^{-1}$ (ou $W\ sr^{-1}\ Hz^{-1}$). Pode calcular-se a intensidade radiante associada a uma fonte luminosa caracterizada por um determinado espectro, integrando a intensidade radiante espectral entre os limites do referido espectro $[\lambda_1, \lambda_2]$:

$$I_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_e(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

De forma semelhante, se pode definir a *intensidade luminosa espectral* $I_v(\lambda)$ e calcular a intensidade luminosa I_v :

$$I_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_v(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

A intensidade luminosa é uma grandeza fotométrica, dependente da sensibilidade do olho humano, exprime-se em unidades $lm\ sr^{-1}$ ou *candela* (cd) e define-se como a potência radiante numa dada direcção por unidade de ângulo sólido, depois de ser espectralmente modificada pela função *eficácia luminosa* $K(\lambda)$. Esta função representa a sensibilidade do olho humano e tem uma forma semelhante a uma função gaussiana com um máximo central. Noutras palavras, a intensidade luminosa é a potência da luz numa dada direcção por unidade de ângulo sólido, tal como é percebida por um olho humano “médio” (normalizado).

Assim, a intensidade luminosa espectral $I_v(\lambda)$ pode ser escrita em função da intensidade radiante espectral $I_e(\lambda)$ como:

$$I_v(\lambda) = K(\lambda) I_e(\lambda) = K_m V(\lambda) I_e(\lambda) \quad (3)$$

em que $K_m = K(\lambda_m)$ é o valor máximo de $K(\lambda)$ expresso em $lm\ W^{-1}$, de acordo com a unidade para exprimir $I_v(\lambda)$; $V(\lambda)$ é a *eficiência luminosa espectral*, sem dimensões, às vezes conhecida por *função de luminosidade* ou *curva de visibilidade*, e é igual a $V(\lambda) = K(\lambda) / K_m$ representada também por $\gamma(\lambda)$, que é a *função colorimétrica* do sistema de referência *colorimétrico* CIE 1931, em que CIE é a sigla da *Commission Internationale de l'Éclairage*.

Para que o valor da intensidade luminosa espectral $I_v(\lambda)$, correspondente a um dado comprimento de onda $\lambda \neq \lambda_m$, tenha o mesmo valor que $I_v(\lambda_m)$, então a intensidade radiante terá que ser maior, pois $V(\lambda) < V(\lambda_m)$. A intensidade luminosa de uma fonte policromática, caracterizada por um determinado espectro, calcula-se integrando a intensidade luminosa espectral na banda espectral da fonte $[\lambda_1, \lambda_2]$:

$$I_v = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_v(\lambda) d\lambda = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V(\lambda) \cdot I_e(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

A necessidade de estabelecer padrões e unidades para a intensidade luminosa surgiu quando se tornou indispensável regular a indústria das fontes de luz usadas para iluminação. Com o desenvolvimento da iluminação pública, sobretudo a partir do início do século XIX, surgiu a necessidade de comparar e normalizar as fontes luminosas e de estabelecer uma unidade fotométrica para a intensidade luminosa, baseada num padrão tão estável quanto pos-

sível, utilizando para isso as tecnologias disponíveis mais evoluídas. Numa primeira aproximação, pareceu natural recorrer à popular vela de cera como primeiro padrão e tomar o respetivo brilho como unidade de intensidade luminosa. Muitos dos padrões adoptados basearam-se em chamas de vários tipos de velas e manteve-se quase sempre a preocupação de ajustar, tanto quanto possível, a unidade dos outros padrões ao brilho da velha vela de cera, gordura ou parafina.

2. A História dos Padrões Luminosos

Vários foram os padrões luminosos propostos e adoptados desde o início do século XIX. Em França, utilizaram-se a *vela esteárica* que consumia 20 g de estearina por hora e a *lâmpada Carcel*, patenteada em 1800 por Bernard Guillaume Carcel (1750-1818), possuindo um mecanismo para a alimentação do óleo constituído por uma bomba controlada por um sistema de relojoaria [1]. Consumia numa hora 42 g de óleo de colza purificado, que embebia uma torcida que uma massa lineal de 0,36 g/cm e era composta de setenta e cinco fios [2]. Em 1860, esta lâmpada foi adoptada nos testes dos gases de iluminação de Paris depois de normalizadas as dimensões do queimador e da chaminé bem como as características da mecha [3]. Na Alemanha e Inglaterra, usou-se a *vela de espermacete* (*London standard spermaceti candle*) que foi estabelecida como padrão luminoso pelo *London Metropolitan Gas Act* de 1860; conhecida simplesmente por *vela inglesa*, tinha 22 mm de diâmetro, 76 g de massa e era feita de espermacete de baleia com cera de abelha em quantidade suficiente para evitar a cristalização; consumia o combustível à taxa de 120 grãos (7,776 g) por hora [4]. A estabilidade luminosa desta vela não era porém suficiente: as variações de luminosidade podiam atingir 30 %, dependendo das circunstâncias de utilização. Por sua vez, a *vela alemã*, ou *vela Kerzen* (Fig. 1), era uma vela de parafina, com temperatura de fusão de 55 °C, que tinha 20 mm

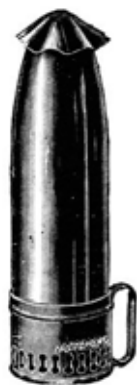


Fig. 1 - Vela Kerzen com base cilíndrica feita de folha de flandres pintada (*Einrichtungen und Apparate für den Physikalischen Unterricht*, 5.ª ed., E. Leybold's Nachfolger, Köln A. Rh., s/d [1905], p. 451).

de diâmetro e ardia com uma chama de 5 cm de altura. A sua estabilidade e reprodutibilidade luminosas eram igualmente muito limitadas. No Posto Fotométrico que existia no Laboratório de Química Municipal do Porto aberto ao público em 1884, o químico Ferreira da Silva usava para testar os sistemas de iluminação da cidade a lâmpada Carcel com as dimensões do bico e da chaminé que tinham sido recomendadas por Jean Baptiste Dumas (1800-1884) e Henri Victor

Regnault (1810-1878) (Fig. 2) e adoptadas em França [1] e noutros países que usavam esta lâmpada.

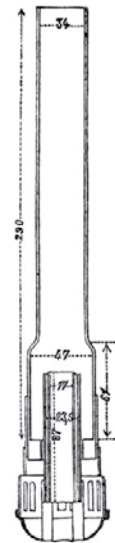


Fig. 2 - Dimensões (mm) do bico e da chaminé de vidro da lâmpada Carcel de acordo com a recomendação de Dumas e Regnault (A. J. Ferreira da Silva, *Instruções Regulamentares*, Porto, 1914, p. 6).

A lâmpada *Hefner*, inventada em 1884 pelo engenheiro electrotécnico alemão Friedrich von Hefner-Alteneck (1845-1904), utilizava uma mecha saturada de um líquido combustível, o acetato de amilo ($C_7H_{14}O_2$), e representava um dos mais simples e precisos padrões da época (Fig. 3). A mecha sólida-

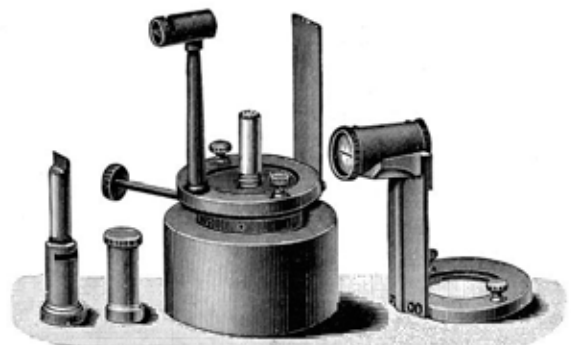


Fig. 3 - Lâmpada Hefner com acessórios. A chama sai do cilindro central do corpo da lâmpada; o braço lateral com um sistema óptico permite avaliar a altura da chama (*Einrichtungen und Apparate für den Physikalischen Unterricht*, 5.ª ed., E. Leybold's Nachfolger, Köln A. Rh., s/d [1905?], p. 384).

era constituída por filamentos de algodão e enchia completamente um tubo com 8 mm de diâmetro interior e 25 mm de comprimento, feito de uma liga metálica constituída por zinco, cobre e níquel. A altura da chama, medida desde a saída do tubo até ao topo, era de 40 mm; podia ser regulada subindo ou baixando a mecha e podia ser avaliada por meio de um dispositivo óptico. Os críticos achavam que as medidas realizadas com esta lâmpada eram muito exigentes, demasiado demoradas e pouco fiáveis, sendo necessário fazer frequentes correções associadas à humidade e temperatura [6]. A lâmpada *Hefner* foi adoptada como padrão da intensidade luminosa na Alemanha, Áustria e países escandina-

vos, desde o final do século XIX.

O padrão *Vernon Harcourt*, aperfeiçoado durante os últimos 20 anos do século XIX, pelo químico e inventor inglês Augustus George Vernon Harcourt (1834-1919), era implementado por uma lâmpada na qual ar saturado de vapor de pentano era consumido num queimador especial, produzindo, sob condições específicas de pressão atmosférica e humidade [7], uma chama com intensidade luminosa equivalente a 10 velas inglesas (*candlepower*) [8]. Em 1898, este padrão foi adoptado em Inglaterra pelo *The Metropolitan Gas Referees*, de que fazia parte o próprio inventor, e usado para estabelecer os padrões de iluminação britânicos [9]. A pureza do pentano era um parâmetro crítico ao ponto de esta mesma instituição ter regulamentado o procedimento da sua purificação [10].

Em 1905, o Congresso Internacional de Fotografia de Liège, adoptou, como “padrão luminoso secundário,” um padrão de acetileno constituído por: (a) um queimador de débito constante, com aparelho de controlo, de Henri-Edmond Fouché (1860-1943); (b) um dispositivo inventado por Charles Féry (1865-1935) e modificado por Fernand Montpillard (1865-1937) [11].

Apesar da complexidade técnica crescente dos padrões baseados em chamas, a sua fiabilidade continuava a ser insatisfatória. A variedade de padrões adoptados em diferentes países era um problema adicional, pois dificultava uma normalização universal. Para minimizar estas dificuldades, estabeleceram-se tabelas de conversão entre as várias unidades, nem sempre rigorosas e muitas vezes significativamente distintas [12], [13]. O facto de os padrões, bem como as fontes luminosas que com eles se comparavam visualmente, apresentarem diferentes tonalidades de cores não era um menor problema. O professor Ferreira da Silva queixava-se que “a comparação do *carcel* com os bicos Auer seria *difficilima, senão impossivel, por causa de ser muito diferente o tom das duas luzes,*” pois a luz da lâmpada *carcel* tinha uma cor avermelhada e a dos bicos Auer era branca. E acrescentava “*recorremos, para vencer esta dificuldade, á cuba photometrica de Crova, utilizada com vantagem por diversos experimentadores.*” Esta cuba continha uma solução verde resultante da mistura de cloreto férrico e cloreto de níquel e, segundo a teoria de Crova, “a razão entre as intensidades dos raios verdes d’este comprimento de onda é igual á das intensidades de luzes brancas” [14]. Esta conclusão era, porém, rejeitada por outros experimentadores.

Um estudo feito por Alfred Perot, o seu assistente E. Langlet, F. Laport e R. Jouaust, encomendado pela Comissão Internacional de Fotometria e realizado no Laboratório de Ensaio do *Conservatoire National des Arts et Métiers* e no *Laboratoire Central d’Électricité* em Paris, permitiu estabelecer, em

1906, relações bastante precisas entre os padrões de chama [15] *Carcel, Hefner e Vernon-Harcourt*, que eram sobretudo usados em França, Alemanha e Inglaterra, respectivamente. Aqueles investigadores concluíram que era do máximo interesse adoptar um padrão baseado num fenómeno físico, tão independente quanto possível das condições exteriores (grau de humidade, pressão e temperatura do ar e até concentração de dióxido de carbono) [16].

No século XIX, enquanto se inventavam novos padrões de chamas e se aperfeiçoavam os conhecidos, foram apresentadas propostas de padrões baseados em diferentes princípios de funcionamento. A incandescência devida à passagem da corrente eléctrica em resistências de platina foi estudada por vários investigadores como John W. Draper (1811-1882) em 1844, Johann K. F. Zöllner (1834-1882) em 1859 e Louis Schwendler (1838-1882) em 1878, os quais propuseram que um padrão baseado neste princípio fosse usado para definir a unidade de intensidade luminosa [17]. Numa Conferência Internacional, realizada a 3 de Maio de 1884, o físico francês Jules Violle (1841-1923) propôs uma inovadora unidade de intensidade luminosa, que já tinha previsto em 1879 e ensaiado posteriormente, tendo ficado conhecida por *unidade Violle*. Era definida como a intensidade luminosa da luz de uma determinada cor, emitida na direcção normal por 1 cm² de platina à temperatura de solidificação (2045 K ou 1772 °C). Para o caso da luz branca, a unidade prática ficava definida como a intensidade da luz total emitida pelo referido padrão nas mesmas condições [18]. Apesar de ter uma estabilidade superior à dos padrões de combustão, o *padrão Violle* tinha a desvantagem de ser pouco reprodutível, principalmente, porque a emissividade da platina se alterava durante a solidificação e dependia muito da quantidade de impurezas que, à época, eram difíceis de controlar.

Como a intensidade deste padrão era muito elevada, decidiu-se, na Conferência Internacional dos Eletricistas de 1889 realizada em Paris, adoptar como unidade da intensidade luminosa a *vela decimal*, igual a 1/20 da *unidade Violle*, que foi usada principalmente em França. Esta nova unidade foi oficialmente estabelecida neste país, por decreto de 26 de Julho de 1919, como a unidade principal da intensidade luminosa. A realização prática da vela decimal era feita por meio de lâmpadas de incandescência depositadas no *Conservatoire National des Arts et Métiers* de Paris, constituindo uma espécie de réplica ou padrão secundário. O seu valor correspondia a uma determinada fracção da média das intensidades médias de pelo menos cinco dessas lâmpadas, medidas perpendicularmente ao eixo [19].

Um padrão primário para a intensidade luminosa baseado em lâmpadas eléctricas foi igualmente pensado, logo após Edison ter inventado, em 1879, a lâmpada de incandescência, luminosamente muito mais estável que a sua antecessora lâmpada de arco. Foram, porém necessários quase 30 anos para definir, em 1907, a vela (*candle*), baseada num conjunto de lâmpadas de filamento de carvão cuidadosamente calibradas, a qual tinha sido sugerida já em 1902 pelo engenheiro electrotécnico inglês John Ambrose Fleming (1849-1945) [20].

