



Lasers de alta potência
Metro, Kelvin e Segundo – Novo SI
Baterias de íons de lítio

Entrevista com Nobel: Gerard Mourou

Índice

1 Editorial

artigo geral

2 Lasers de alta potência, e o Prémio Nobel da Física de 2018

Gonçalo Figueira, Marta Fajardo

artigo geral

7 O metro ou a metrologia baseada na Natureza, universal e invariável

Olivier Pellegrino

artigo geral

12 O segundo - ontem, hoje e amanhã

Carlos Pires

artigo geral

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

Eduarda Filipe

inovação

22 Simulação computacional para o desenvolvimento e otimização de baterias de íões de lítio

Daniel Miranda, Renato Gonçalves, António Mário Almeida, Carlos M. Costa, Senentxu Lanceros-Méndez

sala de professores

28 Estudo de um caso de ensino e aprendizagem da mecânica no 9º ano de escolaridade

Maria José B. M. de Almeida, Marta C. S. Vadconcelos e Sá

entrevista

34 Entrevista - Gérard Mourou

Gonçalo Figueira

crónicas

37 Sem sombra de dúvida

Carlos Herdeiro

vamos experimentar

39 Nuvens e icebergues

Constança Providência

41 Notícias

Professor do Ensino Secundário vence prémio da *European Physical Society* 3.ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa (3CFPLP)

CRÉDITOS

Imagem da capa por: Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear

Frequentemente novas descobertas no âmbito da Física fundamental têm aplicações inesperadas e importantes, sendo a evolução dos lasers um exemplo paradigmático. A primeira contribuição para o seu desenvolvimento veio de Albert Einstein, com a proposta, em 1916, da emissão estimulada de fótons. Na altura, o conceito era denominado de “absorção negativa” e, dada a dificuldade, à época, de criar um número suficientemente grande de átomos no estado excitado, era considerado pela comunidade científica como pouco relevante em termos práticos. Assim, por altura da criação dos primeiros lasers, na década de 60 do século XX, o laser era divulgado, para o público em geral, ou como um raio ou espada de luz em ficção científica ou como um transmissor coerente de frequência alta, para comunicações atmosféricas. No entanto, desde essa altura, a Física dos Lasers cresceu acentuadamente, expandindo-se para outras áreas da Ciência e para uma gama alargada de aplicações práticas. Atualmente, eles encontram-se por todo o lado, desde os simples apontadores de luz, até à litografia, à gravação de informação ou a máquinas de corte industrial.

Em 2018, completaram-se 60 anos desde a publicação do primeiro artigo, na *Physical Review* de 1958, que referia os princípios básicos para a construção dos lasers (de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), na altura designado pelos seus autores, Charles Townes e Arthur Schawlow, como Maser Óptico (de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Em simultâneo, no Instituto Lebedev, em Moscovo, os investigadores Nicolay Basov e Aleksandr Prokhorov faziam experiências sobre a possibilidade de aplicar os princípios do Maser à região do visível. Pelas contribuições para o desenvolvimento do laser, Charles Townes, Nicolay Basov e Aleksandr Prokhorov, receberiam o prémio Nobel da Física em 1964. Após estes trabalhos iniciais os lasers desenvolveram-se rapidamente. A sua primeira implementação prática foi realizada em 1960, por Theodore Maiman nos Hughes Research Laboratories, na

Califórnia, sendo o primeiro a demonstrar a emissão óptica estimulada coerente. Desde essa altura, mais e mais aplicações, tanto em ciência como em tecnologia vêm sendo desenvolvidas, com grande impacto no nosso quotidiano.

É nesse contexto que se inserem os trabalhos realizados pelos investigadores Arthur Ashkin (pinças ópticas) e Gérard Mourou e Donna Strickland (lasers de alta potência), que receberam o prémio Nobel da Física de 2018. O Nobel foi-lhes atribuído pelo desenvolvimento de “ferramentas feitas de luz”, como referiu Göran Hansson da Academia de Ciências da Suécia, no anúncio do prémio. As pinças ópticas foram inicialmente desenvolvidas para a manipulação de partículas tirando partido da pressão de radiação exercida pela luz, mas cedo se perceberam as suas implicações em Biofísica. Elas permitem capturar e estudar de forma não destrutiva, não só moléculas individuais, como o ADN, como também organismos biológicos vivos, como células e vírus.

Por sua vez, Gérard Mourou e Donna Strickland receberam o Nobel pelo desenvolvimento de um “método de geração de pulsos ópticos ultracurtos e de intensidade alta”, em particular, pelo desenvolvimento da técnica de amplificação de impulsos dispersos (*chirped pulse amplification*, ou CPA). Inicialmente desenvolvidos no âmbito da procura de lasers cada vez mais intensos e curtos, a técnica CPA é hoje utilizada globalmente em múltiplos contextos, desde laboratórios de investigação até cirurgias oculares, das quais se salienta a tecnologia LASIK, que tem permitido corrigir a visão a milhões de pessoas. Mais desenvolvimentos se esperam no futuro.

Assim, numa altura em que os novos prémios Nobel 2019 estão em processo de divulgação, relembramos nesta edição da Gazeta o prémio Nobel da Física de 2018. Ela inclui, em particular, uma entrevista a Gerard Mourou, um dos premiados, onde ele nos mostra o seu percurso de vida e as perspetivas de evolução futura dos lasers intensos.

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

ISSN 0396-3561

Tiragem 1 000 Ex.

Registo ICS 110856

Depósito Legal 51419/91

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.

Lasers de alta potência e o Prémio Nobel da Física de 2018

Gonçalo Figueira e Marta Fajardo

Departamento de Física & GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa
goncalo.figueira@tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Neste artigo, abordamos a técnica de amplificação de impulsos dispersos introduzida por Gérard Mourou e Donna Strickland, premiados com o Nobel da Física de 2018. Revemos os conceitos fundamentais associados aos impulsos laser de curta duração e os problemas ligados à sua amplificação, que levaram à demonstração do CPA. Por fim, analisamos o impacto e as principais aplicações desta descoberta.

Introdução

O Prémio Nobel da Física de 2018 foi atribuído a três cientistas: Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland (imagem ao lado, da esquerda para a direita), pelas suas invenções revolucionárias na tecnologia laser: ao primeiro pelas pinças ópticas, aos dois últimos pela técnica de amplificação de impulsos dispersos (*chirped pulse amplification*, ou CPA). Esta edição vem reforçar a liderança dos lasers como a tecnologia moderna mais laureada com o Nobel da Física: só no presente século, é já a sexta vez que os premiados utilizaram lasers como a ferramenta fundamental no seu trabalho.

O prémio de 2018 foi também o terceiro a ser atribuído a uma mulher, sendo preciso recuar 55 anos até à anterior vencedora. Actualmente na Universidade de Waterloo, Canadá, Donna Strickland realizou os trabalhos fundamentais que levaram à demonstração da técnica CPA em 1985-87, sob a orientação de Mourou (actualmente na École Polytechnique, França) quando ambos trabalhavam na Universidade de Rochester, Nova Iorque. Curiosamente, o trabalho que resultou no Nobel foi também o seu primeiro artigo científico (!) e o tema da sua tese de doutoramento, sendo um dos raros casos em que a descoberta premiada teve lugar ainda antes da obtenção deste grau académico. Neste artigo, concentramo-nos na descoberta e nas aplicações desta técnica.



Nobel da Física de 2018: Arthur Ashkin, Gérard Mourou e Donna Strickland

Mais rápido, mais curto, mais potente: impulsos laser ultra-curtos

A técnica CPA é hoje utilizada globalmente em múltiplos contextos, desde laboratórios de investigação, até cirurgias oculares, processamento de materiais à microescala e aceleradores de partículas para tratamentos de cancro. Não será exagerado afirmar que todos os sistemas laser de alta potência funcionam baseados neste princípio, ao mesmo tempo eficaz e elegante. Para o compreender, vamos começar por rever alguns conceitos fundamentais e viajar até às escalas de tempo ultra-rápidas.

Um laser é uma fonte de luz coerente, em que as diversas ondas luminosas se combinam de um modo organizado, mantendo uma fase constante entre si. Podemos imaginar a luz laser como um exército de ondas em marcha, paralelas e perfeitamente sincronizadas. O modo como se obtém esta sincronização deriva de um mecanismo fundamental na interacção entre luz e matéria à escala atómica: a *amplificação estimulada de radiação*, proposta por Albert Einstein em 1916. Neste processo, um fóton interage com um átomo excitado, estimulando-o a decair e a emitir um segundo fo-

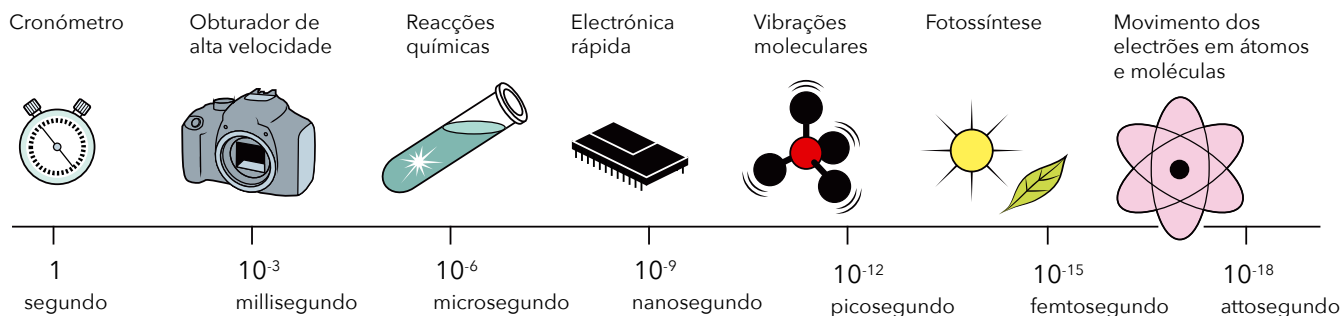


Fig. 1 - Escalas de tempo: do segundo ao femtosegundo (10^{-15} s) e attosegundos (10^{-18} s).

tão, idêntico ao primeiro e com a mesma fase de oscilação. Repetindo-se este processo ao longo de múltiplas gerações de fótons, a luz é amplificada e preserva a coerência, uma vez que cada novo fóton adicionado é uma cópia dos anteriores. Este princípio está precisamente reflectido na sigla LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

Desta coerência resulta a capacidade de se focar um feixe laser numa área minúscula, concentrando uma grande quantidade de energia, capaz de furar ou cortar facilmente uma chapa metálica. E resulta também a possibilidade de se concentrar a energia do laser numa duração ínfima, na forma de um impulso laser, o que se traduz em potências (energia por unidade de tempo) gigantescas. Assim, um impulso laser é energia em movimento à velocidade da luz, compactada numa duração cujo limite mínimo é ditado pelo período da oscilação luminosa. Por exemplo, para a luz visível, cuja frequência é da ordem dos 10^{15} ciclos por segundo, os impulsos laser mais curtos atingem durações da ordem inversa: 10^{-15} segundos, ou femtosegundos. Impulsos com tais durações designam-se *ultra-curto* ou *ultra-rápidos*.

Estas escalas de tempo incrivelmente efémeras são de difícil concepção para a mente humana (Figura 1). Em perspectiva, um femtosegundo está para um piscar de olhos como este está para a duração do Universo. Mas, se do Universo estamos limitados a vislumbrar o instante cósmico do presente, no caso dos lasers temos hoje tecnologias que nos permitem facilmente gerar, manipular, amplificar e detectar impulsos com estas durações.