Em 1905, iniciou-se um projeto internacional de criação de

um padrão universal, com a colaboração de quatro laboratórios nacionais - *Bureau of Standards* nos EUA, *Laboratoire Central d'Electricité* em França, *National Physical Laboratory* na Grã-Bretanha e *Physikalische Technische Reichsanstalt* na Alemanha. Na sequência deste projeto, os EUA, a França e o Reino Unido adoptaram, em 1909, uma unidade implementada por lâmpadas de filamento de carvão (com temperaturas de cor abaixo de 2000 K), cujo valor era praticamente igual à vela legal francesa (a vela decimal) e cujo nome - *vela internacional* - foi atribuído em 1921 pela CIE. Cada um dos laboratórios possuía um conjunto de lâmpadas eléctricas padrão. A Alemanha não aderiu à nova unidade e, até 1942, manteve-se fiel à *vela Hefner* que, no entanto, desde 1909, passou a valer 0,9 de uma *vela internacional*.

Apesar dos esforços internacionais no sentido de obter uma unidade fiável com a criação desta nova vela, a verdade é que a vela internacional não era suficientemente estável, pois estava condicionada às significativas variações associadas a uma lâmpada eléctrica de filamento de carvão. Não podia, por isso, representar uma solução definitiva e duradoura para um padrão que se pretendia estável.

3. A candela

Em 1933, quando já se conheciam com bastante profundidade as propriedades radiativas do *corpo negro* ou *radiador de Planck*, foi retomada a ideia da utilização da platina, à temperatura de congelação (2045 K) [21], para definir a unidade da intensidade luminosa. Valorizavam-se assim as propostas de Violle, Otto R. Lummer, Ferdinand Kurlbaum [22], e de outros investigadores como Charles W. Waider e George K. Burges do *National Bureau of Standards* [23]. O estudo preparatório deste tipo de padrão foi iniciado pela CIE e pelo *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM), antes de 1937. As conclusões estavam definidas em 1939, mas a sua implementação foi interrompida pela II Guerra Mundial. O novo padrão, que definia a nova vela, foi proposto pela CIE e aprovado pela CIPM, em 1946, e seria implementado por um corpo negro a radiar à temperatura de solidificação da platina de 2041,4 K com uma intensidade luminosa de 60 novas velas por centímetro quadrado. Em 1948, esta definição foi ratificada pela 9.^a *Conference General de Poids et Mesures* (CGPM) que deu à nova vela um nome alternativo: *candela* (cd) [24], o nome latino para vela. O seu valor era inferior ao da vela internacional em cerca de 2 %. No *Sistema Internacional de Unidades* (SI), estabelecido pela CGPM em 1960, a candela foi considerada uma das sete unidades de base.

Em 1967, a 13.^a CGPM produziu uma versão diferente da definição de candela, especificando que a intensidade luminosa era na direção perpendicular à superfície do corpo negro com uma área de $1/600\,000\text{ m}^2$, à temperatura de solidificação da platina (2045 K ou 1772 °C) e à pressão de 101 325 N m⁻² [25], isto é, 1 atmosfera. A área de $1/600\,000\text{ m}^2$ foi escolhida de modo que o brilho da candela fosse praticamente idêntica à de uma vela de cera.

Dadas as dificuldades em realizar fisicamente o radiador de Planck e perante as novas possibilidades de medir a potência radiante, a 16.^a CGPM adoptou, em 1979, uma nova definição para a candela, que ainda está em vigor. Ficou

estabelecido que o padrão fotométrico é um corpo negro à temperatura de 2 045 K, o ponto de fusão da platina pura, tendo sido estabelecido que teria uma luminância normal de $600\,000\text{ cd/m}^2$. Nesta base, a *candela* (cd) é uma unidade secundária da intensidade radiante, tendo sido definida como a intensidade luminosa, numa dada direção, de uma fonte emitindo radiação monocromática de 540 THz e cuja intensidade radiante nessa direção é $1/683\text{ W sr}^{-1}$. Nesta definição, não é feita referência explícita à função $V(\lambda)$ para o cálculo da intensidade luminosa a outras frequências, mas estava implícita na intenção dos normalizadores como foi posteriormente divulgado. Aliás, esta era uma recomendação que vinha já de 1948 quando se estabeleceu pela primeira vez a candela como unidade de intensidade luminosa. O padrão de intensidade luminosa deixou de ser apenas um aparato físico para se transformar num modelo matemático regulado pela curva de emissão do corpo negro e pela função luminosidade. A avaliação da intensidade luminosa baseia-se agora na medição da intensidade radiante, realizada por instrumentos, com sensores muito precisos e fiáveis, sendo capazes de simular o olho humano através da função $V(\lambda)$ e realizar os cálculos de acordo com a Eq. (4).

A 26.^a CGPM, ocorrida a 16 de Novembro de 2018, estabeleceu que a candela é definida como “a unidade da intensidade luminosa numa dada direção e que toma o valor numérico fixo da eficácia luminosa de radiação monocromática de frequência 540 THz, K_{cd} [26], que é 683 quando expresso em unidade lm W^{-1} , igual a cd sr W^{-1} ou a $\text{cd sr kg}^{-1}\text{ m}^{-2}\text{ s}^3$, em que o quilograma (kg), o metro (m) e o segundo (s) são definidos em termos da constante de Planck (h), da velocidade da luz no vácuo (c) e da frequência de transição hiperfina do césio ($\Delta\nu_{Cs}$)” [27]. Ora, destas três constantes, h foi a única alterada pela 26.^a CGPM, mas não de maneira significativa para que a definição de candela sofresse qualquer alteração relativamente à de 1979, embora os termos utilizados na definição sejam distintos e mais rigorosos. Noutras palavras, uma candela continua a ser a intensidade luminosa numa determinada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540 THz e tem uma intensidade radiante nessa direção de $1/683\text{ W sr}^{-1}$. A eficácia luminosa $K_{cd} = 683\text{ lm W}^{-1}$ fica a par de mais seis constantes do SI todas elas de grande relevância física ($\Delta\nu_{Cs}$, a frequência de transição hiperfina do césio; c , a velocidade da luz no vácuo; h , a constante de Planck; e , a carga elementar; k , a constante de Boltzmann; N_A , o número de Avogadro).

4. Discussão e Conclusão

Na definição atual da candela, surgem dois parâmetros associados à eficácia luminosa, que são a frequência 540 THz e o valor $K_m = K_{cd} = 683\text{ lm W}^{-1}$, em que o lumen (lm) é a unidade do fluxo luminoso

(potência luminosa), sabendo-se que uma fonte pontual com a intensidade luminosa de uma *candela* radia um *lumen* no ângulo sólido de um *esterradiano* e, se for isotrópica, radia globalmente, em todas as direções, $4\pi \text{ lm} = 12,56 \text{ lm}$.

A curva da *eficácia* luminosa toma duas formas, uma para visão diurna - a *curva fotópica* - e a outra para visão noturna - a *curva escotópica* $V'(\lambda)$ [28]

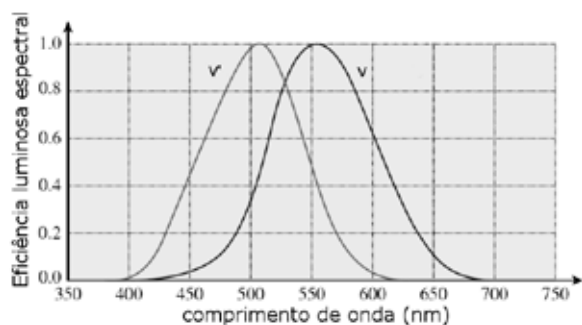


Fig. 4 - Eficiência luminosa espectral para visão escotópica $V'(\lambda)$ (esquerda) e fotópica $V(\lambda)$ (direita), com picos em 507 nm e 555 nm, respectivamente.

com as respectivas funções $V(\lambda)$ e $V'(\lambda)$ (Fig. 4). A primeira versão da curva $V(\lambda)$ fotópica, publicada em 1923 por Kasson S. Gibson e Edward P. T. Tyndall, foi adoptada em 1924 pela 6.^a Sessão da CIE, confirmada em 1931 como *função colorimétrica do sistema de referência colorimétrico CIE 1931*, e aprovada em 1933 pelo CIPM [29]. Esta curva foi modificada em 1951 por Deane B. Judd e melhorada em 1978 por Johannes J. Vos, tendo dado origem à função *CIE $V_M(\lambda)$* ou *CIE 1978 $V(\lambda)$* . Em 2005, Lindsay T. Sharpe, Andrew Stockman, Wolfgang Jagla e Herbert Jägle determinaram experimentalmente uma curva ainda mais rigorosa que representava a sensibilidade do olho humano à luz diurna [30]. Apesar destas ligeiras melhorias, a função *CIE 1931 $V(\lambda)$* continua a ser a curva padrão para os cálculos da intensidade luminosa por razões de natureza prática, evitando-se assim possíveis ambiguidades com a introdução de uma nova curva. A função escotópica $V'(\lambda)$ foi adotada pela CIE em 1951, com base em dados experimentais obtidos por George Wald (1906-1997), em 1945, e por Brian Hewson Crawford (1906-1991), em 1949; é representativa do grupo de observadores com idade inferior a 30 anos. O valor atribuído ao pico da curva fotópica - posteriormente usado na definição da *candela* e que ocorre no comprimento de onda 555 nm (ou na frequência 540 THz) - começou por ser 621 lm W^{-1} , em 1903; passou para 673 lm W^{-1} , em 1907. Em 1948, passou de 685 lm W^{-1} para 680 lm W^{-1} e, em 1979, estabilizou em 683 lm W^{-1} . O valor de pico para a curva escotópica, que ocorre no comprimento de onda 507 nm, foi estabelecido em 1979 como sendo 1754 lm W^{-1} . Este valor foi posteriormente ajustado para 1700 lm W^{-1} para que as curvas da eficiência luminosa fotópica e escotópica tivessem o mesmo valor a 555 nm.

A dependência psico-fisiológica da intensidade luminosa e da respectiva unidade, a *candela*, coloca-as numa posição única no SI, por não serem definidas exclusivamente a partir de constantes físicas universais. Além disso, a *candela* é definida à custa de outra unidade fotométrica, o *lumen*, a unidade do fluxo luminoso que, por isso, talvez merecesse o estatuto de unidade de base. Embora a intensidade luminosa e a *candela* sejam suficientemente importantes para poderem fazer parte do grupo das entidades definidas ou recomendadas no SI, não é evidente que devam pertencer ao grupo das grandezas ou unidades de base. Há quem defenda, com alguma razão, que deveriam ser excluídas desta categoria [31]:

A candela é claramente uma unidade derivada por ser uma função da intensidade radiante (potência por unidade de ângulo sólido) e o máximo da função luminosidade. Não é uma unidade derivada coerente e, portanto, deveria pertencer logicamente à classe das "unidades aceites para uso com o SI". Contudo, ao mudar o seu estatuto de unidade de base (convencionalmente independente) ter-se-ia que mudar o estatuto das suas unidades derivadas coerentes lumen e lux, o que daria origem a confusões.

Não se espera que as grandezas e unidades do SI, adoptadas em 2019, se mantenham imutáveis indefinidamente. Se acreditarmos na evolução histórica apresentada neste artigo, outras alterações serão certamente propostas e aprovadas no futuro, com o objectivo de melhorar o SI, tornando-o mais simples e rigoroso. A *candela* poderá ser uma das unidades a ser reformulada, na base, por exemplo, do número de fótons de uma determinada energia por unidade de ângulo sólido ou de uma descrição quântica da luz, que levou à reformulação da maioria das unidades de base do SI [32].

Referências

1. Louis Figuier, "Les Merveilles de la Science," Vol. IV, Furne, Jouvot et Cie, Éditeurs, Paris (1870), pp. 36-37.
2. A. J. Ferreira da Silva, "Instruções Regulamentares para a determinação do poder illuminante do gaz adoptado no Posto Photometrico do Porto (1885)," Separata da Revista de Chimica Pura e Applicada (Ano 10.^o, 1914), Tip. a vapor da Encyclopedia Portuguesa, Porto (1914), pp. 5-6.
3. Edmond Borias, "Traité Théorique et Pratique de la Fabrication du Gaz et de ses Divers Emplois," Librairie Polytechnique, Baudry et Cie Éditeurs, Paris (1890), p. 399; Sean François Johnston, "A Notion or a Measure: The Quantification of Light to 1939," Tese de Doutoramento, University of Leeds (1994), p. 80.
4. Stephen Wilk, "From Candle to Candela," Optics & Photonics News, Março de 2016, pp. 20-21.
5. A. J. Ferreira da Silva, "Instruções Regulamentares para a determinação do poder illuminante do gaz adoptado no Posto Photometrico do Porto (1885)," Separata da Revista de Chimica Pura e Applicada (Ano 10.^o, 1914), Tip. a vapor da Encyclopedia Portuguesa, Porto (1914), pp. 5-6.
6. Sean François Johnston, "A Notion or a Measure: The Quantification of Light to 1939," Tese de Doutoramento, University of Leeds (1994), p. 86.

7. E. B. Rosa, E. C. Crittenden, A. H. Taylor, "Atmospheric Corrections for the Harcourt Standard Pentane Lamp," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. V, n.º 5, Setembro de 1921, pp. 444-451.
8. E. C. Crittenden, A. H. Taylor, "The Pentane Lamp as a Working Standard," *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 10, 1914, pp. 391-417; C. L. Boltz, "A Statue to Mr. Trattles and other scientific topics," London, Butterworths Scientific Publications (1952), p. 69.
9. "Augustus George Vernon-Harcourt, 1834-1919," *Nature*, Vol. 134, 22 de Dezembro de 1934, p. 963.
10. Sean François Johnston, "A Notion or a Measure: The Quantification of Light to 1939," Tese de Doutoramento, University of Leeds (1994), p. 84.
11. G. H. Niewenglowski, "Étalon secondaire pour la photométrie photographique," *Le Radium*, 3.º Ano, 1906, pp. 121-122.
12. B. C. Damien & R. Paillot, "Traité de Manipulations de Physique," Paris Masson & Cie Editeurs, Paris (1896), pp. 172-173.
13. No fim do século XIX, adoptavam-se as seguintes relações entre unidades: 1 Carcel = 0,481 Violle = 0,905 Vernon-Harcourt = 7,89 Kerzen = 8,91 "candle" ou vela inglesa = 7,5 vela normal francesa = 8,75 vela esteárica de Munique = 9,60 vela espermacete ordinária = 9,5 vela estrela ordinária. Estes valores variavam, no entanto, conforme as fontes; com base no "Formulaire de l'électricien de Hospitalier," o químico Ferreira da Silva indica que 1 Carcel = 7,6 vela alemã = 7,4 vela inglesa. Numa tabela publicada em 1931, estabelecia-se que 1 Violle = 2,08 Carcel = 16,1 vela estrela francesa = 16,4 Kerzen = 18,5 "candle" ou vela inglesa = (18,51) 18,86 Hefner [antiga] = (2,20) 20 vela decimal (Nota: entre parêntesis indicam-se valores incorretos impressos no livro a seguir citado); v. J. Tribouillois, L. Laumière, "Pour y voir clair, Initiation à l'Éclairage," Dunod, Paris (1931), p. 6. As atuais relações entre estas unidades podem consultar-se em <https://www.unitconverters.net/lumi-nous-intensity-convert.html>.
14. A. J. Ferreira da Silva, "A Transformação do Systema de iluminação no Porto em 1908," *Typ. a vapor da Encyclopedia Portuguesa Illustrada*, Porto (1914), pp. 12-13.
15. E. B. Rosa, E. C. Crittenden, "Flame Standards in Photometry," *Bulletin of the Bureau of Standards*, Vol. 10, 1914, pp. 557-595.
16. SL. Matout, "Sur la valeur relative des étalons lumineux, Carcel, Hefner et Vernon Harcourt. - MM. A. Perot et Laporte," *Le Radium*, 3.º Ano, 1906, pp. 372-373.
17. Ian E. Cottington, "Platinum and the Standard of Light," *Platinum Metals Review*, Vol. 30, n.º 2, 1986, pp. 84-88
18. Idem, pp. 88-89.
19. M. Denis-Papin, J. Vallot, "Métrologie Générale," Tomo II, 4.ª ed., Dunot, Paris (1960), p. 119.
20. C. L. Boltz, "A Statue to Mr. Trattles and other scientific topics," London, Butterworths Scientific Publications (1952), p. 69.
21. "Le Bureau International des Poids et Mesures 1875-1975," B.I.P.M. - Pavillon de Breteuil, F 92310 Sèvres, France (1975), p. 153.
22. C. E. G. [Ch. E. Guillaume], "Une nouvelle unité de lumière," *La Nature*, 22.º Ano, 1.º Semestre, G. Masson Éditeur, Paris, 1894, p. 366.
23. C.W. Waidner, G.K. Burgess, "Note on the Primary Standard of Light," *Electrical World*, Vol. 52, 1908, pp. 625-628

24. Stephen Wilk, "From Candle to Candela," *Optics & Photonics News*, Março de 2016, p. 21.
25. Idem, *Ibidem*
26. Isto é, $K_m = K_{cd} = 683 \text{ lm/W}$.
27. "The International System of Units (SI)," Draft of the ninth SI Brochure, 6 de Fevereiro de 2019, Bureau International des Poids et Mesures, p. 20.
28. D. Allan Roberts, "Radiometry/Photometry," *The Photonics Design & Applications Handbook*, Livro 3, 38.ª edição internacional (1992), pp. H-65-68.
29. J. E. Hardis, "100 Years of Photometry and Radiometry," *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4450, 2001, pp. 25-26.
30. L. T. Sharpe, A. Stockman, W. Jagla, H. Jägle, "A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation," *Journal of Vision*, Vol. 5, n.º 11, Dezembro de 2005, pp. 948-968.
31. Marcus P. Foster, "The next 50 years of the SI: a review of the opportunities for the e-Science age," *Metrologia*, Vol. 47, n.º 6, 2010, p. R47.24. Stephen Wilk, "From Candle to Candela," *Optics & Photonics News*, Março de 2016, p. 21.
32. J.C. Zwinkels, E. Ikonen, G. Ulm, M.L. Rastello "Photometry, radiometry and "the candela": evolution in the classical and quantum world" *Metrologia*, Vol. 47, n.º 5, 2010, pp. R15-R32



Luís Miguel Bernardo, é professor catedrático aposentado do Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Licenciado em Engenharia Electrotécnica na Faculdade de Engenharia da mesma universidade, obteve o mestrado e o doutoramento em Física na Universidade Estatal de Virgínia (Virginia Tech) nos E. U. A. Realizou nos últimos 40 anos investigação científica em processamento óptico, holografia, óptica não-linear e ultrarrápida e aplicações da óptica à indústria e à medicina, tendo produzido mais de 150 comunicações e publicações científicas. Fazem parte dos seus interesses a história da ciência e a divulgação científica, sendo autor dos livros: *Histórias da Luz e das Cores* (3 volumes, 2005-2010), *Cultura Científica em Portugal: uma perspectiva histórica* (2013) e *Visão, Olhos e Crenças* (2018). Foi durante dez anos diretor do Museu de Ciência da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, sendo coautor dos catálogos *Dois Séculos: instrumentos científicos na história da Universidade do Porto* (2011) e *250 Anos da Criação da Aula Náutica do Porto* (formato digital) (2012).

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 $\mu\epsilon\pi\rho\omicron\nu$, 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 .

Aquele 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 supercondutor;

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.

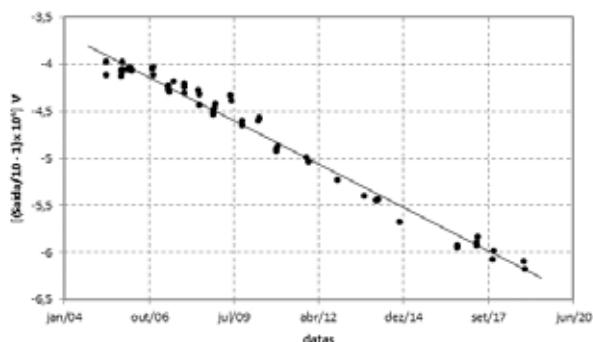


Fig. 1 - Comportamento em função do tempo de uma referência eletrónica de tensão.

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

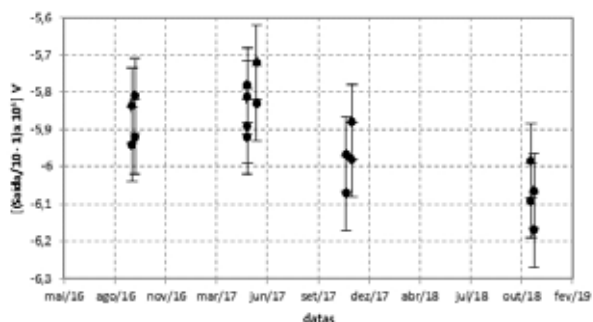


Fig. 2 - Conjunto de dados reais e dados simulados por variação de K_J (barras de erro correspondentes a incertezas típicas).

medição.

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

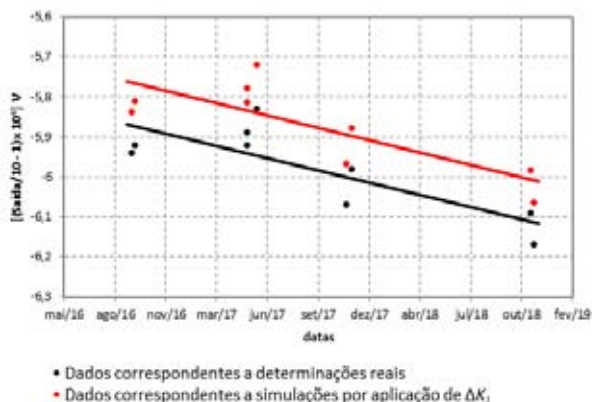


Fig. 3 - Conjuntos de dados diferenciados por aplicação de ΔK_j .

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.

Moles de moléculas

Maria Filomena Camões¹

¹ Departamento de Química e Bioquímica, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Mole, de símbolo **mol**, é a unidade de base do Sistema Internacional de unidades (SI), em que se exprime a grandeza quantidade de matéria, também conhecida como quantidade química.

Quantidade de matéria, ou quantidade química, é uma grandeza que mede o número de entidades elementares especificadas de um sistema.

Uma entidade elementar pode ser uma molécula, um átomo, um ião, um electrão, ou outra partícula ou grupo de partículas conforme especificado: uma mole de moléculas, uma mole de átomos, uma mole de iões, uma mole electrões, etc.



Em finais do século XVIII, a existência na Europa de diversos padrões de medição, designadamente de comprimento e de massa, revelou-se fonte de sérias dificuldades de funcionamento do comércio e da indústria, causando litígios entre comerciantes e cidadãos em geral e, em particular, na aplicação de impostos. Num esforço de melhoria, a que não foi alheia a crescente actividade científica do século XVII, o Rei Louis XVI de França decidiu pela criação de um novo sistema de medidas baseadas numa constante não arbitrária, universal, assente num fenómeno natural. Em 1790, a Assembleia Nacional Francesa aprovou a proposta. O Governo Francês fixou a abolição dos padrões anteriores para o prazo de seis meses e solicitou à Academia Real de Ciências o anteprojecto de um novo sistema de pesos e medidas em que as unidades, a definir, deveriam ter um valor próximo das unidades de medida em vigor e um novo nome diferente

de todos os nomes existentes, não seriam nacionais e visavam a aceitação global, não variariam no espaço ou no tempo, podendo dar origem a padrões de medição de fabrico e reprodução fáceis.

A Academia delegou a tarefa numa comissão científica, constituída por Jean-Charles de Borda (1733-1799), Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), Louis Joseph Lagrange (1736 – 1813), Marie Jean Antoine Nicolas de Caritat (1743 – 1794) Marquês de Condorcet, Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), Gaspard Monge (1746- 1818), Pierre Simon Laplace (1749- 1827), entre outros, que se organizaram em grupos de trabalho. Lavoisier foi incumbido de calcular o peso de um volume conhecido de água, para definir a unidade de massa; nos finais do século XVIII, o quilograma era a massa de um decímetro cúbico de água.

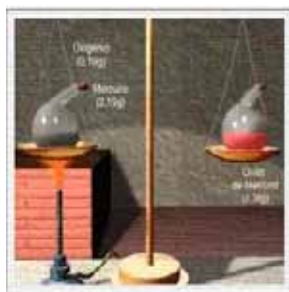
Dando início aos trabalhos, a comissão decidiu que a unidade fundamental do novo sistema, o metro, fosse tirada de uma medida do globo terrestre e recomendou a relação decimal para todas as unidades de pesos e medidas. Em 1794, Lavoisier afirmava que “jamais algo de maior e mais simples, de maior coerência em todas as suas partes, saiu da mão dos homens”.

Durante a Revolução Francesa, Lavoisier foi decapitado (8 de Maio 1794) e Laplace foi expulso da Comissão que permaneceu presidida por Lagrange.

O reconhecimento da importância de Lavoisier para o desenvolvimento de diferentes áreas da Ciência ficou imortalizado nas palavras de Lagrange, lamentando a sua decapitação na guilhotina, no meio do turbilhão político da Revolução Francesa: **Il ne leur a fallu qu'un moment pour faire tomber cette tête, et cent années peut-être ne suffiront pas pour en reproduire une semblable** (A sua decapitação foi obra de breve instante, mas cem anos não chegarão para que surja outra cabeça que se lhe assemelhe).

Lavoisier rompeu com a leitura alquimista dos fenómenos, pondo fim à teoria do flogisto e introduzindo o raciocínio científico, pelo que ficou conhecido como o Pai da Química. Particularmente marcantes

são a descoberta do oxigénio no ar atmosférico e o seu papel nas combustões, bem como a afirmação “Nada se perde, nada se ganha, tudo se transforma”, alusiva ao facto de a massa de um sistema material alvo de transformações permanecer constante, base do Princípio da Conservação da Massa e de cálculos químicos consequentes.



A proposta do Sistema Métrico Decimal e a deposição nos Arquivos da República em Paris, a 22 de Junho de 1799, de dois padrões de platina, representando respectivamente o metro e o quilograma, pode ser considerado como o primeiro passo no desenvolvimento do que viria a ser o actual Sistema Internacional de Unidades.

O Sistema Métrico Decimal foi adoptado em Portugal, em 13 de Dezembro de 1852, por acção do Inspector Geral dos Pesos e Medidas Joaquim Henriques Fradesso da Silveira, Oficial de Artilharia e lente substituto da cadeira de Física e Química na Escola Politécnica de Lisboa, substituindo nas faltas e impedimentos o lente proprietário da cadeira, ao tempo Júlio Máximo de Oliveira Pimentel. Foi sócio correspondente da Academia Real das Ciências de Lisboa e em 1846 publicou um *Manual do curso de Química elementar*.

O contexto político da altura levou a que tivesse decorrido quase um século até que delegados de dezasseis países assinassem em Paris, a 20 de Maio de 1875, um tratado intergovernamental conhecido como a Convenção do Metro, por cujo Artigo 1 era fundado o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), de natureza científica e permanente, com o encargo de providenciar a base para um sistema de unidades de medida simples e coerente, a ser usado em todo o mundo. O tratado criou também a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), conferência de delegados oficiais dos países membros e o Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), composto por cientistas e metrologistas, que prepara e executa as decisões da CGPM e é responsável pela supervisão do BIPM.

A construção de novos protótipos internacionais do metro e do quilograma (IPK), numa liga de platina iridiada, Pt-Ir, aprovados pela 1.^a CGPM foi iniciada em 1889. O BIPM distribuiu a Portugal, a 28 de Setembro de 1889, os protótipos n.º 10 do quilograma e do metro padrão.

O metro como unidade de comprimento (de símbolo m) e o quilograma como unidade de massa (de símbolo kg), juntamente com o segundo astronómico como unidade de tempo (de símbolo s) constituíram o Sistema MKS.

Em 1921, a 6.^a CGPM procedeu à revisão da Convenção do Metro expandindo o âmbito do BIPM a outros domínios da Física. Assim, em 1927, a 7.^a CGPM criou o Comité Consultivo de Electricidade (CCE), actualmente Comité Consultivo de Electricidade e Magnetismo (CCEM) que, em 1939, propôs uma 4.^a unidade de base, o ampere (de símbolo A), para corrente eléctrica. Mediante aprovação pelo CIPM, em 1946, foi instituído o sistema MKSA.