Há vários motivos pelos quais é interessante utilizar estes impulsos luminosos. Em primeiro lugar, permitem investigar a natureza a esta escala temporal e aceder a fenómenos físicos e químicos no interior de átomos e moléculas. Em segundo, a curta duração está associada a uma alta resolução espacial, isto é, ao estudo de objectos com precisões de micrómetros. Por fim, se se amplificar a energia dum impulso laser ultra-curto, pode-se investigar o comportamento da matéria quando sujeita a condições extremas de energia, pressão ou

temperatura, inalcançáveis de outro modo - por exemplo, podem-se recriar em laboratório as condições de objectos astrofísicos como núcleos planetários ou estelares e testar os modelos existentes.

Amplificação de impulsos laser

No entanto, antes da invenção da técnica CPA, existia uma dificuldade intransponível ligada à amplificação de impulsos curtos. A Figura 2 mostra um amplificador laser típico, com um oscilador - o sistema laser que gera os impulsos primordiais - seguido de um conjunto de estágios de amplificação, nos quais se repete o processo de emissão estimulada, aumentando consecutivamente a energia do impulso.



Fig. 2 - Amplificador laser convencional.

Uma equação simples que relaciona diversas grandezas permite compreender o problema. A emitância radiante de um impulso laser é definida como a energia por unidade de área e de tempo, ou seja,

$$M_e = d\Phi_e/dA = dE/(dA dt) = dF/dt$$

em que E é a energia (J), A a área do feixe (m^2), e Δt sua duração (s). Além disso, definimos a potência $P = dE/dt$ (W) e a densidade de energia $dF = dE/dA$ (J/m^2). Assim, para se criar um impulso laser de alta emitância radiante, deve-se conjugar uma energia elevada com uma área pequena (o que se consegue facilmente, focando o feixe laser com lentes ou espelhos curvos) e uma duração curta. Quando se pretende atingir energias superiores ao nível do joule, para a amplificação ser eficiente, a densidade de energia do impulso laser deve ter um valor $F \approx 1$ J/cm^2 . Por outro lado, de modo a evitar efeitos não-lineares nefastos durante a passagem pelos materiais ópticos (que pode levar à desintegração do impulso ou à destruição do próprio amplificador!), a emitân-

cia radiante deve ser obrigatoriamente mantida abaixo de $M_e \approx 1 \text{ GW/cm}^2$. De modo a cumprir estes dois requisitos, resulta a condição limite

$$dt = dF/M_e$$

Esta conclusão implica que apenas é possível atingir energias elevadas se a duração do impulso for da ordem de um nanosegundo (10^{-9} s) ou superior, isto é, várias ordens de grandeza maior do que a de um impulso ultra-curto. E, efectivamente, desde a invenção do laser até meados da década de 80, coexistiram dois mundos no domínio das altas potências ópticas: sistemas de alta energia (kJ) e longa duração (ns), e sistemas de baixa energia (< mJ) e curta duração (fs). No caso dos primeiros em particular, os dois requisitos acima ditam ainda que, à medida que a energia do impulso aumenta, a sua área deve também expandir-se. Um exemplo é o sistema *Nova*, que quando foi instalado no Laboratório Lawrence Livermore (EUA) em 1984 era o laser mais potente do mundo. Cada uma das suas dez linhas laser era capaz de gerar impulsos de 10 kJ, durações de 2 a 4 ns e potências de alguns terawatts (10^{12} W), num feixe de 74 cm de diâmetro (Figura 3). Com tais dimensões, os componentes ópticos atingem preços proibitivos, só ao alcance de grandes laboratórios; além disso, a mera dimensão do sistema laser requer um elevado número de engenheiros, técnicos e cientistas para a sua operação e manutenção.



Fig. 3 - Vista da cadeia de amplificadores do sistema laser Nova (1984-1999)

Como funciona o CPA?

No início da década de 80, Gérard Mourou trabalhava na Universidade de Rochester, onde fervilhavam ideias inovadoras sobre óptica e lasers. Mourou estava particularmente concentrado na questão de como aumentar a energia de impulsos ultra-curtos, dentro dos limites práticos descritos acima. Uma primeira ideia teve origem na própria natureza destes impulsos: quanto mais curto é um impulso, mais larga é a banda de frequências ópticas que combina; ou seja, é composto por fótons de muitas “cores” diferentes. Mas este policromatismo tem um senão: ao viajar através de um meio óptico normal, como vidro, as várias frequências propagam-se com diferentes velocidades, e à saída estarão desfasadas umas das outras. Em consequência, o impulso fica muito mais longo (várias ordens de grandeza), e com uma característica adicional: a sua frequência instantânea

varia linearmente ao longo do tempo, numa espécie de *glissando* luminoso. Este atributo designa-se, em inglês, por *chirp*, e o impulso resultante é um... *chirped pulse*. Por exemplo, um impulso visível, ao viajar por uma fibra óptica, adquire um *chirp* positivo e, à saída, a sua frequência está distribuída de modo que aumenta ao longo do tempo (Figura 4).



Fig. 4 - Dispersão de frequências de um impulso curto numa fibra óptica.

A ideia-chave de Mourou pode ser explicada em poucas palavras. Como vimos, o problema da amplificação de impulsos curtos está relacionado com os efeitos sentidos *durante* a passagem através de amplificadores ou outros meios ópticos. Mas isto significa que esta exigência só se aplica *enquanto* o impulso tiver que atravessar tais meios; nada impede que o impulso seja ultra-curto antes ou depois. E, como vimos, a introdução de *chirp* é um mecanismo que transforma impulsos *curtos* em impulsos *longos*. Este é o processo que está na base do CPA, e que pode ser descrito em quatro passos:

- 1) Um oscilador laser gera um impulso curto e de baixa energia
- 2) O impulso é alongado no tempo e adquire *chirp* neste processo, por exemplo, obrigando-o a percorrer uma distância longa dentro de uma fibra óptica (designada *expansor*)
- 3) O impulso resultante, com uma duração várias ordens de grandeza superior, é amplificado sem limitações
- 4) Uma vez atingida a energia desejada, o impulso é dirigido para um compressor, onde as frequências dispersas são recombinadas numa impulso de duração ultra-curta.

Ora, Mourou sabia como executar o quarto passo: um “compressor óptico” é o nome dado a uma pequena montagem convencional que utiliza duas redes de difracção paralelas, com distância sintonizável, para remover o *chirp* que os impulsos adquirem em comunicações ópticas [1]. A sua intuição consistiu em conjugar uma expansão deliberada da duração dos impulsos, de modo a poder amplificá-los como se fossem “longos”, seguida de recompressão de modo a recuperar a duração curta. Mourou propôs a Donna Strickland que realizasse esta experiência, ideia que a deixou algo receosa pois achou que não seria um resultado suficientemente importante (!) para a sua tese de doutoramento. O

artigo resultante, publicado no final de 1985, já foi citado cerca de 2500 vezes [2].

Mas esta demonstração pioneira tinha uma limitação: é que, além do *chirp* linear, a utilização de uma fibra óptica introduz também um *chirp* não-linear significativo, de modo que a compressão do impulso não era eficaz. Nesta primeira experiência, obtiveram-se impulsos com uma energia modesta de 1 mJ e duração de 2×10^{-12} s (ou 2 ps). Seria preciso encontrar um sistema expensor que fosse perfeitamente simétrico do compressor de redes de difracção.

O momento *eureka* de Mourou sobreveio em 1987 durante um passeio de esqui nas proximidades de Rochester. Recordou-se de um artigo em que era descrito um sistema de compressão para telecomunicações numa banda do infravermelho em que a dispersão de frequências tem sinal contrário, isto é, o impulso adquire um *chirp* negativo [3]. O sistema consistia em duas redes de difracção com um sistema de lentes no meio, que invertia a divergência dos raios luminosos. Era o conjugado perfeito do compressor óptico. O dia de esqui foi interrompido a meio e Mourou voltou para o laboratório, onde um dos seus estudantes implementou a expansão e compressão conjugadas de um impulso de 80 fs: a duração do impulso foi aumentada de mil vezes e de novo reduzida à original [4]. Estava ultrapassado o obstáculo para a amplificação de impulsos curtos a alta energia.

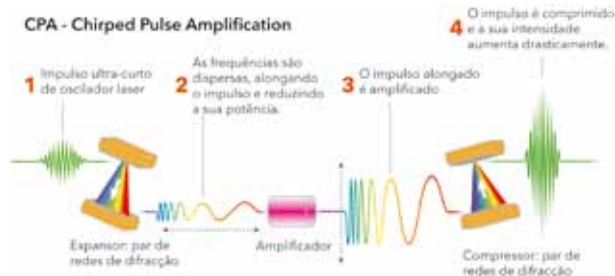


Fig. 5 - Esquema do funcionamento de um laser do tipo CPA.

A demonstração experimental da amplificação não tardou (Figura 5). Strickland, em conjunto com outros estudantes, aplicou o princípio da expansão-amplificação-compressão a um impulso curto, obtendo no final 1 joule em 1 picosegundo – feitas as contas, uma potência de 1 terawatt, obtida numa montagem que cabia em cima de uma mesa! Este resultado consistiu num salto de um factor de mil em relação ao anterior recorde, neste regime temporal [5]. O grupo de cientistas festejou efusivamente o resultado, e rapidamente se apercebeu do seu potencial de crescimento: a técnica podia ser facilmente adaptada aos grandes sistemas laser existentes, permitindo a amplificação de impulsos curtos, multiplicando instantaneamente a potência atingível e expandindo radicalmente os regimes da física que se podiam investigar (Figura 6). Além disso, o CPA oferecia uma vantagem extraordinária: com um sistema laser compacto, de apenas alguns metros quadrados, conseguia-se alcançar-se a mesma potência que com os mega-lasers como o Nova,

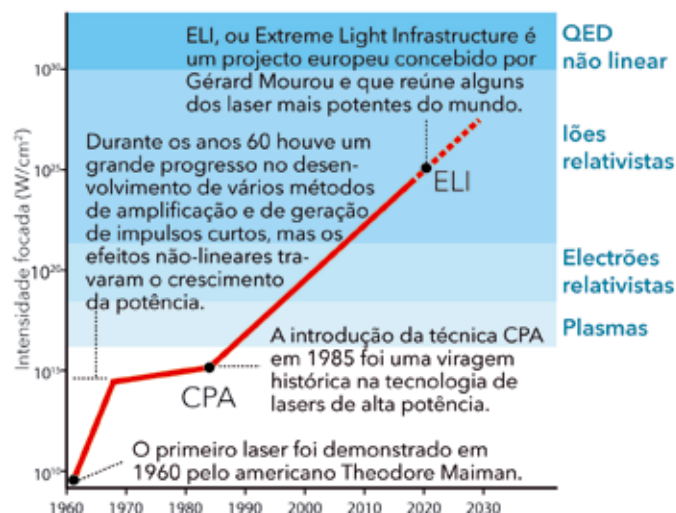


Fig. 6 - Evolução da intensidade dos lasers de alta potência.

com a diferença de que bastavam poucas pessoas para controlar todo o laser (Figura 7). O CPA foi uma verdadeira revolução na ciência, na tecnologia e no modo de operação dos lasers potentes.