Em 1948, o BIPM lançou um questionário sobre a eventual pertinência de novas unidades de base, o que levou a 10.^a CGPM, em 1954, ao alargamento para seis, com a inclusão do kelvin (de símbolo K), para a temperatura termodinâmica, e da candela (de símbolo cd), para a intensidade luminosa.

Em 1960, por aprovação pela 11.^a CGPM, foi adoptado e recomendado o sistema Sistema Internacional de Unidades (de símbolo SI), com estas seis unidades de base que, em conjunto com unidades derivadas, formam um sistema coerente.

Os desenvolvimentos científicos dos finais do século XVIII e princípios do século XIX conduziram à interpretação da composição e manifestações físicas e químicas da matéria, ligando a dimensão macroscópica com a microscópica. Amadeo Avogadro (1776-1856) enunciou, em 1811, a lei dos gases, segundo a qual volumes iguais de gases, à mesma temperatura e pressão, contêm o mesmo número de moléculas. August Wilhelm Hofmann (1818-1892) introduziu na química o termo “molar” (do latim moles, que significa “grande massa”) para indicar uma massa macroscópica, enquanto a palavra “molécula”, também derivada de moles, pela adição do sufixo “-cula”, significa “pequeno” ou “diminuto”. O uso do termo molar, significando uma massa em gramas que reflete a massa das moléculas nela contidas, é geralmente atribuído a Wilhelm Ostwald. Este uso dos termos “molar” e “molecular” foi surgindo na literatura e a resolução de problemas estequiométricos é conseguida pela interconversão entre mole e grama.

Apesar de divergências, designadamente no que tocava à especificação ou não do isótopo oxigénio-16, físicos da União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP) e químicos da União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), começaram por definir a grandeza “quantidade de matéria”, em termos do número de átomos existentes ($6,022 \times 10^{23}$) em 16 g de oxigénio, de massa atómica 16 u (unidade de massa atómica, ou dalton).

Após longas discussões, as duas organizações entraram em acordo e, em 1959-1960, avançaram com a definição de unidade de medida da grandeza quantidade de matéria: Mole, símbolo mol- Quantidade de matéria de um sistema que contém tantas (o número de Avogadro) entidades elementares quantos os átomos que existem em 0,012 kg de carbono-12.

A IUPAC acrescentou como adenda que, quando o termo “mole” for utilizado, as entidades elementares devem ser especificadas, podendo ser átomos, moléculas, íões, electrões,

outras partículas, ou grupos especificados de tais partículas. Em conformidade com a definição, o número de Avogadro de átomos de carbono-12 pesam exactamente 12 g, tendo como consequência a igualdade numérica entre massas molares, em gramas (de símbolo g), e massas moleculares, em unidades de massa atómica (de símbolo u).

Esta definição foi adotada pelo CIPM em 1967 e, em 1971, a 14.^a CGPM completou a actual versão do SI, com a inclusão da 7.^a unidade de base, a mole (de símbolo mol), para a grandeza quantidade de matéria, ou quantidade química, de símbolo n , vulgarmente conhecida como “a grandeza dos químicos”. Em 1980, o CIPM reconfirmou esta definição, salvaguardando que os átomos de carbono-12 não estariam ligados por ligações químicas, mas sim no seu estado fundamental.



Após a criação sucessiva de nove Comitês Consultivos do CIPM, de áreas da Física, ao longo de mais um século, foi finalmente, em 1993, criada o 10.^o, o Comité Consultivo de Quantidade de Matéria, actualmente Comité Consultivo de Quantidade de Matéria: Metrologia em Química e Biologia (CCQM), responsável por desenvolver, melhorar e documentar a equivalência dos padrões nacionais (materiais de referência certificados e métodos de referência) para medições químicas e biológicas. Compete-lhe aconselhar o CIPM em assuntos relacionados com as medições químicas e biológicas, incluindo proposta do programa de actividades científicas que se vêm desenrolando em onze Grupos de Trabalho permanentes e em grupos ad hoc, constituídos de forma transitória para o estudo pontual de questões emergentes. Este foi o caso do Grupo da Mole, em que uma das missões foi a de alertar para a eventualidade de redefinição da mole, explicar as razões e preparar as opiniões para as discussões na CCQM.

Na realidade, os avanços científicos e o desenvolvimento de métodos de medição novos e melhorados, conduziram à necessidade de revisão das definições das unidades de base do SI, indo ao encontro de resultados de medições de elevada qualidade, adequadas aos fins em vista para as grandezas em estudo.



Se bem que, todas as grandezas, assim como as respectivas unidades de base, são importantes, a massa, com o quilograma, e a quantidade de matéria, com a mole, são de interesse especial para os químicos.

Unidades de base do SI para massa e quantidade de matéria:

Nome da grandeza	Símbolo da grandeza	Símbolo da dimensão	Nome da unidade do SI	Símbolo da unidade do SI
Massa	m	M	quilograma	kg
Quantidade de matéria	n	N	mole	mol

Na sua 24.^a reunião, em 2011, a CGPM aprovou a resolução de uma possível revisão do SI. No “Novo SI”, todas as sete unidades de base seriam definidas respectivamente em função de sete constantes físicas fundamentais de referência, respeitantes a sete propriedades invariantes da Natureza; como tal, viriam a ser conhecidas como “as constantes de definição do SI”.



Entretanto, de todas elas, apenas o quilograma tinha a definição coincidente com o padrão primário, o artefacto material (com uma variação de 25 μg ao longo de cem anos) depositado no BIPM desde 1889, o que à luz do novo princípio se revelou incoerente, logo a exigir redefinição.

Em observância à regra geral de que cada unidade do SI deve ser definida de forma independente das outras, surge a evidência da necessidade de, em

simultâneo e de forma coerente, reformular as respectivas definições, designadamente a da mole, até então assente na definição do quilograma.

As novas definições visam a melhoria do SI, sem que o tamanho de cada uma das unidades seja alterado, para que haja continuidade nos resultados das medições. Por exemplo, um quilograma de farinha continuará a ter a mesma quantidade de farinha antes e depois da redefinição do quilograma.

A aplicação prática destas unidades continua a implicar a sua materialização sob a forma de artefactos que permitam a sua disseminação, assegurando rastreabilidade metrológica.

Na 25.^a reunião da CGPM, em Novembro de 2014, foram anunciados os quatro critérios a que deveria obedecer a qualidade dos valores medidos para as constantes, no Novo Projecto SI e que deveriam ser satisfeitos, nomeadamente para o quilograma, antes de a CGPM adoptar o SI revisto:

- 1- Consistência; três experiências independentes com resultados consistentes com incerteza relativa, $u_{rel} < 5 \cdot 10^{-8}$
- 2- Pelo menos um resultado com incerteza, $u_{rel} < 2 \cdot 10^{-8}$ (20 μg em 1 kg)
- 3- Rastreabilidade com calibração extraordinária IPK @ BIPM
- 4- Validação da implementação prática em conformidade com o CIPM-MRA (*Mutual Recognition Agreement*, Acordo de Reconhecimento Mútuo).

Para definir e materializar a unidade SI de massa, o quilograma, foram seleccionadas e investigadas duas abordagens possíveis:

i) Pela constante de Avogadro

A constante de Avogadro, N_A , exprime o número de partículas elementares por mole de substância, i.e. o número de Avogadro, $\{N_A\}$, e é: $N_A = \{N_A\} \text{ mol}^{-1}$. Um sistema material, com n moles de partículas elementares, tem $n N_A$ partículas (por exemplo moléculas).

O quilograma poderia ser definido como sendo a massa de $\{N_A\}$ 1000/12 átomos de carbono-12, fixando o valor numérico de N_A , o que exigiria o seu conhecimento rigoroso.

O modo como se tentou fazer a redefinição da constante de Avogadro foi através do cálculo do número de átomos de silício, Si, em esferas monocristalinas.



O Projecto Internacional de Coordenação Avogadro (IAC), entre BIPM, INRIM (Itália), IRMM (Bélgica, UE),

NIST (USA), NMIA (Austrália), NMIJ/AIST (Japão), NPL (Reino Unido) e PTB (Alemanha), decorreu entre 2004 e 2011, com o objectivo de medir a constante de Avogadro, N_A , fixá-la, e usá-la para a redefinição do quilograma. O projeto criou duas esferas quase perfeitas de um quilograma de monocristal ultrapuro (99,995 %) de **Si-28**, com o diâmetro nominal de 93,6 mm, variando no máximo 60 nm, medido com um erro menor que 0,6 nm.

Em 2011, o resultado era $N_A = 6,022\,140\,8(18) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, com uma incerteza relativa de $3,0 \cdot 10^{-8}$. A colaboração foi renovada em 2012 com a celebração de um memorando de entendimento entre BIPM, INRIM, NMIA, NMIJ e PTB. A constante de Avogadro, conforme valores de 2015, é $N_A = 6,022\,140\,76(12) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, com uma incerteza relativa de $2,0 \cdot 10^{-8}$.

ii) Pela constante de Planck

O estabelecimento de um valor fixo para a constante de Planck, h , obtido com balanças do watt, assim chamadas porque o seu princípio de funcionamento, assenta na proporcionalidade entre massa e produto de uma intensidade de corrente produzida por uma diferença de potencial (potência, em unidade watt). Através da medição da massa de um protótipo de uma liga de cobalto rastreado ao padrão de Pt-Ir, a balança do watt mede o quociente h/m_{IPK} , que relaciona a constante de Planck, h , com a massa do IKP, m_{IPK} . Em meados de 2017, o NIST (*National Institute of Standards and Technology-USA*) reportou para a constante de Planck, o valor $h = 6,626\,069\,934 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$, com uma incerteza relativa de $1,3 \times 10^{-8}$, atingindo assim os objectivos.

O BIPM decidiu pela redefinição do quilograma em função da **constante de Planck**, com a balança do watt. Com base nas equações da relatividade ($E=mc^2$) e de Planck ($E=h\nu$), **definiu o quilograma fixando o valor numérico da constante de Planck, a $h = 6,626\,070040 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$.**

O projeto Avogadro é complementar do projeto que utiliza a balança do watt. Uma alternativa ao projeto que utiliza a balança do watt poderia ter sido exprimir o quilograma em termos da constante de Avogadro, N_A , e da massa de um átomo de carbono-12. A determinação de N_A fornece um método alternativo para determinar h através da constante molar de Planck, $N_A h$, que é conhecida com uma incerteza relativa, u_{rel} , muito baixa (CODATA, 2014), $u_{rel} = u(N_A \cdot h) / (N_A \cdot h) = 4,5 \times 10^{-10}$.

No contexto da campanha para medir o valor da constante de Avogadro com a maior exactidão possível, a mole também foi alvo de redefinição no Novo SI.

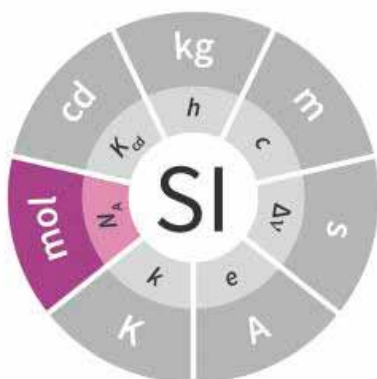
Após profunda análise crítica das opiniões expressas na literatura e em acesos debates, a IUPAC propôs uma nova definição de mole baseada num número específico de entidades elementares, que foi submetida para consideração pela CCQM e aceite no Novo SI, na sua essência, ou seja fixando a parte numérica da constante de Avogadro, N_A , isto é o número de Avogadro, $\{N_A\}$:

Uma mole, símbolo mol, passa a ser a quantidade de matéria, com exactamente $6,022140\,76 \times 10^{23}$ entidades elementares.

Uma entidade elementar, pode ser um átomo, uma mo-

lécua, um ião, um electrão, ou outra partícula ou grupo de partículas conforme especificado.

Embora esta alteração não traga benefícios práticos imediatos, tem a vantagem de realinhar a definição de mole com a forma conceptual como os químicos a compreendem.



Neste novo SI, a mole abandona a definição associada ao carbono-12, logo cessa o corolário de que a massa molar do carbono-12 é exactamente 12 g/mol. Como consequência, as massas molares, de unidade g/mol, deixam de ser numericamente idênticas às massas atómicas ou moleculares. A diferença entre ambos os valores é da ordem de 1 em 10⁹, o que não é significativo, podendo ainda introduzir-se um factor de correcção, κ :

Em vez de $M(X) = A_r(X) \cdot M_u$, é $M(X) = (1 + \kappa)A_r(X) \cdot M_u$, com $M_u = 1$ g/mol.

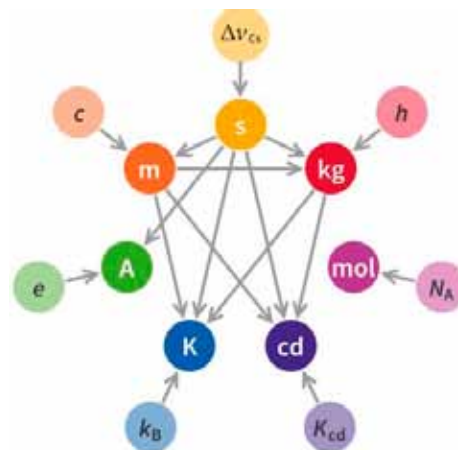
Não há portanto, razões para preocupações quanto a eventual incompatibilidade entre massa molar, $M(X)$, e massa molecular, A_r .

Reagindo ao anúncio da nova definição, Peter W. Atkins, afamado professor de química, autor de dezenas de livros recomendados na generalidade das universidades, e 1.º Presidente do Comité de Ensino da Química da IUPAC (CCE), teceu o seguinte comentário:

“Sempre me intriguei com o facto de a mole ser considerada como um assunto difícil: sempre me pareceu que muitos docentes dizem aos seus alunos que se trata de um conceito sofisticado, o que leva os estudantes a duvidarem que tenham compreendido, questionando-se sobre eventuais detalhes de que não se tenham apercebido. A nova definição, indo directa ao significado do que é uma mole, é portanto bem vinda. Apesar de algumas subtilezas na sua determinação, deixa de haver desculpas para o argumento de que a definição é incompreensível”.



O metro e a candela, já antes definidos em termos de constantes físicas, veem a sua definição revista apenas no que respeita à sua formulação. O quilograma, o ampere, o kelvin e a mole passam a ser definidas respectivamente pelos valores numéricos exactos da constante de Planck (h), da carga eléctrica elementar (e), da constante de Boltzmann (k), e da constante de Avogadro (N_A).



A decisão significa que todas as unidades de base do SI estão agora definidas em termos de constantes da Natureza, o que garante a estabilidade do SI e abre oportunidade à utilização de novas tecnologias, incluindo tecnologias quânticas para implementar as correspondentes definições.

Aprovada pela 26.ª CGPM, em Novembro de 2018, com a participação de mais de 50 delegados para entrar em vigor a partir de 20 de Maio de 2019, Dia Mundial da Metrologia, esta é talvez a revisão mais significativa do SI desde a sua criação, geralmente associada ao sistema métrico decimal e deposição de dois padrões de platina representando respectivamente o metro e o quilograma, nos Arquivos da República em Paris, em 22 de Junho de 1799.



A ocasião merece ser assinalada de forma festiva, com a ampla divulgação e explicação das decisões, o que irá acontecer em múltiplos eventos que ocorrem em 2019. Salienta-se em Paris, em Abril, a 25.ª reunião da CCQM, no BIPM, e em Julho, a Assembleia Geral e Congresso Mundial da IUPAC que celebra, no Palácio de Congressos-Porta de Maillot, o seu 1.º centenário.



Referências

- M.F. Camões, G.D. Christian, D.B. Hibbert, *Pure Appl. Chem.* **90** (2018) 563-60
- R. Masquardt, J. Meija, Z. Mester, M. Towns, R. Weir, R. Davis, J. Stohner, *Pure Appl. Chem.* **89** (2017) 951-981
- R. Masquardt, J. Meija, Z. Mester, M. Towns, R. Weir, R. Davis, J. Stohner, *Pure Appl. Chem.* **90** (2018) 175-180
- M.F. Camões. *Sociedade Portuguesa de Química*, vol. 42, nº 148 (2018) 45-46
- <https://www.bipm.org/en/about-us/>
- <https://iupac.org/>



Maria Filomena Camões. Licenciada em Ciências Físico-Químicas pela Universidade de Lisboa e Doutorada em Química-Física pela Universidade de Newcastle-Upon-Tyne, UK. Foi Coordenadora do Grupo de Investigação em Química Analítica e Ambiental do Centro de Ciências Materiais e Moleculares, atualmente CQE do Departamento de Química e Bioquímica da FCUL. Foi também Presidente da Divisão de Química Analítica da IUPAC (União Internacional de Química Pura e Aplicada), em 2012-2013, Vice-Presidente, em 2010-2011, Presidente do sub-comité em pH (SpH) e membro Titular, Associado e Fellow da IUPAC. Foi ainda presidente da rede europeia - EURACHEM. É membro do Joint Committee on the Properties of Seawater da International Association for the Properties of Water and Steam, SCOR e International Association for the Physical Sciences of the Ocean.

FUSÃO NUCLEAR: em que estado estamos?

António João Caeiro Heitor Coelho¹

¹ Aluno do 5º ano do Mestrado Integrado em Engenharia Física Tecnológica do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Resumo

Produzir energia elétrica de forma limpa e segura é possível através de reações de fusão nuclear. Fazê-lo de forma econômica e sustentável tem sido alvo de intensa investigação principalmente em reatores experimentais do tipo *tokamak*. Desde a sua conceção em meados do século passado até à atualidade, muitas barreiras tecnológicas foram derrubadas, mas o caminho a percorrer ainda é longo. Neste artigo, procura-se dar uma visão geral de quatro desafios atuais cuja solução será determinante na viabilidade deste tipo de reatores como fonte de energia no futuro.

Introdução

Existem diversas propostas para a produção de energia elétrica através de reações de fusão nuclear. De todas elas, a que se encontra num nível de investigação mais avançado é, sem dúvida, o confinamento magnético num *tokamak*, um reator em forma de donut que possui um campo magnético toroidal muito forte (produzido por bobinas poloidais) que confina as partículas, *prendendo-as* às linhas de campo (ver Fig. 1).

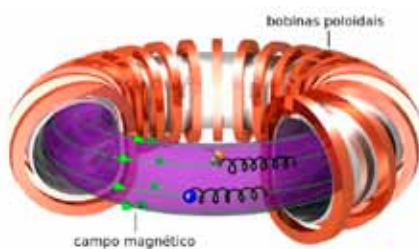
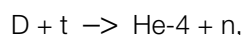


Fig. 1 - Esquema de um tokamak

O combustível dos futuros reatores de fusão nuclear será constituído pelos isótopos de hidrogénio deutério (D) e trítio (T) que se fundem na forma



libertando esta reação uma energia de 17,6 MeV sob a forma de energia cinética do hélio-4 e do neutrão (n), e que será recolhida e transformada em energia elétrica. A temperatura dentro de um reator de fusão é cerca de 10^8 K, que é, nada mais nada menos, uma ordem de grandeza acima da temperatura no centro do nosso Sol. Obviamente que a estas temperaturas os átomos de D e T encontram-se

ionizados. Temos então uma sopa de eletrões e iões dentro dos nossos reatores de fusão, ou seja, um plasma [1].

O início da fusão nuclear data de meados do século passado e, deste então, uma longa história tem vindo a ser escrita por uma comunidade internacional de cientistas empenhados em trazer à luz do dia uma nova forma de energia limpa, segura e (quase) infinita. Muitos *tokamaks* foram construídos, muita tecnologia foi inventada, mas os obstáculos sempre pareceram mais do que as soluções. Afinal, estamos a falar de um reator onde é necessário confinar partículas carregadas através de campos magnéticos extremamente elevados, de forma a atingir temperaturas muito altas sem comprometer os materiais que constituem as paredes internas do reator.

Em 2012, foram traçados oito objetivos sob o acordo *European Roadmap to fusion energy* assinado por 28 países europeus, de entre os quais Portugal faz parte através do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN), e que dita as oito missões a cumprir de forma a ter-se eletricidade produzida por fusão em 2050 [2].

Neste artigo, pretende-se fazer a análise de algumas dessas missões, nomeadamente o estado em que se encontram, e de outros aspetos tecnológicos relevantes sem os quais dificilmente se produzirá energia elétrica por esta via de forma sustentável.

1. Exaustão do calor – configuração com um divisor

Após a reação do deutério com o trítio, o neutrão produzido escapa para as paredes do reator onde a sua energia será recolhida. Já o núcleo de hélio, como é carregado, fica preso às linhas de campo magnético. Contudo, além de circular às voltas das linhas de campo, irá também difundir perpendicularmente a elas em direção às paredes. É quando chega à fronteira do plasma que é transportado ao longo das linhas de campo abertas em direção

ao divisor em vez de ir contra as paredes – ver Fig 2. O objetivo do divisor é então recolher a energia do hélio que lá chega assim como fazer a sua exaustão e de outras eventuais impurezas. Note-se contudo que as placas do divisor vão estar sujeitas a um fluxo de calor de 10 MW/m^2 [3], o que é um grande desafio do ponto de vista da conservação do material de que é feito (em termos de comparação, este valor é uma ordem de grandeza acima do valor a que uma nave espacial está sujeita ao reentrar na atmosfera).

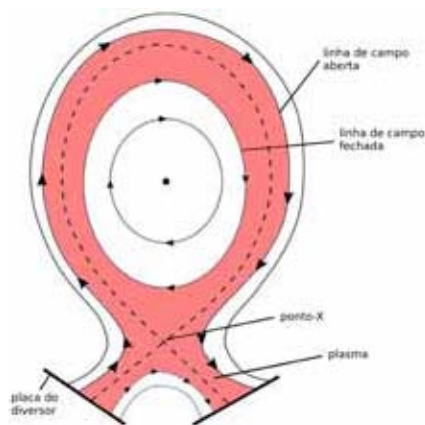


Fig. 2 - Secção poloidal do tokamak. Note-se na localização das placas do divisor.

Muitos dos primeiros divisores implementados eram feitos de grafite, mas a retenção de deutério e trítio era enorme já que o carbono se gosta de ligar aos átomos de hidrogénio para formar hidrocarbonetos. As perdas de combustível com placas de carbono eram, assim, insustentáveis e outra alternativa foi encontrada: tungsténio, que é um material, entre várias outras vantagens, com uma taxa de retenção de hidrogénio bastante mais baixa. Esta não é, no entanto, a única solução projetada para o futuro a longo prazo quando a potência térmica dos reatores for significativamente superior às atuais. Nesses casos, o tungsténio poderá não ser vantajoso e, como tal, atualmente uma das áreas de investigação mais ativas consiste no desenvolvimento de divisores de metal líquido [4], que, do ponto de vista teórico, são indubitavelmente superiores, mas que ainda têm um longo caminho pela frente até serem viáveis do ponto de vista prático.

2. Bobinas supercondutoras

Quanto maior for o campo magnético toroidal produzido pelas bobinas poloidais, maior será o tempo de confinamento das partículas no centro do plasma uma vez que estas se encontram mais agarradas às linhas de campo e a taxa com que difundem para as paredes do reator é menor. Recordemos que para uma bobina produzir um campo mais intenso, é necessário que a corrente que flui nela seja mais elevada; ora esta corrente é óhmica e, portanto, dissipa calor com o quadrado da corrente (lei de Ohm). Como tal, para compensar as

perdas, é necessário fornecer uma potência muito elevada às bobinas. Tomemos como exemplo o caso do JET, um tokamak no Reino Unido com bobinas de cobre, onde a potência elétrica fornecida às bobinas é da ordem dos 500 MW (cerca de duas ordens de grandeza acima da potência atualmente produzida pelas reações de fusão!) [5]. Devido a esta elevada potência que é necessário fornecer, as bobinas apenas podem trabalhar durante algumas dezenas de segundos e, durante esse tempo, são constantemente arrefecidas com água, caso contrário derreteriam.

Em suma, se queremos tempos de confinamento maiores e uma fração de potência elétrica que alimenta as bobinas não muito elevada (para que o reator de fusão seja economicamente viável), não podemos arquitetar bobinas óhmicas para o futuro. A solução está em usar bobinas supercondutoras (SC) já que a resistividade de um material supercondutor é nula e, portanto, não dissipa calor. O primeiro *tokamak* a operar com bobinas deste tipo foi o T-7 na URSS em 1979. Atualmente, existem mais *tokamaks* a operar com bobinas SC de NbTi (nióbio-titânio), mas projeta-se que no futuro os campos magnéticos mais fortes serão produzidos por Nb_3Sn (trinióbio de estanho).

Apesar de não haver dissipação óhmica num supercondutor, isso não significa que não se gaste energia durante o seu funcionamento. Aliás, as bobinas consomem dezenas de megawatts para funcionar. Porquê? Porque estes materiais referidos só se tornam SC a temperaturas muito baixas, aproximadamente a 4 K, e isso significa que é necessário um sistema de refrigeração a hélio líquido bastante rigoroso.

Mas a história da supercondutividade não fica por aqui. Em março de 2018, foi anunciada uma colaboração entre o MIT e uma companhia privada, a *Commonwealth Fusion Systems*, para a construção de um protótipo de reator mais pequeno do que os tokamaks convencionais e com bobinas SC a *alta* temperatura feitas de óxido de ítrio-bário-cobre [6]. Este material apresenta características SC a temperaturas mais elevadas do que os materiais já referidos (a cerca de 140 K), o que significa que os gastos energéticos e económicos com o sistema de refrigeração são menores. Apesar de ser um material bastante promissor, preveem-se ainda pelo menos três anos de investigação para provar que, de facto, este material é viável para a construção das bobinas.

3. Paredes resistentes aos neutrões

Como vimos no início, um dos produtos da reação de fusão é o neutrão com uma energia de aproximadamente 14 MeV (os restantes 3,6 MeV pertencem ao hélio). Os neutrões, uma vez que não têm carga, não ficam presos às linhas de campo magnético e fogem imediatamente para as paredes do reator. Estas possuem três funções distintas: produzir trítio a partir dos neutrões que chegam, absorver a sua energia cinética e proteger as outras partes do reator por trás das paredes, nomeadamente as bobinas e o criostato. A parede, ou *blanket* no termo inglês, é assim bastante complexa, sendo constituída por diferentes componentes como se pode ver na Fig. 3.

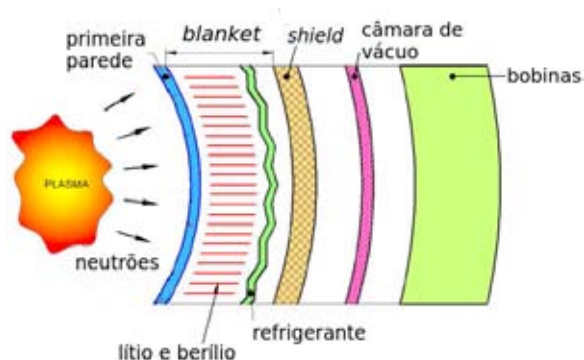


Fig. 3 - Esquema do *blanket* (parede) de um tokamak

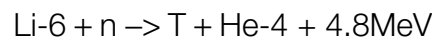
Quando um material, especialmente se for metal, é sujeito à irradiação de neutrões, as suas propriedades mudam de três formas distintas: incha (ou seja, as suas dimensões aumentam), fica mais duro (i.e., o comportamento plástico surge a pressões mais elevadas) e fica mais quebradiço (ou seja, parte-se a uma temperatura menor do que antes de ser irradiado). Todos estes fenómenos devem ser tidos em conta quando se arquitetam as paredes do reator, nomeadamente a *primeira parede* que está sujeita ao primeiro impacto; se o material de que é constituída não for otimizado para tal, então não vai sobreviver muito tempo. Há ainda outro aspeto importante a ter em conta que tem que ver com a ativação dos materiais após serem irradiados por neutrões.

Estas restrições, material forte e que não se torne radioativo após irradiação por neutrões, levam a que o material de eleição para a primeira parede seja o Eurofer [7], um aço inoxidável, onde o tradicional níquel é substituído por crómio devido à ativação do primeiro com neutrões. Esta liga, apesar de cumprir estes dois requisitos essenciais, tem um problema: a partir de temperaturas da ordem dos 500 °C começa a perder a sua rigidez; uma vez que se pretende que o refrigerador do *blanket* esteja entre os 800 °C-1000 °C (já que a eficiência da conversão em energia elétrica é superior a temperaturas mais altas), então a janela de temperatura do Eurofer poderá comprometer o desempenho do reator e outra solução terá de ser encontrada [3].