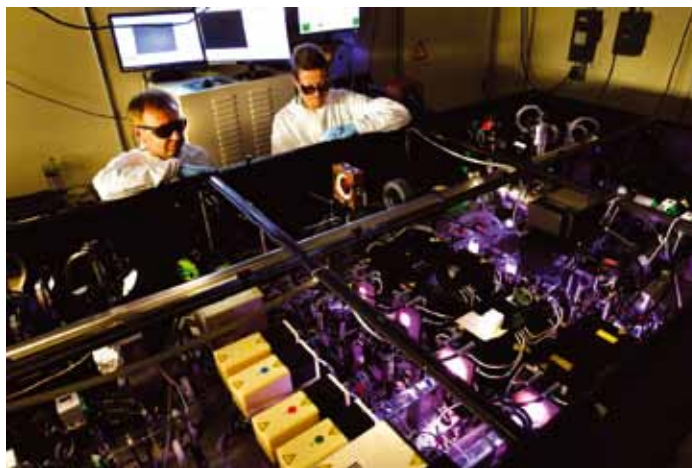


Fig. 7 - CPA em acção: o sistema laser Hercules, na Universidade do Michigan. Com uma potência de 300 TW e uma emitância radiante de 2×10^{22} W/cm², é um dos lasers mais intensos do mundo.

Quais as aplicações importantes do CPA?

Os lasers de tipo CPA permitem produzir impulsos ultra-curto e ultra-potentes. Uma das suas primeiras aplicações vantajosas foi descoberta no que começou por ser acidente infeliz. Num instante de descuido, um aluno de doutoramento de Gérard Mourou fez incidir um feixe laser no próprio olho, enquanto procedia ao seu alinhamento sem usar óculos de protecção. O oftalmologista que o observou diagnosticou uma queimadura na retina, mas manifestou-se surpreendido com a qualidade do impacto: comentou que era um “furo perfeito”! Passados uns dias, juntou-se à equipa em Rochester para desenvolver toda a tecnologia de cirurgia ocular, hoje conhecida como LASIK, e que já corrigiu a visão a mais de 40 milhões de pessoas.

Os impactos de laser CPA em diversos materiais têm de facto rebordos quase perfeitos quando comparados com lasers de mesma energia, mas de longa duração (Figura 8). Como a duração dos impulsos é muito curta, não acontece deposição de calor, que leva a deformações nos materiais. A indústria de precisão não esperou para utilizar o efeito para maquinação

avançada, como o corte dos ecrãs de telemóvel.

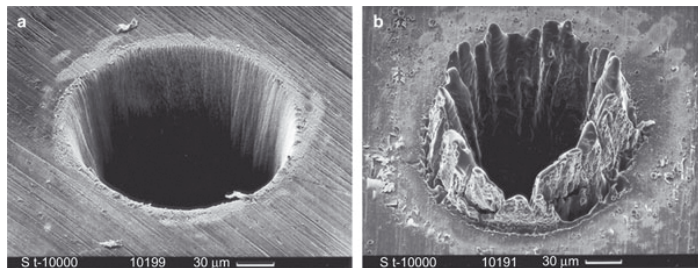


Fig. 8 - Comparação de furos feitos a laser numa chapa de aço. À esquerda foi utilizado um impulso de 0,12 mJ e 200 fs, à direita um impulso de 1 mJ e 2,2 ns. A utilização de um impulso laser mais curto previne a criação de rugosidades das paredes do furo.

Outras aplicações de cariz científico estão a ser desenvolvidas em laboratórios de todo o mundo, incluindo em Portugal. Com lasers de CPA suficientemente potentes, podemos acelerar partículas elementares a velocidades relativistas, em montagens várias ordens de grandeza mais compactas que nos aceleradores convencionais. Uma das aplicações mais promissoras consiste na geração de impulsos de prótons acelerados que podem ser usados na terapia contra o cancro. Os prótons, contrariamente aos electrões ou aos raios-X, têm a vantagem de depositar a sua energia a uma profundidade bem determinada dentro do corpo, o que torna a terapia de prótons uma arma muito eficaz contra os tumores.

Com lasers de CPA, podemos ainda estudar fenómenos mais fundamentais, e perceber a natureza das transições da matéria, por exemplo do estado sólido para o estado de plasma, usando os lasers como sonda ultra-rápida. Finalmente, com os lasers de potência mais elevada, e concentrando toda a sua energia no espaço e no tempo, podemos recriar estados de alta densidade de energia, reproduzindo em laboratório as condições no interior das estrelas. Graças ao permanente desenvolvimento e crescimento da tecnologia CPA, poderemos mesmo um dia estudar estados exóticos da matéria no domínio da electrodinâmica quântica. Neste âmbito, um dos principais objetivos consiste em construir um laser suficientemente potente para alcançar o limite de Schwinger, acima do qual o campo electromagnético tem um comportamento não-linear. Uma das consequências mais espectaculares consiste na possibilidade de utilizar lasers para “ferver” o vácuo e gerar pares electrão-positrão, graças aos campos eléctricos associados aos impulsos laser [6]. Na vanguarda experimental desta investigação, encontramos os três sistemas ELI (*Extreme Light Infrastructure*) que entraram recentemente em funcionamento na Europa, e um quarto sistema a ser agora planeado, que será o laser mais potente alguma vez operado. Mais uma vez, Gérard Mourou, com a sua capacidade visionária, foi o grande impulsor destes desenvolvimentos. Ainda ouviremos falar muito da técnica CPA.

Referências

1. E. Treacy, “Optical pulse compression with diffraction gratings”, *IEEE J. Quant. Electr.* QE5, 454 (1969)
2. D. Strickland e G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses”, *Opt. Commun.* 56, 219 (1985)

3. O.E. Martinez, “3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in the 1.3-1.6 μm region”, *IEEE J. Quant. Electron.* QE-23, 59 (1987)
4. M. Pessot, P. Maine and G. Mourou, “1000 times expansion/compression of optical pulses for chirped pulse amplification”, *Opt. Commun.* 62, 419 (1987)
5. P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot and G. Mourou, “Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification”, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-24, 398 (1988)
6. L. Silva, “Boiling the vacuum: in silico plasmas under extreme conditions in the laboratory and in astrophysics”, *Europhysics News* 48/5-6, 34 (2017)

Créditos das imagens:

Figuras 1, 5 e 6: Imagem adaptada de www.nobel.se

Figura 3: <https://lasers.lnl.gov>

Figura 7: <https://news.engin.umich.edu/photography/hercules-laser/>

Figura 8: B. N. Chichkov et al., Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Appl Phys A* 63, 109-115 (1996)



Gonçalo Figueira, (Lic. Eng. Fís.

Tecnol., IST 1994; Dout. Física, Univ. Lisboa 2001) é Professor Auxiliar no Dep. Física do Instituto Superior Técnico e investigador no Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. Coordena a investigação no Laboratório de Lasers Intensos, tendo desenvolvido o primeiro laser de tipo CPA em Portugal. Tem desenvolvido activamente trabalho de divulgação de ciência e ligação com o público. De 2013 a 2018, foi director da Gazeta de Física, sendo actualmente o co-coordenador da Divisão de Óptica e Lasers da Sociedade Portuguesa de Física.



Marta Fajardo, (Lic. Eng. Fís.

Tecnol., IST 1997; Dout. Física, Univ. Lisboa e Dout. Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique 2001) é Professora Auxiliar no Dep. Física do Instituto Superior Técnico e investigadora no Grupo de Lasers e Plasmas do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. É responsável pelo laboratório VOXEL, dedicado à geração de fontes de radiação e partículas criadas por lasers intensos, para aplicações em imagiologia. Desde 2015 é Chair eleita da Secção Beam Plasmas and Inertial Fusion da Divisão de Física dos Plasmas da Sociedade Europeia de Física.

O metro ou a metrologia baseada na Natureza, universal e invariável

Olivier Pellegrino

Instituto Português da Qualidade
opellegrino@ipq.pt

Resumo

A redefinição das sete unidades de base do Sistema Internacional de unidades (SI), adotada em 2018, é a oportunidade para apresentar a origem e o motivo da criação do antepassado do SI, o Sistema Métrico Decimal (SMD), baseado no metro, unidade da grandeza comprimento, como parte essencial da metrologia. São assim lembrados os principais atores e as respetivas motivações que intervieram, bem como os avanços proporcionados, para a progresso da ciência e da metrologia em particular. De construção coerente, o SI integra os progressos tecnológicos e científicos com o objetivo de ficar o mais universal, perene e exato possível, como o evidencia a recente redefinição das unidades de base.

1. Introdução

A Metrologia é a ciência da medição. É assim que está definida pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [1], cuja mais recente versão, a terceira, data de 2012, sendo produzida uma versão cada 15 anos aproximadamente. O VIM é uma publicação coordenada pelo Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM), à qual participam mais sete organizações internacionais da ciência, normalização e regulamentação internacionais [1]. Ora, se não existe muita dificuldade para o vocábulo “ciência”, embora “a arte¹ da medição” também fosse sugerida [3], é preciso ter consciência da necessária mudança do significado de “medição”, devido à evolução do respetivo domínio de aplicação com o aumento das capacidades científico-tecnológicas, que está original e principalmente concebida como uma ação tendo por objetivo atribuir um valor, expresso com um número, a uma determinada propriedade de objetos, fenómenos ou materiais [4]. Assim, a importância crescente de novas áreas de atuação (principalmente as associadas às propriedades dos seres humanos, como por exemplo a saúde, onde intervêm grandes números de parâmetros) faz incluir também no conceito de medição a determinação de valores de propriedades qualitativas [5].

A necessidade de medição, no sentido original neste texto, é associada à troca de bens e serviços, e a uma consequente organização da vida social. Com efeito, a avaliação e por consequência a medição dos recursos em jogo nessas trocas permitem a sua simplificação e melhoria. Mais concretamente, a medição tem sido sempre composta por uma sucessão de ações executadas com rigor para garantir resultados, tornando-se um ritual [6] e utilizando padrões - os equipamentos utilizados para obtenção desses resultados, com cada vez maior nível de confiança.

Os exemplos históricos de padrões das principais civilizações são frequentemente de origem antropométrica e podem ser encontrados em várias obras, das quais podem ser destacadas em língua portuguesa, “Pesos e Medidas em Portugal” [7], do primeiro Diretor do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade, António Cruz, e, em língua inglesa *World in the balance* [8] de Robert P. Crease.

Os padrões, no seu conjunto, têm seguido uma evolução com o tempo que foi interpretada como uma consequência do avanço tecnológico das civilizações [9] sem, todavia, lhe ter sido associada a designação “metrologia”. Pois, este processo, que durou largos séculos, culminou com a adoção do sistema métrico decimal (SMD), a primeira designação do Sistema Internacional de unidades (SI). Um dos objetivos deste texto é muito sucintamente introduzir este processo através de etapas balizadas pelos principais atores. Assim, propomos apresentar a origem da unidade metro, a base do SMD, cuja base prática e legal festeja este ano o respetivo 220.º aniversário.