Existe, portanto, uma grande necessidade de se realizarem testes que validem não só o Eurofer, mas todos os outros materiais dentro do reator expostos à irradiação de neutrões. Para resolver esta questão, a comunidade de fusão propôs a construção do IFMIF - *International Fusion Irradiation Facility* -, onde serão produzidos fluxos de neutrões relevantes, i.e. da ordem daqueles que se espera nos futuros reatores, e com o pico de energia nos 14 MeV. A sua construção deverá iniciar-se no início da próxima década e é tida como um passo fundamental para o futuro dos reatores de fusão.

4. Produção de trítio autossuficiente

Tal como já foi referido, uma das funções do *blanket* do reator é a produção de trítio. Enquanto que o deutério existe com bastante abundância na água do mar, o trítio existe de forma residual na natureza já que tem uma semivida de 12,3 anos. Os reatores de fusão terão assim de produzir o seu próprio trítio através de uma reação com lítio que será um dos metais presentes na parede:



À primeira vista tudo parece ser fantástico: temos lítio nas paredes, o neutrão provém das reações de fusão no plasma, produzimos trítio e ainda ganhamos 4.8 MeV de graça. Não é, no entanto, assim tão simples uma vez que nem todos os neutrões vão reagir com o lítio: o *blanket* é finito e, por isso, existirão sempre perdas, os neutrões que forem parar à área do divisor não são recuperáveis, e também há neutrões que vão simplesmente ser absorvidos na primeira camada da parede, não chegando ao lítio. É, então, necessário um multiplicador de neutrões para compensar estas perdas, o que é conseguido através da reação dos neutrões com berílio ou chumbo. É assim possível ter um número de átomos de trítio produzido nas paredes por cada neutrão produzido no plasma, o chamado TBR (*Tritium Breeding Ratio*) [8], igual a 1. Ainda assim, isto não é suficiente. É preciso ter um TBR acima de 1 por três razões: o trítio tem uma semivida relativamente curta o que significa que a cada ano se perde 6 % do stock armazenado; há perdas inevitáveis uma vez que o combustível está sempre a ser reciclado passando pelas bombas de vácuo e todas as outras tubagens; cada reator deve produzir uma quantidade de trítio suficiente para que outro novo reator tenha trítio para começar a trabalhar (~7 kg).

A produção de trítio de forma autossuficiente é assim um dos grandes desafios. O ITER, que é o maior tokamak a ser construído atualmente, não irá produzir o seu próprio trítio (à semelhança de todos os outros tokamaks existentes atualmente), mas serão realizadas várias provas de conceito com diferentes tipos de *blanket* de forma a testar a sua viabilidade.

Conclusão

O acordo *European Roadmap to fusion energy* foi assinado por 28 países europeus em 2012 e tinha em vista traçar as missões prioritárias a serem cumpridas para trazer energia elétrica produzida em reatores de fusão nuclear à luz do dia. Das oito missões que constam do documento [2], três delas foram referidas neste artigo (os pontos 1, 3 e 4). Um outro ponto, o das bobinas SC, foi aqui explorado por estar na linha da frente no que a nova tecnologia diz respeito. Em todos os desafios aqui explorados verificámos uma semelhança: existem soluções a curto prazo, mas que, a longo prazo, o que na gíria de fusão corresponde invariavelmente a cenários de reatores com potências térmicas bastante superiores, essas mesmas soluções poderão não ser escaláveis e, portanto, alternativas serão necessárias. Atualmente já existem mestrados em Fusão Nuclear em vários países da Europa [9], onde os alunos se especializam nesta matéria. Isto demonstra não só a sua importância, mas também o quão necessário é continuar a fazer investigação nesta área. Só assim é que se derrubarão as barreiras que nos impedem de chegar ao futuro.

Referências

- [1] Os princípios básicos das reações de fusão nuclear assim como os conceitos elementares relacionados com a forma de operação de um tokamak já foram abordados em pelo menos dois artigos da Gazeta: M. E. Manso e C. A. F. Varandas, "Fusão Nuclear, Uma opção energética para o futuro", *Gazeta da Física*, Vol. 29, Fascículo 1-2 (2006); C. Varandas, "O ITER no caminho para a energia de Fusão Nuclear", *Gazeta da Física*, Vol. 32, Nº 1 (2009)
- [2] EUROfusion, "European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy" (<https://www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>)
- [3] A. J. H. Donné et al, "Scientific and technical challenges on the road towards fusion electricity", *Journal of Instrumentation*, Vol. 12 (2017)
- [4] T. W. Morgan et al, "Liquid metals as a divertor plasma-facing material explored using the Pilot-PSI and Magnum-PSI linear devices", *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 60, Nº 1 (2018)
- [5] J. L. Duchateau, "Superconducting magnets for fusion", *Clefs CEA*, Nº 56 (Winter 2007-2008)
- [6] MIT, "MIT and newly formed company launch novel approach to fusion power" (<http://news.mit.edu/2018/mit-newly-formed-company-launch-novel-approach-fusion-power-0309>)
- [7] Fusion For Energy, "Test Blanket Modules" (<http://fusionforenergy.europa.eu/media-corner/newsview.aspx?content=955>)
- [8] M. Mahdavi e E. Asadi, "Estimates of Tritium Produced Ratio in the Blanket of Fusion Reactors", *Open Journal of Microphysics*, Vol. 3, Nº. 1, pp. 8-11 (2013).
- [9] Dois exemplos são os mestrados em Eindhoven University of Technology e University of York.



António Coelho, é finalista do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica no IST. Representou Portugal na XIX Olimpíada Ibero-americana, tendo aí obtido uma menção honrosa. A sua área de eleição é a física dos plasmas, encontrando-se atualmente a realizar a sua tese de mestrado em fusão nuclear.

1919-2019: um século de Lentes Gravitacionais

Carlos Herdeiro¹

¹Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Entre as muitas efemérides científicas que se celebram em 2019 destaca-se o centenário da observação da deflexão da luz pelo Sol. Este efeito corresponde ao segundo teste clássico da Relatividade Geral, sendo o primeiro a explicação do avanço anómalo do periélio de Mercúrio. No entanto, foi na verdade a primeira confirmação de uma previsão da teoria. E não foi apenas bem sucedida; foi um autêntico fenómeno e fez de Albert Einstein uma celebridade mundial.

Apesar de a previsão teórica (final) ser de Novembro de 1915, a confirmação observacional apenas foi possível em 1919, em virtude da primeira Guerra Mundial que dificultava a organização de uma expedição para medir o efeito. Em Março de 1917, o astrónomo real britânico, Sir Frank Watson Dyson, salientou a excelência da configuração das estrelas do eclipse que iria ocorrer a 29 de Maio de 1919, para o propósito de medir a deflexão prevista pela teoria de Einstein. Formaram-se duas expedições inglesas, destinadas a dois pontos geográficos na faixa de totalidade do eclipse: uma a Sobral no Brasil, chefiada por Andrew Crommelin do observatório de Greenwich e outra à ilha do Príncipe, no arquipélago de São Tomé e Príncipe, na altura território Português, chefiada por Arthur Eddington de Cambridge.

O objetivo das expedições foi medir a deflexão da luz prevista pela Relatividade Geral: $1,75^\circ$ para um raio de luz tangente ao Sol. As observações teriam de ser feitas durante um eclipse total, altura em que seria possível ver estrelas muito próximas do Sol. Fotografias do campo de estrelas seriam tiradas durante o eclipse e comparadas com fotografias do mesmo campo de estrelas quando o Sol não estava presente, determinando-se o deslocamento angular de cada estrela.

Os resultados foram apresentados a 6 de Novembro de 1919, numa reunião conjunta da *Royal Society* e da *Royal Astronomical Society*. Como Abraham Pais relata na biografia científica de Einstein “Subtil é o senhor”, Dyson, assistido por Crommelin e Eddington afirmou, sob o retrato de Newton, “Após um estudo cuidadoso das placas estou preparado para afirmar que elas confirmam a previsão de Einstein”.

Este anúncio capturou a atenção de um mundo desgastado pela Grande Guerra - ver, por exemplo, as parangonas do *New York Times* de 10 de Novembro de 1919, figura anexa.

**LIGHTS ALL ASKEW
IN THE HEAVENS**

**Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.**

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

**Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.**

A BOOK FOR 12 WISE MEN

**No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.**

Artigo no *New York Times* de 10 de Novembro de 1919 sobre a medição da deflexão da trajetória da luz pelo Sol e a confirmação da Teoria de Einstein.

Dar protagonismo à confirmação de uma previsão (extraordinária!) de um cientista alemão, pacifista, por uma equipa britânica, poderia ter o efeito de ajudar a cicatrizar feridas bélicas. Foi no contexto desta confirmação que Einstein, rendido à teoria da Relatividade

Geral, pela sua elegância e consistência interna, terá comentado que “teria pena do Todo Poderoso se os resultados não tivessem concordado com a teoria”. Um retrato curioso, ainda que parcialmente romançado, sobre a relação entre Einstein e Eddington, as suas personalidades, a teoria do primeiro e a expedição do segundo é dado no filme da BBC e HBO “Einstein e Eddington” de 2008.

Na verdade as observações de 1919 não evitavam possíveis erros sistemáticos. Várias expedições semelhantes ocorreram nas décadas seguintes, mas padecendo de problemas semelhantes. Por volta de 1960 apenas era consensual que o valor da deflexão seria certamente mais do que $0,83''$, metade do valor de Einstein. Este é o valor “newtoniano”, obtido por Soldner em 1801. Atribuindo-se uma massa às partículas de luz, a teoria newtoniana também prevê uma deflexão (que é independente da massa escolhida). Este valor foi re-publicado por Lénard em 1921, um conhecido Nazi, para desacreditar “a ciência judaica” de Einstein. O assunto não estava esclarecido e apenas depois de 1960 foi o valor de Einstein foi confirmado com exatidão.

A deflexão da luz de uma fonte longínqua devido à distorção do espaço-tempo causado por massas entre o observador e a fonte é o que se denomina por “efeito de lente gravitacional”. O efeito medido em 1919 é um efeito “fraco” de lente gravitacional. Deflexões extremas da trajetória da luz ocorrem, por exemplo, perto de buracos negros, que são lentes gravitacionais fortes. Curiosamente, espera-se que este ano, 2019, surgiram as primeiras imagens de uma experiência para medir este efeito forte de lente gravitacional, por uma colaboração internacional denominada “Event Horizon Telescope”. Estas imagens são um versão rudimentar (mas real!) da espetacular visualização do buraco negro ficcional “Gargantua”, do filme “Interstellar”. O efeito de lente gravitacional tem múltiplas aplicações em astrofísica e cosmologia, por exemplo, para estimar a matéria escura do Universo.

As expedições de 1919 serão celebradas de várias formas no seu centenário. Em particular destacam-se as iniciativas para celebrar a presença de Eddington na roça Sundry, na ilha do Príncipe, onde as observações de Maio de 1919 foram feitas (esundry.org), às quais a Sociedade Portuguesa de Física se associa.

Será que as Aprendizagens Essenciais podem contribuir para a melhoria da qualidade das aprendizagens dos alunos?

Carlos Portela¹

¹Escola Secundária Dr. Joaquim de Carvalho, Figueira da Foz

As *Aprendizagens Essenciais* (AE) de Físico-Química (7.º, 8.º e 9.º), de Física e Química A (10.º e 11.º), de Física (12.º) e de Química (12.º) [1] foram elaboradas pela Direção-Geral de Educação (DGE) em parceria com equipas de professores indicados pela Sociedade Portuguesa de Física (SPF) e pela Sociedade Portuguesa de Química (SPQ), durante os anos letivos 2016/17 e 2017/18.

As equipas incluíram professores do 3.º ciclo do ensino básico (3.º CEB), do ensino secundário e do ensino superior que trabalharam de forma integrada, tendo havido sugestões para a componente de química da parte da equipa da SPF e sugestões para a componente de física por parte da equipa da SPQ, uma vez que os professores de ambas as equipas tinham experiência de ensino das duas componentes dos programas, física e química.

No sentido de estabelecer ligações entre os programas de diferentes disciplinas, a DGE promoveu reuniões que envolveram, para além das equipas da SPF e da SPQ, equipas das seguintes associações: Associação Nacional de Professores de Informática (ANPRI), Associação Profissional de Educadores de Infância (APEI), Associação de Professores de Matemática (APM), Associação Portuguesa de Professores de Biologia e Geologia (APPBG) e Associação Portuguesa de Telemática Educativa (Educom-APTE). Deste trabalho de articulação entre diferentes áreas do saber resultaram algumas das ligações interdisciplinares que integram as AE.

Balço do trabalho realizado

As AE são “documentos de orientação curricular base na planificação, realização e avaliação do ensino e da aprendizagem, conducentes ao desenvolvimento das competências inscritas no Perfil dos Alunos à saída da escolaridade obrigatória (PA)” [2].

A elaboração das AE baseou-se na identificação das aprendizagens estruturantes nos documentos curriculares em vigor (orientações curriculares e metas curriculares no ensino básico; programas e metas curriculares no ensino secundário), tendo em vista um ensino mais prático que coloque o aluno no centro das aprendizagens, que facilite o desenvolvimento de aprendizagens mais profundas, em que

se desenvolvam competências que requeiram mais tempo (realização de trabalhos que envolvem pesquisa, análise, raciocínios demonstrativos, avaliação, argumentação, metacognição, etc.) e que permita uma efetiva diferenciação pedagógica na sala de aula.

Assim, as AE salientam as ideias estruturantes (*big ideas*) das metas curriculares e do programa, e na sua redação integram não só o conjunto de conhecimentos a adquirir, mas também as capacidades e as atitudes a desenvolver, mantendo os domínios e os subdomínios estabelecidos pelas metas curriculares e pelo programa.

Documentos curriculares em vigor e o papel das Aprendizagens Essenciais (AE)

No 3.º CEB, as *Orientações Curriculares para o 3.º Ciclo do Básico: Ciências Físicas e Naturais* [3] são o documento de referência para as disciplinas de Ciências Físico-Químicas e de Ciências Naturais, e as *Metas Curriculares do 3.º Ciclo do Ensino Básico: Ciências Físico-Químicas* [4] (em vigor a partir do ano letivo 2014/2015), estabelecem o essencial das aprendizagens que os alunos devem alcançar na disciplina de Físico-Química, podendo os professores ir além do que está indicado nesses documentos.

No ensino secundário, na disciplina de Física e Química A (10.º e 11.º), o *Programa de Física e Química A* [5], que inclui as Metas Curriculares (em vigor a partir do ano letivo 2015/16), e na disciplina de Física (12.º), o *Programa de Física, 12.º ano* [6] e as *Metas curriculares de Física, 12.º ano* [7], são os documentos de referência. As Metas identificam as aprendizagens essenciais a realizar pelos alunos, realçando o que dos programas deve ser objeto primordial de ensino.

As AE identificam os conhecimentos, capacidades e atitudes estruturantes, baseando-se no programa e metas em vigor, tendo sido formuladas de modo a:

- desenvolver, nos alunos, o raciocínio e a capacidade de resolver problemas;
- estimular a autonomia e o desenvolvimento pessoal dos alunos;
- promover o desenvolvimento de um ensino mais prático;
- promover a ligação com as áreas de competências previstas no perfil do aluno.

Assim, as AE partem dos conceitos estruturantes dos programas e metas em vigor articulando-os com capacidades e atitudes (“conteúdos de conhecimento disciplinar estruturado, indispensáveis, articulados conceptualmente, relevantes e significativos, bem como de capacidades e atitudes a desenvolver obrigatoriamente por todos os alunos”, artigo 3.º do Decreto-Lei n.º 55/2018). A ideia de que o programa é uma justaposição de conteúdos parte de um referencial que considera os conteúdos como aditivos, portanto, de uma visão superficial do ensino e da aprendizagem. A identificação das AE pretende contribuir para a mudança da forma como se ensina e como se aprende: colocar o trabalho prático e o trabalho experimental no centro da construção das aprendizagens, por forma a desenvolver aprendizagens profundas e não superficiais. Pretende-se ensinar mais, pois uma aprendizagem profunda permite um maior desenvolvimento dos domínios cognitivos de nível elevado e, portanto, permite aprender mais.

As AE são a “orientação curricular de base, para efeitos de planificação, realização e avaliação do ensino e da aprendizagem” (artigo 17.º do Decreto-Lei n.º 55/2018 de 6 de julho), todavia, sem o confronto com os programas e metas não funcionam como uma orientação adequada. A propósito de orientação curricular, convém contrariar a retórica das “novas metodologias”, pois, muito do que as AE visam já estava presente nos documentos curriculares anteriores, como se pode comprovar pela leitura comparativa dos objetivos gerais do Programa de Física e Química A e, por exemplo, do que é visado pelas AE do 10.º ou 11.º anos daquela disciplina.

Transcreve-se, a seguir, os objetivos gerais do Programa de Física e Química A:

“Consolidar, aprofundar e ampliar conhecimentos através da compreensão de conceitos, leis e teorias que descrevem, explicam e preveem fenómenos assim como fundamentam aplicações. Desenvolver hábitos e capacidades inerentes ao trabalho científico: observação, pesquisa de informação, experimentação, abstração, generalização, previsão, espírito crítico, resolução de problemas e comunicação de ideias e resultados nas formas escrita e oral. Desenvolver as capacidades de reconhecer, interpretar e produzir representações variadas da informação científica e do resultado das aprendizagens: relatórios, esquemas e diagramas,

gráficos, tabelas, equações, modelos e simulações computacionais.

Destacar o modo como o conhecimento científico é construído, validado e transmitido pela comunidade científica.” [5], p. 3.

Transcreve-se, a seguir, o que as AE de Física e Química A visam:

“Consolidar, aprofundar e ampliar conhecimentos através da compreensão de conceitos, leis e teorias que descrevem, explicam e preveem fenómenos, assim como fundamentam aplicações em situações e contextos diversificados;

Desenvolver hábitos e competências inerentes ao trabalho científico: observação, pesquisa de informação (selecionar, analisar, interpretar e avaliar criticamente informação relativa a situações concretas), experimentação, abstração, generalização, previsão, espírito crítico, resolução de problemas e comunicação de ideias e resultados, utilizando formas variadas;

Desenvolver competências de reconhecer, interpretar e produzir representações variadas da informação científica e do resultado das aprendizagens: relatórios, esquemas e diagramas, gráficos, tabelas, equações, modelos e simulações computacionais;

Destacar o modo como o conhecimento científico é construído, validado e transmitido pela comunidade científica e analisar situações da história da ciência;

Fomentar o interesse pela importância do conhecimento científico e tecnológico na sociedade atual e uma tomada de decisões fundamentada procurando sempre um maior bem-estar social.” [1], p. 2.

Esta consonância entre o programa de Física e Química A e as AE deverá contribuir para uma desejável continuidade nos processos de transformação do ensino e da aprendizagem, de modo a valorizar os pontos fortes do trabalho desenvolvido pelos professores (por exemplo, o conhecimento das principais dificuldades dos alunos) e, ao mesmo tempo, promover uma autoavaliação crítica que permita a melhoria dos pontos fracos (por exemplo, a utilização excessiva de métodos expositivos).

Conclui-se que a planificação, realização e avaliação do ensino e da aprendizagem exige uma leitura crítica e articulada dos vários documentos (aprendizagens essenciais, programas e metas curriculares). Nessa leitura crítica, as AE assumem um papel que é transversal aos vários domínios e, por isso, transferível entre contextos diversificados.

Perspetivas para o futuro

O impacto da identificação das AE no processo de ensino-aprendizagem será o que resultar da ação dos professores em interação com os alunos. Os resultados dependerão não só do modo como os professores se apropriarem destes documentos, em particular, as implicações em termos de mudanças de práticas de ensino, e da eficácia dessas práticas em termos da qualidade das aprendizagens dos alunos, mas, também, das ações promovidas pelo Ministério da Educação por forma a criar condições favoráveis a essa mudança de práticas.

A definição do Perfil do Aluno e a identificação das AE não permitem, só por si, a mudança de práticas de ensino que se pretende. Sem um investimento significativo na formação de professores, sem uma forte motivação dos professores, sem a melhoria da qualidade do trabalho colaborativo entre professores e sem a renovação da estrutura etária do corpo docente não parece ser possível que o trabalho desenvolvido pelos professores possibilite que os alunos desenvolvam as competências previstas no Perfil dos Alunos à saída da escolaridade obrigatória.

Parece ainda existir uma contradição entre flexibilização curricular e avaliação externa. Todavia, se o enfoque for o desenvolvimento de competências transversais, os alunos ficarão em melhores condições para enfrentar um exame nacional, sobretudo quando se compara com a preparação usual, intensiva e com base em rotinas, mas que não desenvolve aprendizagens profundas (estruturantes, articuladas entre si e transferíveis para outros contextos).

Referências

1. *Aprendizagens essenciais de Físico-Química, de Física e Química A, de Física e de Química* (2018). Ministério da Educação: Direção-Geral da Educação.
2. Martins, G. O. et al. (2017) Perfil dos Alunos à Saída da Escolaridade Obrigatória. Ministério da Educação: Direção-Geral da Educação
3. Galvão, C. et al. (2001) Orientações Curriculares para o 3.º ciclo do ensino básico: ciências físicas e naturais. Ministério de Educação: Departamento de Educação Básica.
4. Fiolhais, C. et al. (2013) Metas Curriculares do 3.º Ciclo do Ensino Básico - Ciências Físico-Químicas. Ministério da Educação e Ciência: Direção-Geral da Educação
5. Fiolhais, C. et al. (2014) Programa de Física e Química A, 10.º e 11.º anos - Curso científico-humanístico de Ciências e Tecnologias. Ministério da Educação e Ciência.
6. Fiolhais, M. et al. (2004) Programa de Física, 12.º ano - Curso científico-humanístico de Ciências e Tecnologias. Ministério da Educação: Direção-Geral de Inovação e de Desenvolvimento Curricular
7. Fiolhais, C. et al. (2014) Metas Curriculares de Física, 12.º ano - Curso científico-humanístico de Ciências e Tecnologias. Ministério da Educação e Ciência.



Carlos Portela, obteve a Licenciatura em Física - Ramo Educacional e o Mestrado em Ensino da Física e da Química pela Universidade de Coimbra. É professor de Física e Química na Escola Secundária Dr. Joaquim de Carvalho, Figueira da Foz. Foi membro do Conselho Consultivo do Gabinete de Avaliação Educacional e dos Conselhos Científico e Geral do Instituto de Avaliação Educativa. Coordenou a Divisão de Educação da Sociedade Portuguesa de Física. Participou na elaboração dos documentos curriculares em vigor para o 3.º ciclo do ensino básico e para o ensino secundário, na área da Física: Metas Curriculares, Programas e Aprendizagens Essenciais. É coautor e revisor científico-pedagógico de manuais escolares. Mantém o sítio web Vídeos para o Ensino das Ciências: <https://sites.google.com/site/videosfq/>.

Qual voa mais tempo?

Constança Providência¹

¹ Centro de Física, Universidade de Coimbra

Material

- Papel
- Régua
- Lápis
- Cronómetro
- Caderno

Avião de papel

Estou certa que já te perguntaste porque voam os aviões. Os irmãos Wright, dois americanos dos Estados Unidos da América, foram os primeiros homens a construírem um avião cujo voo podia ser controlado. Desde então os aviões têm sofrido um desenvolvimento enorme e, presentemente, já podes voar num avião de dois andares, o Airbus A380-800, que leva até 555 passageiros e pode realizar voos de 14 800 km sem parar. O desenvolvimento dos aviões a nível do design, da segurança, do tamanho e da potência tem sido o resultado do trabalho de muitas pessoas entre as quais os engenheiros aeroespaciais.

São as leis da física que explicam porque voa um avião, um avião real ou um avião de papel como o que vou propor que construas. O movimento na vertical é determinado pela força da gravidade e pela força de sustentação que o ar exerce, do mesmo modo que um barco também não se afunda devido à força que a água exerce sobre ele. A capacidade do ar de sustentar o avião é definida pelo tamanho e forma das asas. O movimento na horizontal é determinado pela resistência do ar, que se opõe ao movimento do avião, e pelo impulso que lhe transmite quando o lanças. Num avião real é o motor o responsável por este movimento.

Proponho-te que sejas uma engenheira ou um engenheiro de avões de papel e desenvovas o teu próprio modelo. O desafio que deixo é o de construíres um avião que consiga manter-se a voar o máximo de tempo possível. Para isso terás de perceber bem como funciona o avião e como o poderás afinar. Poderás também testar diferentes tipos

de papel e o modo como o dobras.

Constrói o seguinte modelo muito simples mas que voa muito bem. Pega numa folha de papel A4 e marca 8 linhas transversais que distem cerca de 2 cm umas das outras como mostra a Figura 1a) (linhas de 1 a 8). Dobrar pelas linhas que marcaste: dobra da linha 1 para a linha 2, e depois da linha 2 para a linha 3, etc, até dobrares pela linha 8. Vinca bem cada dobra que fizeres. Mesmo que não consigas dobrar bem pelas linhas que marcaste, não faz mal, o importante é teres o cuidado de fazeres dobras todas paralelas umas às outras para no final o avião ficar bem equilibrado. Para ser mais fácil fazeres as dobras paralelas marca com uma linha ao comprido o centro da folha A4, e, para cada dobra que fizeres verifica que o centro da dobra se mantém alinhado. Quando tiveres feito as oito dobras transversais, dobra o retângulo que obtiveste ao meio (linha 9 a ponteadado), mantendo o rolo, que resultou das dobras sucessivas, para fora como mostra a Figura 1b). Finalmente dobra ao longo das duas linhas paralelas à linha central, linhas 10 e 11. No final ficas com um retângulo com cerca de 11cm por 8 cm, Figura 1c). Segura pela quilha do avião, a parte central em V, e ergue as asas de modo que o perfil do avião tenha a forma indicada na Figura 2. As asas devem estar acima do plano horizontal como indicado na Figura 2b).

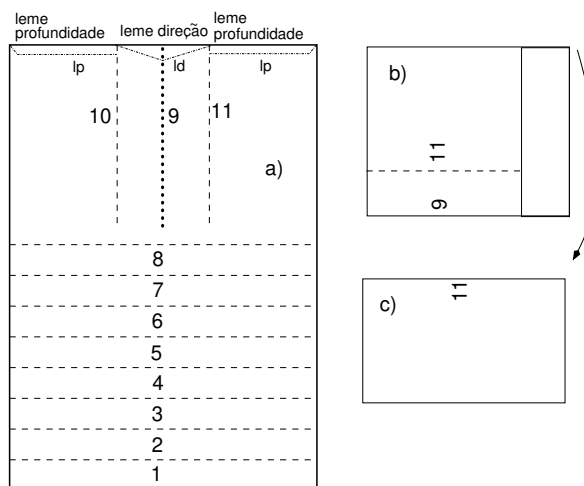


Fig. 1a) - Linhas pelas quais deves dobrar o avião, b) dobra pela linha 9, c) dobra pelas linhas 10 e 11 de modo a ficares com a linha 9 para dentro.

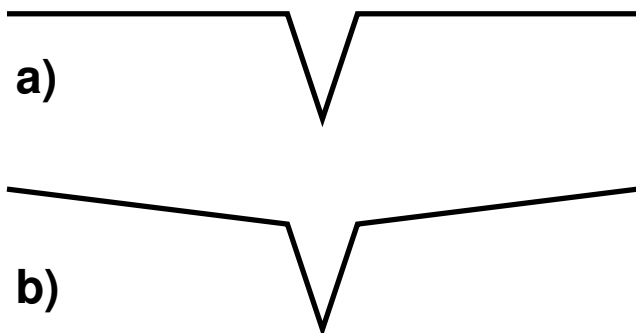


Fig. 2 - O avião de perfil de frente a) com as asas horizontais; b) com as asas ligeiramente para cima.