Antes do SMD

Observando o império romano, as trocas de pessoas e mercadorias, dentro desse imenso território, eram possíveis pela existência de 11 unidades de medida de comprimento, mas com fatores multiplicativos e submultiplicativos entre elas, de base binária, terceira ou decimal, assim como da existência de 26 unidades de medida para a massa, com fatores entre múltiplos e submúltiplos sem coerência numérica [7]. No século IX, no império de Carlos Magno, utilizavam-se menos

¹ A “arte” é entendida como “aplicação do saber à obtenção de resultados práticos, sobretudo quando aliado ao engenho” [2]

unidades de medida do que no império romano e, embora baseadas nas unidades desse último, é admitido que foi o último estado que conseguiu uma uniformização dos pesos e medidas na totalidade do seu território, i. e. desde o poder central até ao “utilizador final”. Mas, para uma mesma grandeza, as designações dessas unidades de medida não tinham qualquer ligação entre elas e os fatores de conversão continuavam com diferentes sistemas de numeração. Na península ibérica, foram ainda introduzidas as unidades de medida árabes, com diversos fatores de conversão. Após a reconquista, em Portugal, foram realizadas diversas reformas uniformizadoras dos pesos e medidas. Por exemplo, na reforma manuelina [7], as 6 unidades de medida para o “peso”² passaram a 8 com fatores multiplicativos de 2, 4 e 32, e submúltiplos iguais a 1/8, 1/3, e 1/24. Resumindo, durante os quase 1000 anos posteriores ao império de Carlos Magno, nenhum estado conseguiu uma uniformização dos pesos e medidas. O poder dos senhores locais impunham unidades de medida locais que eram utilizadas para o pagamento dos impostos e taxas locais (por oposição e independentemente do estado central) muitas vezes em espécie e que eram arbitrariamente aumentados, por meio da alteração do tamanho dos padrões [10]... “Dois pesos, duas medidas” foi a expressão que apareceu mais vezes nas reclamações nos Estados Gerais em França, convocados em 1789 pelo rei Luís XVI, para tentar acalmar a exasperação da população, que necessitava uma uniformização metrológica, uma exigência global da sociedade em vários domínios. Com efeito, se todos os terrenos fossem medidos com a mesma unidade, os impostos sobre a propriedade podiam ser calculados da mesma maneira e logo ser mais justos.

Fundamentos científicos da criação do SMD

Essa exigência de uniformização e de justiça encontrou grande apoio e expressão no Renascimento, porque este último fomentava o progresso das técnicas e a construção do método científico, possibilitando em particular a eclosão da ciência física associada à matemática (lembremo-nos da frase do Galileu Galilei, em 1623³: “...o universo... está escrito em língua matemática”), caracterizada e incentivada pelas trocas de ideias e experiências entre os diferentes lugares de produção de conhecimento. Além de Galileu Galilei em Itália, podem ser referidos Francis Bacon em Inglaterra, Isaac Beeckman nos Países Baixos e René Descartes em França, como alguns exemplos das mais brilhantes personalidades do século XVII na origem do pensamento científico.

A “comunidade científica” tomou então progressivamente consciência que a consolidação do conhecimento impunha a existência de padrões de medição universais, i. e. independentes do lugar e do tempo, e descobertas científicas iam permitir a criação desses primeiros padrões. Em 1583, o ainda jovem Galileu Galilei observava que o período de um pêndulo simples, de pequenas oscilações, só dependia do

comprimento do fio, i.e. não dependia nem da massa pendurada, nem do impulso inicial, publicando, em 1638, a lei matemática correspondente⁴, seguido, em 1673, da publicação da expressão do período do pêndulo, para grandes oscilações, por Christian Huygens que sugeria, como aplicação desta descoberta, que o padrão de comprimento podia ser um fio de pêndulo correspondendo a um período de oscilação de um segundo, num determinado sítio da Terra⁵.

Em alternativa a este candidato a padrão que ainda dependia da grandeza tempo e do sítio onde era medido, um padrão de medição universal de comprimento podia simplesmente ser uma característica universal e invariável da Natureza, por exemplo, do próprio planeta Terra. Isso foi proposto pelo abade, astrónomo e matemático Gabriel Mouton nas *Observationes diametrorum solis et lunae apparentium*, em 1670, em que apresentava um sistema de medidas universal baseado no comprimento da circunferência da Terra e em que os múltiplos e submúltiplos da unidade eram decimais.

Em 1668, a adoção de uma medida universal (*universal measure*) de unidades decimais tinha sido também mencionada pelo eclesiástico e cientista inglês John Wilkins, em *An Essay towards a Real Character and a Philosophical Language*, e, em 1675, o inventor, matemático, astrónomo e arquiteto italiano, Tito Livio Burattini, em *Misura universal*, deu o nome a essa unidade de medida universal de *metro cattolico*, a partir do greco *métron*, e *katholikós*, que correspondem ao português “medida” e “universal”, respetivamente⁵.

A notação decimal para a representação dos números foi, pela primeira vez, utilizada pelo engenheiro, físico e matemático flamengo Simon Stevin, em 1585, no *De Thiende*, “O Décimo”, cujo anexo é um apelo simultâneo para um sistema universal de medidas e para múltiplos e submúltiplos apenas em base decimal [12]. Progressivamente a notação numérica decimal foi se impondo, como o exemplificam vários artigos da *Encyclopédie* [13]. Esta obra de referência, que sintetizava o conhecimento no século XVIII, abordava também vários temas chave da arte ou ciência da medição, tais como a redução do número de unidades de medida (embora sem acreditar na sua concretização), a escolha do sistema decimal, a noção de grandeza e o tema da precisão da medição, entre outros [14], mas sem ainda usar o termo *Metrologie*.

Foi o livro do matemático Alexis de Paucton, em 1780, *Métrologie ou traité des poids, mesures et monnaies* que associou de maneira definitiva o termo *Métrologie* ao processo de medição e ao uso de padrões, tomando exemplos das práticas dos tempos bíblicos,

² Presente no Museu da Metrologia, no IPQ, único em Portugal e dos poucos na Europa, o marco-padrão de D.Manuel I contém 16 peças desde 1 escrúpulo até 2 arrobas e tem uma massa de 1 quintal (=58,754 kg) igual a 4 arrobas, iguais a 100 arratéis, iguais a 200 marcos

³ no *Il Saggiatore* ou “O ensaiador”, em português

⁴ no magnífico *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze*, com uma tradução disponível em Portugal [11]

⁵ De acordo com a lei de gravitação de Newton

faraónicos, gregos e romanos antigos [15]. Este livro, que menciona a existência, nos tempos antigos, de padrões universais e comensuráveis ao tamanho da Terra, teve uma grande influência nos criadores do SMD, decididos em acabar com o carácter local e efémero, bem como frequentemente arbitrário, dos padrões dessa época, nos quais estava baseado o poder feudal.

A criação do SMD

No final do século XVIII, estavam disponíveis as ferramentas para a criação do SMD e coube à Revolução Francesa dar as condições para concretizar a respetiva realização. Com efeito, em seguimento da reunião dos Estados Gerais, de maio de 1789, foram abolidos os privilégios feudais (a 4 de agosto de 1789) e declarada a igualdade dos cidadãos – através da proclamação da Declaração dos direitos do homem e do cidadão⁶ (a 26 de agosto de 1789), condições para a mudança do uso milenário dos pesos e medidas nesse país. Logo no início da Revolução Francesa, foi criada uma comissão de membros da *Académie des Sciences*, em que se encontravam o físico Charles-Augustin Coulomb, o matemático Pierre-Simon Laplace e o químico Antoine Lavoisier, para refletir e propor a uniformização dos pesos e medidas, respondendo às reclamações dos Estados Gerais. Baseadas em recomendações dos académicos, decisões foram tomadas como emanações de relatórios de políticos levando à criação do SMD.

Primeiro, exigiu-se abandonar as unidades de medida em vigor, por serem demais nacionais e, portanto, locais e efémeras, para novas unidades com carácter universal e eterno. Como já vimos, as unidades então em vigor tinham tão pouca ligação entre elas que, até para uma mesma grandeza, a conversão entre essas unidades tinha fatores de conversão de diferentes bases de numeração. Em consequência, foi escolhida uma escala única: a escala decimal.

Por se tratar de unidades de medida novas, era necessário associar nomes novos e a arbitrariedade que dominava na designação das unidades de medida foi substituída por uma designação metódica, como tinha sido aplicado, pouco anos antes, na criação da nomenclatura em Química [16], por sua vez, inspirada pela nomenclatura binomial dos botanistas [17] e sobretudo inspirada pelos princípios do filósofo Étienne Bonnot de Condillac [18], de quem Lavoisier assume-se seguidor no Discurso Preliminar do Tratado Elementar de Química [19], afirmando

“As palavras devem fazer nascer a ideia e a ideia deve invocar o facto, sendo, deste modo, três etapas de um mesmo processo. E, como são as palavras que conservam as ideias e as transmitem, não se pode aperfeiçoar a linguagem sem aperfeiçoar

a ciência, nem a ciência sem aperfeiçoar a linguagem. É que, por mais certos que sejam os factos e mais exatas as ideias que os fizeram nascer, eles transmitirão apenas impressões falsas se não tivermos expressões exatas para os designar.”

Para garantir o carácter universal, os novos nomes não podiam ser da língua francesa e, como para a nomenclatura em Química, foram escolhidos nomes com origem nas línguas antigas. Na nomenclatura binomial, os nomes para os prefixos indicando os submúltiplos são de raiz latina (mili-, centi-, deci-) e os indicando os múltiplos são de raiz grega (deca-, hecto-, kilo-). Nessa nomenclatura, os nomes indicando as unidades principais, aqui vem do latim *area*, com o significado de “área”, litro do grego *litra*, com o significado de medida líquida e grama do grego *gramma* unidade de peso nos Romanos.

Continuando, após proposta de uma comissão da *Académie des Sciences* constituída de Borda, Condorcet, Laplace, Lagrange e Monge, um decreto de 26 de março de 1791 adotou como unidade de medida natural e universal o comprimento igual à decimo-milionésima parte do quarto do meridiano terrestre, medido entre Dunquerque e Barcelona. Sem esperar os resultados da medição deste comprimento, confiada aos dois geodestas e respetivos operadores, Pierre-François Méchain, a partir de Barcelona, e Jean-Baptiste Delambre, a partir de Dunquerque, para os quais 7 anos foram necessários, a lei de 1 de agosto de 1793 adotou um sistema provisório de pesos e medidas baseado na divisão decimal e na medida do meridiano terrestre cuja decimo-milionésima parte do quarto é chamado “metro” do grego *métron*, «medida», como já vimos, e era definido como sendo igual a uma determinação a partir da medição do mesmo meridiano, entre o polo e o Equador, efetuada de 1736 a 1744.

O decreto de 7 de abril de 1795 (18 germinal ano III) instituiu o SMD. A superfície, o volume e a massa ficaram definidas a partir do metro: através da geometria, para as duas primeiras grandezas, e através da pesagem, e a escolha de um material de referência, a água (à temperatura da fusão do gelo), para a terceira. Além disso, procurou-se aplicar o sistema decimal para todos os tipos de grandezas, desde o ângulo (criando a unidade grado), o tempo (dividindo o dia em 10 horas, a hora em 100 minutos e o minuto em 100 segundos) e até à temperatura (mudando a temperatura de ebulição da água de 80 graus Réaumur para 100 graus centígrados). As mais de 1000 unidades de medida existindo em França na altura foram substituídas por apenas 30 unidades de medida [10]! Entre 1798 e 1799, uma comissão constituída de cientistas vindos de nove países europeus, reunida em Paris, analisou e validou os resultados obtidos por Méchain e Delambre: permitiram fixar o metro definitivo. A lei de 10 de dezembro de 1799 (19 frimário ano VIII) estipulou que o metro e o quilograma em platina, colocados nos Arquivos, são os padrões definitivos, representantes de definições teóricas, e tornam-se a base prática e legal do SMD.

⁶ em 1791, escrita pela Olympe de Gouges, a Declaração dos direitos da mulher e da cidadã é rejeitada pela Assembleia, tendo as mulheres, na pátria da Declaração dos direitos do homem e do cidadão, o direito de voto apenas 154 anos mais tarde [10] (chamo a atenção para a Ref. 10 que também me lembrou essa triste verdade).

Novas definições do metro

Em 1889, o Protótipo Internacional substituiu o Metro dos Arquivos [20]. Trata-se de uma regra graduada de platina com 10 % de irídio, por ser mais estável que o artefacto inicial constituído unicamente de platina. Infelizmente, apercebeu-se que uma exatidão melhor que $0,1 \mu\text{m}$ não podia ser obtida com este padrão, o que incentivou a investigação científica para encontrar um padrão de comprimento tal que as medições de comprimento com ondas luminosas alcançassem uma exatidão comparável à do Protótipo Internacional [4].



Fig. 1 - Pavilhão de Breteuil, Sèvres, França: sede do Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM)

Embora sugerido, desde 1827, utilizar o comprimento de onda como padrão de comprimento, foi apenas em 1892 e 1906 que foi obtida a exatidão suficiente em comprimentos de onda de radiações luminosas para a substituição da definição do metro. Em 1960, a XI reunião da Conferência Geral dos Pesos e Medidas (CGPM) adotou a seguinte definição do metro [21]:

“O metro é o comprimento de $1\,650\,763,73$ comprimentos de onda no vácuo da radiação correspondendo à transição entre os níveis $2p_{10}$ e $5d_5$ do átomo de cripton 86.”

Em 1973, a reunião do Comité Consultivo sobre a Definição do Metro constatou que a determinação da velocidade da luz $c = 299\,792\,458,3 \text{ m s}^{-1}$ com uma incerteza de $1,2 \text{ m s}^{-1}$, a partir da medição da frequência de radiação de um laser a hélio-néon, emitindo no infravermelho próximo e ligada a uma risca de absorção saturada do metano, tinha uma incerteza limitada principalmente pela realização do metro de então. Essa incerteza correspondia a um valor 100 vezes menor que as das melhores medições até lá obtidas. Em 1983, a XVII reunião da CGPM decidiu adotar a seguinte nova definição do metro:

O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo, durante um intervalo de $1/299\,792\,458$ do segundo.”

A luz como ferramenta de medição de comprimento

Sobre essa matéria, recomenda-se a leitura do excelente trabalho de Fernanda Saraiva, Responsável pelos Domínios de Comprimento e Ângulos do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ/DMET), o Laboratório Nacional de Metrologia de Portugal, responsável pelos padrões nacionais das grandezas de base e principais grandezas derivadas de Portugal, “A Luz na medição de distâncias” [22]. Nesse trabalho, publicado na Gazeta de Física, é apre-

sentado pedagogicamente as diferentes intervenções da luz aos vários níveis de exatidão e desde a realização, manutenção e disseminação do metro. É também recomendada a leitura do excelente trabalho da mesma autora e colegas do IPQ/DMET “O laser na realização prática da definição do metro”, ainda na Gazeta de Física [23], sobre o tema em apreço.

A Novas Definições - Conclusões

Com o desenvolvimento da eletricidade na indústria e na ciência, foi sugerido, em 1901, integrar as unidades associadas no SDM, já designado de MKS, em 1889 com a inserção do segundo, e o que foi realizado em 1946 pela introdução do ampere e a mudança de designação para MKSA. Em 1960, a XI reunião da CGPM deu o nome de Sistema Internacional de unidades (SI) a este sistema, já com o kelvin e a candela desde 1954, e que, em 1971, contou com a mole [24]. Em 1967, na XIII reunião da CGPM, o segundo foi definido a partir da frequência de transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133 ($\Delta\nu_{\text{Cs}}$). Trata-se da primeira definição de uma unidade de medida a partir de um invariante da Natureza. Como já vimos, em 1983, a XVII reunião da CGPM definiu o metro a partir de um valor numérico fixo, baseado na velocidade da luz. O efeito Josephson, descoberto em 1962, e o efeito Hall quântico, por Klaus von Klitzing em 1980, permitem medir exatamente relações entre grandezas mecânicas e grandezas elétricas por meio de equações quânticas precisas, aplicáveis para experiências macroscópicas. Através da medição da densidade de cristais por raios X, é também possível definir a unidade de massa através da massa de um átomo de silício, uma constante fundamental. No entanto, foram necessários 30 anos para obter resultados suficientemente exatos, compatíveis e coerentes para propor novas definições do SI [25].



Fig. 2 - Símbolos das constantes fundamentais e unidades de base do SI correspondentes, na redefinição dessas unidades

Em 2018, a XXVI reunião da CGPM adotou novas definições para as sete unidades de base do SI, baseadas em sete constantes fundamentais, segundo uma formulação que explicitamente apresenta o valor exato de uma constante fundamental, sem impor um limite à exatidão da realização da unidade, com a exceção do segundo. Os valores das constantes fundamentais são o resultado de um trabalho de

colaboração internacional do *Task Group on Fundamental Constants*, publicado sob a responsabilidade do *Committee on Data for Science and Technology* (CODATA) do *International Council for Science* (ICSU) e disponível em: <http://physics.nist.gov/constants>. A nova definição do metro é agora:

O metro, símbolo m, é a unidade de comprimento do SI. É definido tomando o valor numérico fixo da velocidade da luz no vácuo, c , igual a 299 792 458 quando expressa em $m \cdot s^{-1}$, o segundo sendo definido em função de $\Delta\nu_{Cs}$.

Julgamos ser importante lembrar a distinção entre o valor de uma constante fixada pela Natureza e o valor numérico dessa constante, que depende da amplitude da unidade em que decidimos que seja medida. Para um determinado valor do segundo no SI, o valor numérico da velocidade da luz depende da amplitude da unidade de comprimento escolhida para o cálculo: por exemplo, em *yards* por segundo, o valor numérico de c é 327 857018,8. Do mesmo modo, a escolha como valor numérico de c 327 857018,8 define a amplitude do *yard* [24].

Baseadas em constantes fundamentais da Física ou invariantes da Natureza, embora sempre refletindo o conhecimento que temos da ciência fundamental e experimental a um momento determinado, as novas definições das unidades de base e, portanto, do metro, correspondem à vontade dos criadores do SMD para quem deviam ser unidades de medida deduzidas da Natureza⁷, universais e invariáveis.

Agradecimento à Eng.^a Eduarda Filipe pela simpática revisão do texto.

⁷ Ou antes “deduzidas das regras da Natureza”, embora *There are more things in heaven and earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy* (Shakespeare, Hamlet, 1623)

Referências

- [1] Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012) (1^a edição luso-brasileira, autorizada pelo BIPM, da 3.^a edição internacional do VIM - International Vocabulary of Metrology - Basic and general concepts and associated terms - JCGM 200:2012), IPQ, Portugal, 2012;
- [2] www.infopedia.pt;
- [3] Himbert M.E., “Uncertainties I & II” in “BIPM Metrology Summer school 2003”, Sèvres, BIPM.;
- [4] Giacomo P. “Étalons métrologiques fondamentaux” *Techniques de l'Ingénieur Archives R50* 1990;
- [5] Mari L. “Toward a harmonized treatment of nominal properties in metrology” *Metrologia* 54 784 2017;
- [6] Schaffer S. “Les cérémonies de la mesure: repenser l'histoire mondiale des sciences”, *Annales. Histoire. Sciences Sociales* 2015/2 (70e année), p. 409-435;
- [7] Cruz A., “Pesos e medidas em Portugal”, Instituto Português da Qualidade, Caparica, 2007;
- [8] Crease R.P. “World in the balance. The historic quest for an absolute system of measurement” W.W. Norton & Company, New York and London 2011;

- [9] Kula W. “Measures and men” translated by R. Sreter, Princeton University Press, Princeton New Jersey, 1986;
- [10] Guedj D. “Le mètre du monde”, Le Seuil, Paris, 2000;
- [11] Galilei G. “Diálogo sobre duas novas Ciências” in Hawking S. “Aos Ombras de Gigantes”, Texto Editores, 4.^a ed. 2014;
- [12] Viaud F., “Origine décimale du système métrique”, *Bulletin BNM*, p. 3-4, avril 1975;
- [13] Diderot D., d'Alembert J. le Rond “Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers”, ed. André Le Breton, Laurent Durand, Antoine-Claude Briasson, Michel-Antoine David, Paris, 1751-1772;
- [14] Machabey A. “Vue sommaire sur quelques rapports entre l'Encyclopédie et la métrologie”, *Revue d'histoire des sciences et de leurs applications*, tome 5, n°1, 1952. pp. 54-63;
- [15] Paucton A., “Métrologie ou traité des poids, mesures et monnaies”, Paris : Veuve Desaint, 1780;
- [16] Laszlo P., “A palavra das coisas ou a linguagem da química”, trad. R. Gonçalves e A. Simões, Gradiva, Lisboa, 1995;
- [17] Bensaude-Vincent, B., “Lavoisier”, Flammarion, Paris, 1993;
- [18] Carneiro, A., “Elementos da História da Química do Século XVIII”, *Química*, vol. 102, p. 25-31, 2006;
- [19] Lavoisier, A. L., “Discurso Preliminar do *Tratado Elementar de Química*” em Fontes da Costa P. “Manifesto para uma Nova Química”, Palavrão, Caldas da Rainha, 2011;
- [20] *Comptes Rendus 1re CGPM*, p. 38, 1889;
- [21] *Comptes Rendus 11e CGPM*, p. 85, 1960;
- [22] Saraiva, F., Eusébio, L., Gentil, S., Filipe, E., “O laser na realização prática da definição do metro”, *Gazeta de Física*, vol. 34, p. 8-11, 2011;
- [23] Saraiva, F., “A luz na medição de distâncias”, *Gazeta de Física*, vol. 39, p. 88-81, 2016;
- [24] Bureau International d'Unités “Le Système international d'unités” 9e édition, 2019 ; - 18e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM). 1989, BIPM;
- [25] Terry Quinn, T., Erard, L., Hermier, Y., Dubard, J., Chauvenet, B., Favre, G., Davis, R., Tuckey, P., Wallerand, Jean.-P. “Étalons métrologiques fondamentaux” *Techniques de l'Ingénieur Archives R50 V2*, 2015.



Olivier Pellegrino, Engenheiro em Química pela *École Supérieure de Chimie de Paris* e Doutor em Física, pela *Université de Pierre et Marie Curie*, atualmente Técnico Superior no Instituto Português da Qualidade (IPQ) onde, desde 2002, é responsável pelos domínios metrológicos de fotometria, radiometria e radiofrequência, tendo participado à tradução do VIM 2012 e VIML 2017, para português. Representante do IPQ no comité técnico da EURAMET TC-PR (Fotometria e Radiometria), na comissão setorial da RELACRE CSR04 - Metrologia, no Grupo de Trabalho GT05 – Metrologia Química e nas Comissões Técnicas de Normalização CTE 01 - Terminologia, CTE 34 - Lâmpadas e equipamentos associados, bem como sócio de várias sociedades científicas nacionais (SPF, SPM, SPMet e SPQ) e internacionais (*Metrodiff* e *Comité Español de Iluminación*).