Agora começa a fase do aperfeiçoamento! Atira o avião com a parte mais pesada para a frente. O teu avião consegue planar ou depois de levantar cai a pique? Se cair a pique terás de o estabilizar fazendo uma ligeiras dobras para cima na extremidade das asas, ao longo das linhas ponteadas marcadas nas asas e designadas por 'lp' (Figuras 1 e 3). Chamamos a estas dobras lemes de profundidade. Será a resistência do ar que vai ajudar a controlar o teu avião desde que lhe faças as dobras corretas para desviarem o avião na direção que queres. Experimenta relançar o avião. E agora já consegue planar melhor? Podes dobrar mais ou menos e verificar qual a melhor posição dos lemes. O teu avião ainda pode ter outro tipo de problema: por exemplo vira sempre para a direita ou sempre para a esquerda. Nesse caso corrige o voo dobrando um pouco o leme de direção, indicado nas Figuras 1 e 3 com 'ld', para o lado contrário ao que o avião escolhe. Quando o avião estiver bem afinado pede a um colega para cronometrar o voo, e

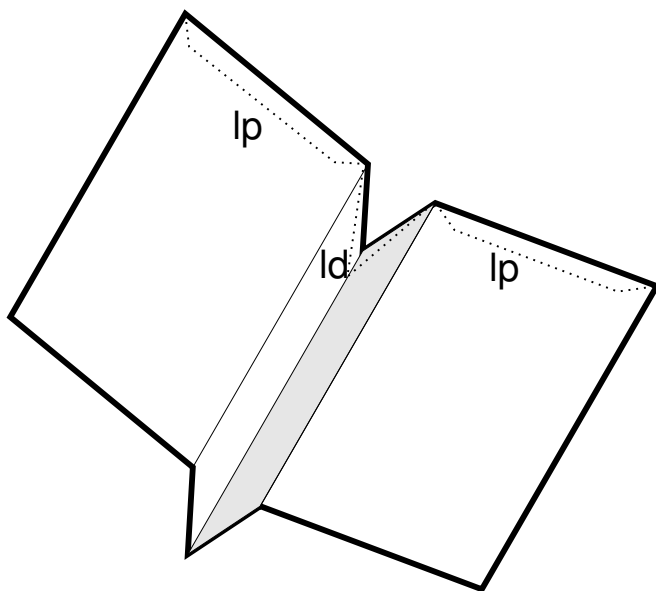


Fig. 3 - O avião com os lemes de estabilidade marcados: lp é o leme de profundidade e ld o leme de direção.

anota o tempo de voo.

Podes construir outros modelos alterando o papel, a largura das dobras, ou alterando um pouco a forma do avião, por exemplo, introduzindo as dobras 12 e 13 indicadas na figura 4, e repetindo o resto como no avião da figura 1. Este segundo modelo pode ser estabilizado dobrando as asas para

cima pelos tracejados 14 e 15 da Figura 4. Para cada modelo afina os lemes. Dá um número a cada modelo e toma nota das suas propriedades no teu caderno usando uma tabela, onde deves escrever o número do modelo e o tempo de voo. Para poderes repetir o melhor modelo, não te esqueças de indicar também o papel que usaste ou o tipo de dobras que fizeste.

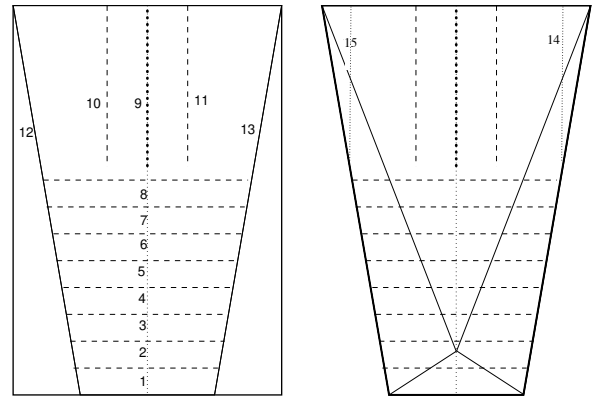


Fig. 4 - Um modelo um pouco mais complexo e com maior estabilidade.

Escolhe os teus melhores modelos e desafia os teus colegas para uma competição: concurso do avião que voa durante mais tempo. O concurso deverá ocorrer num espaço fechado grande como um ginásio, ou um corredor largo. Se não tiveres um espaço grande fechado faz o concurso ao ar livre num dia sem vento.



Fig. 5 - Avião terminado, após seguir a sequência de passos apresentados no texto e mostrados na Figura 6 da página seguinte.

Bibliografia

Ken Blackburn e Jeff Lammers, O livro dos aviões de papel, Könemann, 2004

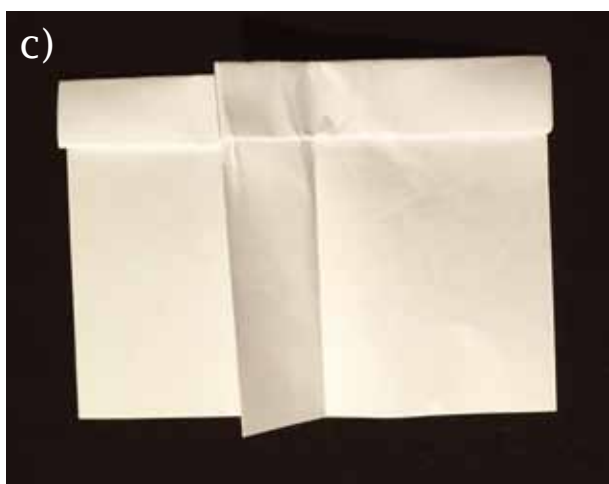
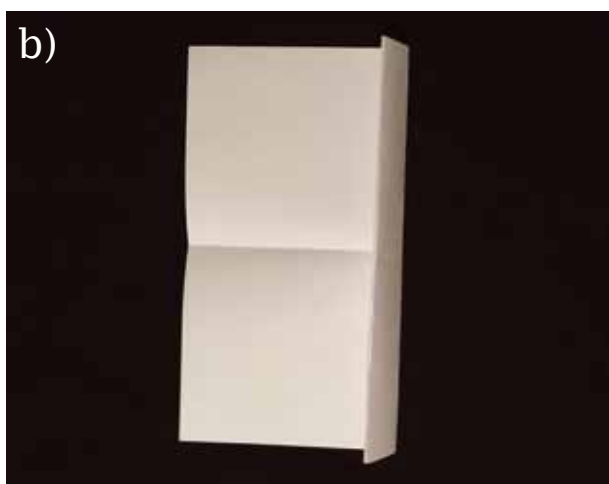
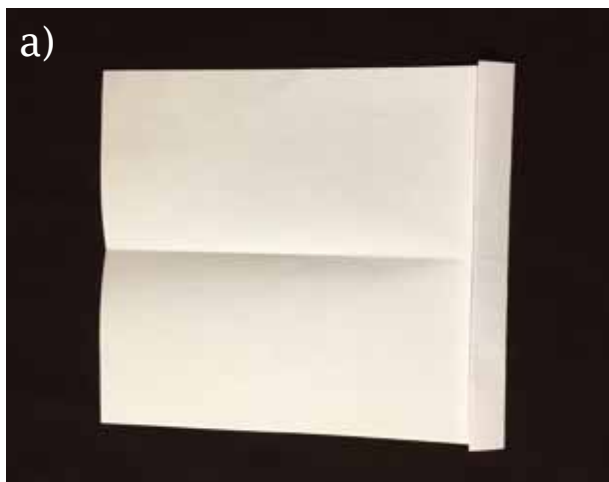


Fig. 6 - Fases sucessivas na construção do avião:
a) As primeiras três dobras transversais; b) As oito dobras transversais completas; c) Dobra pela linha 9 da figura 1a); d) Dobra pelas linhas 10 e 11 da figura 1a); e) o avião completo visto de cima; f) o avião completo visto de baixo.

Celebração do Dia Mundial da Metrologia 2019



O dia 20 de maio é o Dia Mundial da Metrologia que comemora o aniversário da assinatura da Convenção do Metro, em Paris, realizada a 20 de Maio de 1875, por representantes de 17 nações, entre os quais o de Portugal. A Convenção do Metro permitiu criar as bases de um sistema mundial de medições coerente, essencial para a investigação, inovação e divulgação científica, a produção e o comércio internacional, assim como para a melhoria da qualidade de vida e a proteção do ambiente. A estrutura criada pela Convenção do Metro tem por base a Conferência Geral dos Pesos e Medidas (CGPM), constituída atualmente por 59 Estados Membros que se reúne a cada 4 anos, o Comité Internacional dos Pesos e Medidas (CIPM), constituído por 18 personalidades dos Estados Membros que elabora propostas de resoluções à CGPM e o Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM) que, sob a autoridade da CGPM e a direção e vigilância do CIPM, realiza, nos seus laboratórios de investigação científica, o desenvolvimento e a manutenção dos padrões de medição ao mais elevado nível de exatidão, garantindo a universalidade e a rastreabilidade das medições. Nesta lógica, foi criada, em 1955, a Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML) que

elabora recomendações internacionais de carácter legal, com o objetivo de orientar e harmonizar os requisitos mundiais em correspondentes domínios de intervenção das medições, garantindo a exatidão dos resultados de medição em limites regulamentados, tornando as transações comerciais mais justas e eficazes e contribuindo para a correção, transparência e globalização do comércio e dos mercados mundiais.

O tema do Dia Mundial da Metrologia para 2019 é “O Sistema Internacional de Unidades – Fundamentalmente melhor”, porque, a 16 de novembro de 2018, a CGPM adotou uma das mais importantes revisões do Sistema Internacional de Unidades (SI) desde que foi criado em 1960. Embora o SI, o conjunto de unidades de medida aceite no mundo inteiro, tenha como objetivo estabelecer a sustentabilidade de medições estáveis a longo prazo, sempre foi um sistema prático e dinâmico que evoluiu, aproveitando os progressos técnico-científicos e os trabalhos realizados pelos mais avançados Laboratórios Nacionais de Metrologia que, tal como o Instituto Português da Qualidade (IPQ) em Portugal, desenvolvem novas técnicas de medição, validadas por participações em comparações coordenadas pelo BIPM. Os novos desenvolvimentos em domínios onde a utilização de fenómenos quânticos veio permitir o abandono de artefactos materiais vieram permitir as novas definições agora adotadas, baseadas em leis da Natureza.

O IPQ organiza, no próximo dia 20 de maio, um grande evento de relevância muito significativa para a Ciência, que decorrerá nas instalações do Museu de Eletricidade, da Fundação EDP, em Lisboa. Está prevista a participação do Diretor do BIPM, o Professor Doutor Martin Milton, e do Presidente do Comité Internacional de Metrologia Legal da OIML, o Professor Doutor Roman Schwartz, bem como de representantes nacionais e estrangeiros da Academia, em particular o Professor Sir Peter Knight que abordará a temática da Metrologia Quântica. Os interessados podem consultar o programa previsto e realizar a respetiva inscrição, até ao próximo dia 10 de maio, em:

<http://www.relacre.pt/pt/mediaevents/page/1/event/112>.

TABELA DE PUBLICIDADE 2018



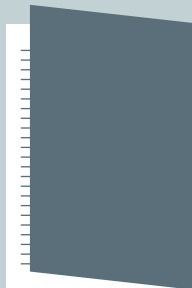
A) verso da capa



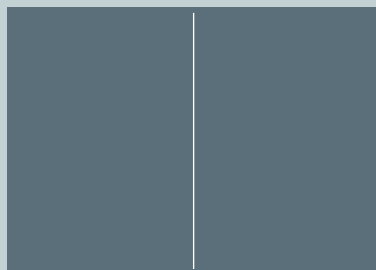
B) destacável/folha



C) verso da contracapa



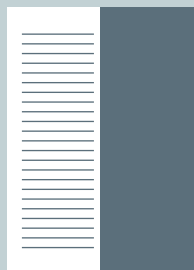
D) contracapa



E) página dupla



F) página inteira



G)
coluna ou
1/2 página

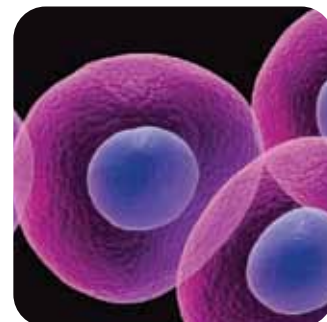
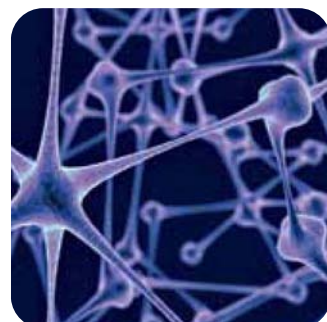
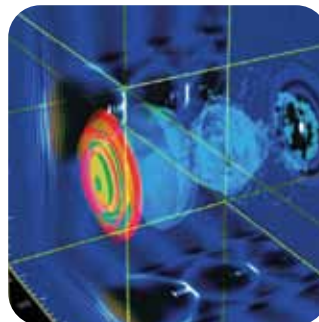
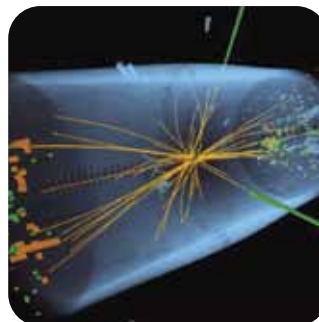


H)
1/4 página
ou faixa

Posição	Preço (Euros)	
	Ímpar	Par
A	1500	
B	1500	
C	1500	
D	2000	
E	2000	
F	1000	900
G	650	550
H	400	350
banner website	100/mês	



Para os físicos e amigos da física.
WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT

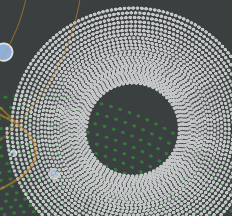


Aos preços da tabela acresce o IVA à taxa em vigor

Descontos de quantidade:
2X: -20% 3X: -25% 4X: -30%

Tiragem anual 2018:
3000 exemplares

Contactos:
Sociedade Portuguesa de Física
Av. República 45, 3º esq. 1050-187 Lisboa
Tel: 351 21 799 36 65; spf@spf.pt



S. Tomé

30 de Maio a 1 de Junho de 2019

Mais informações: <https://eventos.spf.pt/3cfcplp>

IBER 2019

Iberian Joint Meeting on
Atomic and Molecular
Physics

Évora
10 - 12 Julho 2019
Universidade de Évora

Mais informações: <http://www.iber2019.uevora.pt/>

CMPNC 2019

**Conferência Nacional de
Física da Matéria Condensada**

Porto, 8 - 10 Maio, 2019

Mais informações:
<https://eventos.spf.pt/CMPNC2019/en/>