O segundo - ontem, hoje e amanhã

Carlos Pires

Instituto Português da Qualidade
carlosp@ipq.pt

Resumo

A medição do tempo encontra-se na vanguarda da metrologia. A exatidão de um relógio atómico ganha uma ordem de grandeza a cada 10 anos e, atualmente, a incerteza relativa associada a valores atribuídos a um padrão primário de tempo anda próximo de 10^{-16} . Graças a este nível de incerteza, todas as outras unidades do Sistema Internacional de unidades (SI), que dependem do tempo ou da frequência, são melhoradas. Desde o início deste século, a investigação no domínio da metrologia do tempo tem como base as transições ópticas em átomos frios que, associados a pentes de frequência, produzidos por lasers de femtossegundo, dão origem a relógios ópticos com incertezas relativas na ordem do 10^{-18} . Será este o futuro da grandeza tempo, que levará a uma redefinição do segundo, ou será apenas um produto da investigação em que a definição do segundo continuará a atual.

Ontém

À data, o segundo, unidade da grandeza tempo no SI, define-se tomando o valor numérico fixado da frequência do césio, $\Delta\nu_{Cs}$, a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133 não perturbado, igual a 9 192 631 770, quando expressa em Hz, unidade igual a s^{-1} .

Praticamente em toda a história da civilização humana, foram os movimentos dos astros que deram a localização ao longo de um dia. Até à década de 50 do século XX, eram os astrónomos quem definiam o tempo e poucas pessoas fora da comunidade científica se preocupavam com a medição desta grandeza. O segundo era definido como uma parte em 86 400 de um dia solar médio, com a suposição, não declarada, de que a duração de um dia solar médio não variava. Havia uma atitude mais “despreocupada”, na definição do tempo, contrariamente à definição de outras grandezas físicas. No final do séc. XVIII, os fundadores do sistema métrico, partindo do princípio, que continuou a guiar os seus sucessores, de que as unidades não deveriam ser arbitrárias, manifestaram a sua expectativa de que no futuro fosse possível criar um sistema de unidades internacional, “*À tous les temps, à tous les peuples*”. Em 1875, com a assinatura da *Convenção do Metro*, 17 países, incluindo Portugal, acordaram para a criação de um sistema de unidades de medida igual para todo o mundo. Foram iniciados esforços no sentido da construção de novos pro-

tótipos internacionais do metro e do kilograma, não tendo sido considerada, nesta altura, a conceção de um padrão relacionado com o *segundo internacional*. No final do séc. XIX, existiam versões locais para o dia solar médio, o que era suficiente para todas as atividades. Pouco importava que o tempo na cidade do Porto estivesse adiantado em relação à cidade de Bragança, em alguns minutos. Foi com o desenvolvimento do telégrafo e dos caminhos de ferro que, em países como os EUA e o Canadá, se chegou a acordo sobre o *tempo comum* a utilizar em ambos os países. Assim, em 1883, ambos os países foram divididos em zonas temporais, em que cada zona tinha uma determinada hora e diferia das zonas adjacentes em exatamente uma hora. A ideia foi adotada no ano seguinte e o nosso planeta foi dividido em 24 zonas com 15 graus de longitude, a Oeste e a Este de Greenwich. A base do tempo mundial seria o dia solar médio no Observatório Real de Greenwich, ficando conhecido por *Greenwich Mean Time* ou GMT (fig. 1).



Fig. 1 - Royal Observatory em Greenwich, GMT foi o padrão de tempo até 1972.

Dado que esta nova definição causou alguma perturbação no horário das observações astronómicas, uma vez que o dia mudava a meio do turno de trabalho em que estas observações eram realizadas, o GMT foi substituído por uma nova definição, o Tempo Universal (UT), como sendo o dia solar médio no meridiano de Greenwich, com início à meia noite. Pela primeira vez, o mundo tinha uma clara e inequívoca escala de tempo e com a qual todos concordavam. O UT é baseado no dia solar médio que, por sua vez, é determinado por observações astronómicas, sendo o dia dividido em 86 400 segundos, relacionando a unidade do tempo, o segundo, com o movimento de rotação da Terra.

Acontece que o movimento de rotação da Terra não é constante, existem fatores, alguns conhecidos à data, que provocam irregularidades na sua rotação, tais como:

- os movimentos de precessão e de nutação, causados pela gravidade do Sol e da Lua;
- as marés dos oceanos, causadas pela atração gravitacional da Lua, provocam uma desaceleração gradual da velocidade de rotação da Terra, e transformam a sua energia rotacional em calor;
- a oscilação polar, diferente da precessão, os polos da Terra têm um movimento anual em torno do eixo real.

Além do dia se estar a *alongar*, e com ele a hora, o minuto e o segundo, esta alteração não é, porém, uniforme - o dia é menor no Verão do que no Inverno e existe o movimento dos polos, fatores estes que permitem concluir que o movimento de rotação da Terra não seria a melhor *escolha* como referência para a definição do segundo.

Desde finais do séc. XIX, início do séc. XX, que a posição do Sol pode ser determinada pela fórmula de Newcomb, e é publicada, para efeitos práticos, em tabelas (conhecidas por efemérides) que permitem obter a posição do Sol em qualquer instante. Em 1956, foi recomendada uma nova base de tempo, o Tempo Efeméride (*Ephemeris Time* – ET), na qual se definia o segundo efeméride (SE) como sendo a fração $1/31\,556\,925,974\,7$ do ano trópico para janeiro 0 de 1900, às 12:00 *Ephemeris Time* (o ano trópico é o intervalo de tempo que o Sol, em seu movimento aparente pelo céu, leva para partir de algum dos quatro pontos que definem as estações e retornar ao mesmo ponto, por exemplo, é o tempo entre duas passagens pelo equinócio de Primavera) [1].

Em 1960, o ET começou a aparecer em tabelas astronómicas e, também esse ano, o SI foi criado pela 11.ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM).

Hoje

Atualmente, os relógios dividem o dia solar médio em intervalos, *mais convenientes*, expressos em horas, minutos e segundos. Podem ser ajustados ao dia solar médio, a partir de um relógio padrão que, por sua vez, tem o tempo derivado das observações astronómicas. Utilizados desta forma, os relógios são, de facto, padrões secundários de tempo que mantêm uma escala de tempo, entre calibrações periódicas.

Na altura em que o segundo efeméride se tornou oficialmente a unidade de tempo do SI, em 1960, já alguns laboratórios geravam escalas de tempo atómicas, assim designadas dado que tinham como padrões relógios atómicos, permitindo obter o segundo a partir dos valores de frequência emitidos por átomos. Já, em 1879, Sir William Thomson (mais tarde conhecido como Lord Kelvin) mencionou que os átomos podiam ser utilizados como padrões de frequência.

Foram realizados diversos projetos para relacionar o segundo efeméride à transição do átomo de célio para a definição do segundo do SI. Os relógios atómicos, em pouco minutos, conseguiram realizar o segundo do SI com um nível de exatidão tal, que levaria cerca de um ano de observações da Lua para se atingir o mesmo nível e exatidão.

Em 1964, a CGPM adotou uma definição provisória do segundo do SI baseado no tempo atómico: o padrão a ser utilizado é a transição entre os dois níveis hiperfinos, $F = 4, m_F = 0$ e $F = 3, m_F = 0$, do estado fundamental, $^2S_{1/2}$, do átomo de célio 133, não perturbado por campos externos, cujo valor atribuído é de 9 192 631 770 Hz.

Com os relógios atómicos a revelarem-se uma fonte geradora fiável e prática, em 1967, na 13.ª CGPM, foi adotada a *nova* definição do segundo: o segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de célio 133.

O segundo deixou de estar relacionado com a duração do dia, com os movimentos dos planetas e deixou de ser necessário recorrer à observação astronómica para se obter um padrão de tempo, marcando assim o fim do *tempo astronómico* [2].

Com os relógios atómicos e com a nova definição do segundo, em 1971, a 14.ª reunião da CGPM designou a escala de tempo atómico do *Bureau International de l'Heure*, como *Temps Atomique International* (TAI), que atualmente é a escala de referência mundial. O TAI é uma escala de tempo contínua, calculada pelo BIPM tendo por base as melhores realizações do segundo no SI. Foi igualmente recomendada uma nova forma de Tempo Universal Coordenado (UTC), ligada ao TAI, para ser utilizada na distribuição de sinais de tempo. O UTC é uma escala de tempo definida pelo BIPM, com a mesma unidade do TAI, mas diferindo em alguns segundos (fig. 2). Atualmente, o UTC é a base do tempo civil, substituindo a escala GMT, mantida em consonância com o movimento de rotação da Terra, dado por UT1, e quando ocorrem alterações na duração do dia que provoquem diferenças superiores a 0,9 s entre o UTC e o UT1, é introduzido ou suprimido 1 segundo, designado por segundo intercalar.

International Atomic Time – TAI

17:00:47

Coordinated Universal Time – UTC

17:00:10

Fig. 2 - Diferença entre TAI e UTC.

Mas o que define um relógio?

Um relógio é basicamente constituído por um oscilador e um contador. O oscilador, ou padrão de frequência, fornece um evento periódico, que pode ser a vibração de um cristal, um pêndulo, o movimento de translação do sol ou as vibrações dos eletrões nos átomos. O contador conta e mostra o número de vezes que um determinado evento ocorre.

A qualidade de um relógio pode ser expressa a partir de duas características da medição: a exatidão e a estabilidade.

A exatidão de um relógio consiste na sua *habilidade* de ler corretamente o valor do tempo. A exatidão da frequência traduz-se pelo grau de concordância entre os valores medidos e os valores verdadeiros correspondentes aos intervalos de tempo que o relógio apresenta, isto é, o respetivo valor em segundos. A avaliação da exatidão de medição de um relógio pode ser efetuada através da determinação do respetivo erro durante 1 dia de funcionamento. Se ao fim de 24 horas, o relógio está 1 minuto atrasado, a sua exatidão é de 1 minuto por dia, ou 1 parte em 1440.

A estabilidade de um relógio, medida num dado intervalo de tempo, é a propriedade através da qual mantém o respetivo funcionamento constante ao longo do tempo, isto é, mantém a periodicidade do evento. Se um relógio perder um minuto por dia e mantiver este comportamento todos os dias, então o relógio é estável, apesar de não ser exato. Um relógio que, em 24 horas, regista mais ou menos 2 minutos por dia tem uma estabilidade de aproximadamente 2 minutos por dia ou cerca de 1,4 partes em 10^3 .

A característica fundamental de um relógio é a sua estabilidade, assegurando um comportamento previsível, e a sua exatidão pode ser melhorada e ajustada ao tempo correto, por exemplo através da comparação com um padrão de tempo.

A determinação e a caracterização da estabilidade são efetuadas através da variância de Allan, definida por:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{i=1}^M (\bar{y}_{i+1}(\tau) - \bar{y}_i(\tau))^2,$$

onde \bar{y}_i é o elemento i da média das frequências relativas M , no tempo de integração τ , dos dados de frequência $y(t)$. A variância de Allan é calculada para alguns intervalos de amostragem e graficamente representada de forma logarítmica. A determinação dos declives do gráfico permite distinguir entre os diferentes tipos de ruído que afetam as medições de frequência [3].

Uma outra característica importante associada à metrologia de tempo e frequência são os chamados selos temporais das medições, os quais identificam de forma exata e inequívoca

a data e o instante de determinada “ação”. Estes selos temporais são relacionados com o *Modified Julian Day* (MJD), numeração contínua com início a 17 de novembro de 1858. Por exemplo, o dia 2019-07-09 corresponde a MJD 58673.

Metrologia de tempo atual

Os padrões primários mais utilizados na metrologia do tempo são os relógios baseados na transição do céσιο, também designados como fontes de céσιο, e relógios comerciais de céσιο.

A designação de fonte de céσιο vem da característica de funcionamento destes relógios, que consiste, literalmente, em *atirar* (lançar) átomos de céσιο para o ar, como numa fonte de água.

Numa fonte de céσιο, os átomos são apanhados numa *armadilha* magneto – óptica, com recurso a 4 lasers ortogonais entre si. Estes agrupam os átomos numa esfera e, no processo, os seus movimentos tornam-se mais lentos à medida que são arrefecidos, até temperaturas na ordem de algumas dezenas de kelvins. Dois lasers verticais enviam a esfera de átomos num movimento ascendente, de cerca de um metro, sendo desligados de seguida. Nesta trajetória vertical, os átomos passam duas vezes numa cavidade de micro-ondas. Este movimento, ascendente e descendente, tem uma duração de cerca de 1 s. Durante esta trajetória, os átomos podem, ou não, ter alterado o respetivo estado atómico na passagem pela cavidade de micro-ondas, como evidenciado na Figura 3. Após a passagem pela cavidade, um outro laser incide nos átomos e, por um processo de fluorescência, provoca a emissão de fótons pelos átomos que mudaram de estado atómico. Um detetor indica a presença dos fótons emitidos. Este processo é repetido diversas vezes, ao mesmo tempo que a cavidade de micro-ondas é sintonizada a diferentes frequências.

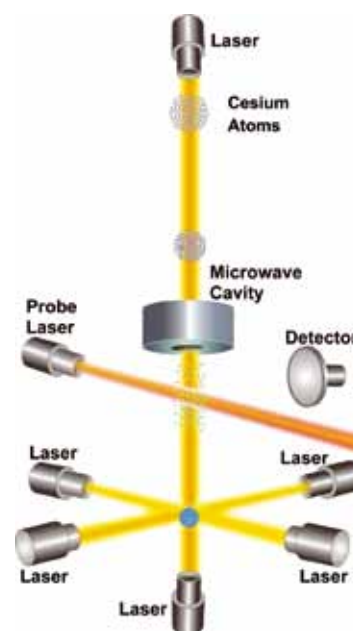


Fig. 3 - Esquema de uma fonte de Cs.

O valor da frequência que maximiza o processo de fluorescência e provoca o maior número de transições de estado é 9 192 631 770 Hz, o valor da frequência utilizada para definir o segundo [4]. Por exemplo, desde 2012 que o Instituto Nacional de Metrologia de Itália (INRIM) mantém uma fonte de céσιο, para a realização do segundo do SI, com uma incerteza-padrão relativa, do tipo B, cujo valor é $1,7 \times 10^{-16}$.

Transferir tempo e frequência

Em metrologia, a transferência de tempo (TT) ou a transferência de frequência (TF) tem como principais objetivos comparar escalas de tempo UTC (k) (Tempo Universal Coordenado no local de índice k), em locais diferentes, e disseminar a unidade de tempo, o segundo. Atualmente, o BIPM recomenda que a TT seja efetuada com recurso a satélites dos Sistemas de Posicionamento Global por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems* - GNSS) ou a satélites geoestacionários [5].

Desde o início dos anos 90 que a TT e a TF são realizadas com recurso a técnicas de transferência que utilizam satélites, nomeadamente as técnicas de *Common View* e *Two Way Satellite Time And Frequency Transfer* (TWSTFT). Ambas permitem transferir frequências com valores de estabilidade da ordem de 300 ps, o que corresponde a uma resolução relativa em frequência de 4×10^{-15} por dia [6] [7], e transferir tempos com valores de incerteza que, na melhor das hipóteses, serão da ordem de 1 ns [8]. Em 2003, foi possível efetuar a transferência de frequências, através dos padrões primários de tempo do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) para o *Joint Institute for Laboratory Astrophysics* (JILA), Instituto com gestão conjunta do NIST e da Universidade do Colorado, com uma resolução relativa de 4×10^{-15} em 1 s [9], com recurso a fibra óptica. Esta realização impulsionou o aparecimento de uma nova técnica de TT e TF.

Na Europa, a primeira experiência do género ocorreu em 2005, em França, onde foi utilizada uma fibra óptica para disseminar um padrão de tempo, numa distância de 43 km, com uma incerteza relativa de 10^{-17} , num tempo de integração de um dia [10].

Além da utilização de satélites, já muito difundida para a transferência de tempo e frequência, as soluções de fibras ópticas estão a surgir muito rapidamente como uma alternativa. Assim, em 2012, na 19.^a reunião do Comité Consultivo do Tempo e Frequência (CCTF) do BIPM, foi recomendado o desenvolvimento de uma rede de fibras ópticas para TT e TF [11]. Desde então, a utilização de fibras ópticas, para fins metro-lógicos, tem aumentado, muito devido à incapacidade que os sistemas de transferência de

tempo, que recorrem a satélites, apresentam face aos requisitos para efetuar a comparação de relógios. O principal requisito de um laboratório de tempo consiste na comparação da escala de tempo local com a escala de tempo pela qual o resto do mundo se rege.

Atualmente estão a ser efetuados em todo o mundo estudos sobre TT, e principalmente sobre TF, e especialmente na Europa onde os Institutos Nacionais de Metrologia (NMI) se estão a ligar por fibra óptica, de forma a compararem as respetivas escalas de tempo, em substituição dos sistemas atuais.

A transferência de tempo pode ser efetuada de 3 formas: *one-way*, *two-way* e *common view* [12]. No método *one-way*, é enviado um sinal de tempo para um local remoto, onde é comparado com a escala de tempo nesse local, assumindo que é conhecido o atraso do respetivo percurso. No método *two-way*, existe uma troca de sinais de tempo entre dois locais distintos. Ambos funcionam como recetores e emissores. Este método baseia-se no facto do percurso percorrido pelos sinais de tempo ser o mesmo em ambos os sentidos. Isto é, se se verificar a simetria do atraso de ambos os sinais, não é determinante conhecer os efeitos que contribuem para o atraso deste sinal. No método *common view*, várias estações observam o mesmo sinal de tempo transmitido por uma fonte e medem o tempo que o sinal demora a chegar ao observador. De seguida, os observadores comparam as medidas e subtraem-nas, sendo este o método mais utilizado para transferir tempo entre os diferentes laboratórios de tempo e o BIPM.

Rastreabilidade do segundo

Na verdade, o tempo é calculado e disponibilizado ao mundo pelo BIPM, com base em dados recolhidos de cerca 80 NMI, que mantêm e desenvolvem cerca de 500 relógios mantidos em condições metrológicas. Coletivamente, estes relógios permitem a construção da escala de tempo de referência internacional (UTC) e individualmente realizam o segundo do SI ao mais alto nível.

Mensalmente, o BIPM recolhe os dados das diferenças entre as realizações locais do UTC, UTC(k), e o UTC. Com estes dados, é criado um relógio “médio”, isto é, calcula-se uma média ponderada dos dados de cada UTC(k), de acordo com a estabilidade que cada UTC(k) apresentou no ano anterior. Este relógio “médio” é conhecido como *Echelle Atomique Libre* (EAL). De seguida, esta escala de tempo é comparada com a duração do segundo no SI gerado pelos padrões primários de tempo, e é gerado o TAI. O segundo TAI corresponde ao segundo SI em uma parte em 10^{15} . De seguida, o TAI é convertido no UTC, sendo atualmente a diferença entre ambos de 37 s. Esta diferença pode variar, pois, é necessário manter a concordância entre o UTC e o movimento de rotação da Terra, $UT1 - UTC < 0,9$ s. Se a diferença for maior que 0,9 s, cabe à *International Earth Rotation Service* (IERS) a decisão de introduzir ou não o segundo intercalar, Figura 4.

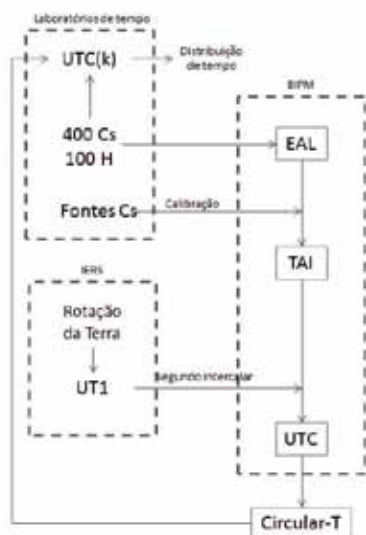


Fig. 4 - Esquema da realização do UTC.

Mensalmente a diferença entre os UTC(k) e o UTC é publicada pelo BIPM na Circular-T, sendo este o garante da rastreabilidade da realização prática do segundo, para todos os Laboratórios que contribuem para o TAI. Em Portugal, a escala de tempo de referência é designada por UTC(IPQ) e pode ser consultada mensalmente na Circular-T do BIPM [8].

O UTC (IPQ) é da responsabilidade do Laboratório de Tempo e Frequência do Instituto Português da Qualidade (IPQ), enquanto NMI de Portugal. O segundo, em Portugal, é realizado com recurso a 3 relógios comerciais de césio e a comparação com o UTC é feita com recurso a dois sistemas de transferência de tempo, um recetor GNSS e o sistema TWSTFT, Figura 5.



Fig. 5 - Laboratório de Tempo e Frequência do Instituto Português da Qualidade.

Nova definição do segundo

Com a entrada em vigor do *novo SI*, em maio de 2019, a unidade de tempo define-se: tomando o valor numérico fixado da frequência do césio, $\Delta\nu_{Cs}$, a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133 não perturbado, igual a 9 192 631 770, quando expresso em Hz, unidade igual a s^{-1} . O segundo é utilizado na definição de outras unidades de base do SI, tais como o metro, o quilograma, o ampere, o kelvin e a candela.

Esta definição implica a relação exata $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$, de onde se pode obter a relação $1\,s = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{Cs}}$. O efeito desta definição é que o segundo é igual à duração 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133 não perturbado.

Amanhã

Os recentes relógios ópticos, padrões secundários de tempo e frequência, baseados em átomos de estrôncio ou itérbio, ou em iões de alumínio ou mercúrio, possibilitam a obtenção de valores de incerteza cerca de 100 vezes menores do que os dos atuais padrões primários de tempo. Os relógios ópticos utilizam transições a frequências maiores do que as frequências emitidas pelos átomos de césio, conseguindo subdividir o segundo, pelo menos, em mais do que 2 ordens de grandeza que os relógios de césio. O relógio óptico de estrôncio do NIST não teria ganho ou perdido um segundo se tivesse sido colocado em funcionamento há 13,8 mil milhões de anos atrás, na altura do

Big Bang [13, 14]. Segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, um relógio próximo à superfície da Terra gera um segundo maior que um relógio que esteja afastado. Apesar de os relógios comerciais utilizados nos satélites do sistema GPS já terem em conta os efeitos da relatividade, a exatidão e a estabilidade de um relógio óptico [14] permitem verificar alterações em altitude de cerca de 1 cm.

A evolução tecnológica verificada pelo desenvolvimento dos relógios ópticos, nomeadamente os respetivos valores de incerteza, estabilidade e exatidão, está a suscitar a discussão sobre uma eventual redefinição do segundo do SI, baseada em transições ópticas ou mantendo-se o césio como átomo para o relógio de referência. O tempo dirá se estes avanços ocorrerão, mas parece certo que a medição do segundo só será mais exata no futuro.

Referências

- [1] “Ano Trópico”, [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ano_tr%C3%B3pico. [Acedido em 2019-07-17].
- [2] “Resolution 1 of the 13th CGPM”, 1967.
- [3] W. Riley, Handbook of Frequency Stability Analysis, Boulder, EUA: NIST Special Publication 1065, 2008.
- [4] “BIPM”, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/metrology/time-frequency/units.html>. [Acedido em 2019-07-17].
- [5] BIPM, “Recommendation CCTF 3”, 2001.
- [6] D. Calonico, et al, “Light and the distribution of time”, doi: 10.1209/0295-5075/110/40001, 2015.
- [7] A. Bauch, et al, “Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10^{-15} uncertainty level”, Metrologia, 43, 109 (2006).
- [8] “BIPM - Circular T”, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Circular-T.html>.
- [9] J. Y., et al, “Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network”, J. Opt. Soc. Am. B, 20 (7), 1459-1467 (2003).
- [10] C. Daussy, et al, “Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} ”, 2005.
- [11] BIPM, “Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) Report of the 19th meeting”, 2012.
- [12] J. Levine, “A review of time and frequency transfer methods”, Metrologia, 45, S162-S174 (2008).
- [13] “NIST”, [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/primary-standard-nist-f1>.
- [14] R. Wynands, et al, “Atomic Fountain Clocks”, Metrologia, 42, S64 (2005).



Carlos Miguel Sendas Pires, nasceu em Bragança em 1975. Licenciou-se em Engenharia Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e, pela mesma faculdade, fez o mestrado em Engenharia Física. Em 2007, iniciou as suas funções no Laboratório de Velocidade do Laboratório Nacional de Metrologia, do Instituto Português da Qualidade, como Técnico Superior. Em 2015, assume as funções de Responsável Técnico pelo domínio do Tempo e da Frequência, tendo como principal função realizar e disseminar o segundo, bem como dar rastreabilidade à unidade a nível nacional, estando nomeado posteriormente como contact person no comité técnico da EURAMET TC-TF (Tempo e Frequência).

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

Eduarda Filipe

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

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

Resumo

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

1. Introdução

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.1 A unidade de temperatura termodinâmica – o kelvin

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

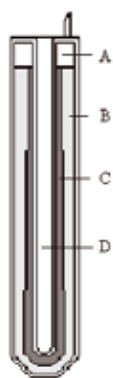


Fig. 2 - Célula do ponto triplo da água.
A - Vapor de água; B - Água no estado líquido; C - "Manto" de gelo em torno do poço D - onde se introduz o termómetro de resistência de platina

–“o kelvin, unidade de temperatura termodinâmica (T), é a fração $1 / 273,16$ da temperatura termodinâmica do ponto triplo da água”. Por razões de natureza histórica, ligadas à maneira como as escalas de temperatura tinham sido anteriormente definidas, é corrente exprimir uma temperatura, pela diferença entre esta temperatura e a do estado equilíbrio térmico inferior em 0,01 K (ponto de gelo) do ponto triplo da água (T_{PTW}). Uma temperatura termodinâmica T , expressa desta maneira é designada por temperatura Celsius, de símbolo t , definida por:

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

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

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

A implementação desta definição foi baseada no arte-

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

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

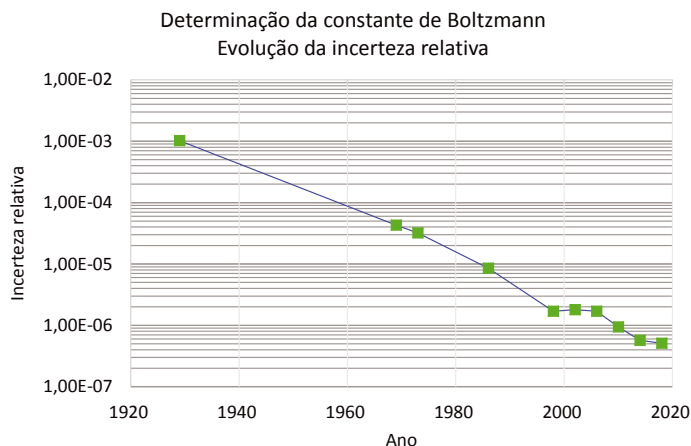


Fig. 3 - Evolução da incerteza relativa na determinação da constante de Boltzmann até 2017. Gráfico realizado a partir de dados históricos.

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



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

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

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

³ V-SMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1 Conceitos relacionados com os métodos de realização do kelvin

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

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

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

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

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

2.2 Realização prática do kelvin por termometria primária

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

Os principais métodos de termometria primária cumprem os seguintes critérios:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. Sumário

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

Referências

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



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

Simulação computacional para o desenvolvimento e otimização de baterias de íões de lítio

Daniel Miranda¹, Renato Gonçalves², A. Mário Almeida², Carlos M. Costa^{2*}, Senentxu Lanceros-Méndez^{2,3,4}

¹ 2Ai- Instituto Politécnico do Cávado e Ave, 4750-810 Barcelos, Portugal

² Centro/Departamento de Física, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal

³ BCMaterials, Basque Center for Materials, Applications and Nanostructures, Parque Científico UPV/EHU, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia, Espanha.

⁴ IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, 48013 Bilbao, Spain

* autor correspondente: cmscosta@fisica.uminho.pt

Resumo

O surgimento das baterias de íões de lítio, prémio Nobel da Química de 2019, originou uma revolução tecnológica em dispositivos portáteis tais como telemóveis e computadores, permitindo aumentar a sua autonomia através da melhoria da sua densidade energética, mas também pelo facto de serem mais leves e finas que baterias baseadas noutras tecnologias. As baterias de íões de lítio terão igualmente um papel revelante na mobilidade elétrica, mas para tal acontecer, vai ser preciso aumentar em cerca de quatro vezes a sua densidade energética. Neste contexto, a simulação teórica será uma ferramenta fundamental para atingir esse objetivo.

Com este trabalho pretende-se mostrar a importância da simulação teórica para aplicações tecnológicas específicas de baterias de íões de lítio, apresentando também as equações fundamentais que descrevem os fenómenos eletroquímicos que ocorrem nos processos de carga e descarga.

1. Introdução

As energias renováveis são essenciais na modificação do modelo energético atual de forma a garantir a sustentabilidade energética no planeta, tendo em conta o aumento da população e a dependência do gás natural e de outros combustíveis fósseis [1]. As baterias são fundamentais para o armazenamento da energia obtida por sistemas de energia renováveis. Em particular, as baterias de íões de lítio têm enorme relevância por apresentarem maior densidade de energia e potência em comparação com as baterias de chumbo-ácido e de níquel-hidreto metálico (NiMH) [2].

As baterias de íões de lítio são constituídas por dois eletrodos (ânodo e cátodo), um separador embebido numa solução de um eletrólito, sendo esta solução constituída por sais dissolvidos num solvente não aquoso, e por dois coletores de corrente. Os processos de funcionamento

(carga e descarga) de uma bateria são apresentados na Figura 1 a).

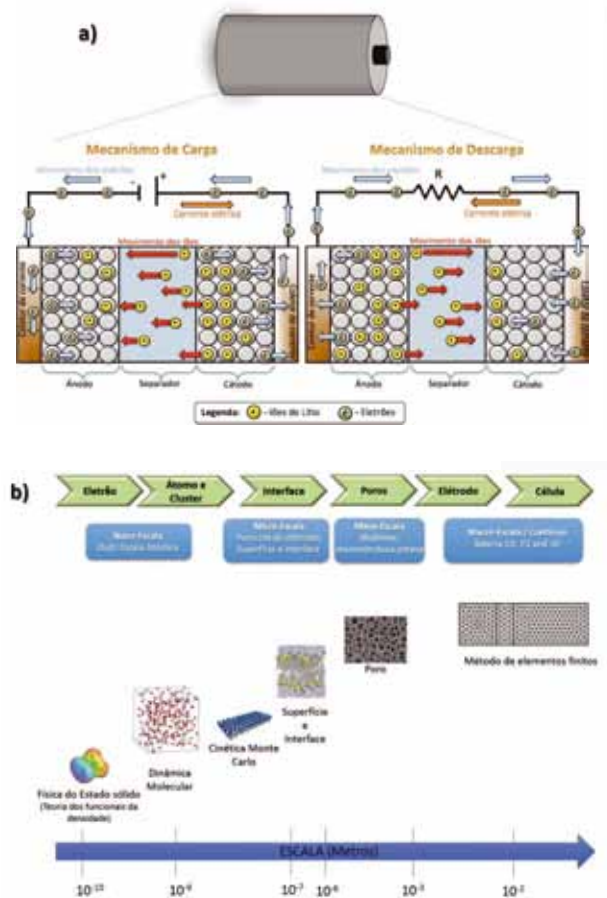


Fig. 1 - Representação esquemática: a) de uma bateria íões de lítio nos processos de carga e descarga; b) das diferentes escalas físico-químicas no estudo e otimização de baterias.

No processo de carga, através da aplicação de uma diferença de potencial, por cada íon de lítio que se desloca do cátodo para o ânodo atravessando o separador, um eletrão percorrerá o circuito externo, originando a uma corrente elétrica que carrega a bateria. No processo de descarga, o movimento dos eletrões e dos íões ocorrerá no sentido inverso.

A Figura 1b mostra os diferentes níveis físicos: nanoescala, mesoescala, microescala e macroescala do funcionamento das baterias, que são estudados com diferentes modelos e abordagens teóricas [3].

2. Relevância da simulação de baterias de íões de lítio

A última década foi marcada por um significativo avanço e desenvolvimento da indústria tecnológica no âmbito dos dispositivos eletrónicos portáteis, tais como telemóveis (*smartphones*), computadores portáteis, *tablets* e veículos elétricos entre outras tecnologias (Figura 2a). Esta evolução tecnológica exigiu que os sistemas de armazenamto, como por exemplo as baterias de íões de lítio, atingissem um novo patamar de resposta às novas necessidades apresentadas por estes dispositivos eletrónicos portáteis. Neste contexto, foram requeridas uma elevada performance e autonomia, que se traduzem no aumento da sua capacidade, potência, densidade energética, bem como serem mais finas, leves e ecológicas, sem esquecer as questões de segurança e de fiabilidade de utilização, críticas nesta tecnologia.

No sentido de satisfazer estas exigências, a simulação computacional tem desempenhado um papel de relevo permitindo testar a influência de diversos parâmetros no desempenho da bateria, tais como a criação de novas geometrias para as baterias e seus componentes (elétrodos, separador e eletrólito), a aplicação de diferentes materiais ativos nos elétrodos, a utilização de diferentes materiais poliméricos no separador e de diferentes soluções eletrolíticas, como também a aplicação de materiais mais ecológicos. O objetivo é verificar as condições e os materiais que contribuem para aumentar a capacidade de uma bateria, dotando-a de maior autonomia, permitindo um maior número de ciclos e alcançar mais elevadas potências e densidades energéticas para diversas taxas de carga e descarga. Nos estudos das geometrias das baterias, é possível obter uma diminuição da resistência à condução elétrica e da condutividade e difusão iónicas pela otimização das distâncias a percorrer pelas cargas durante os processos de carga e descarga, bem como aumentar o espaço disponível para aplicação de outros componentes num dispositivo eletrónico.

Como se mostra na Figura 2b, as baterias com geometrias em forma de U, moldura e anel podem ser aplicadas, respetivamente, aos telemóveis, ta-

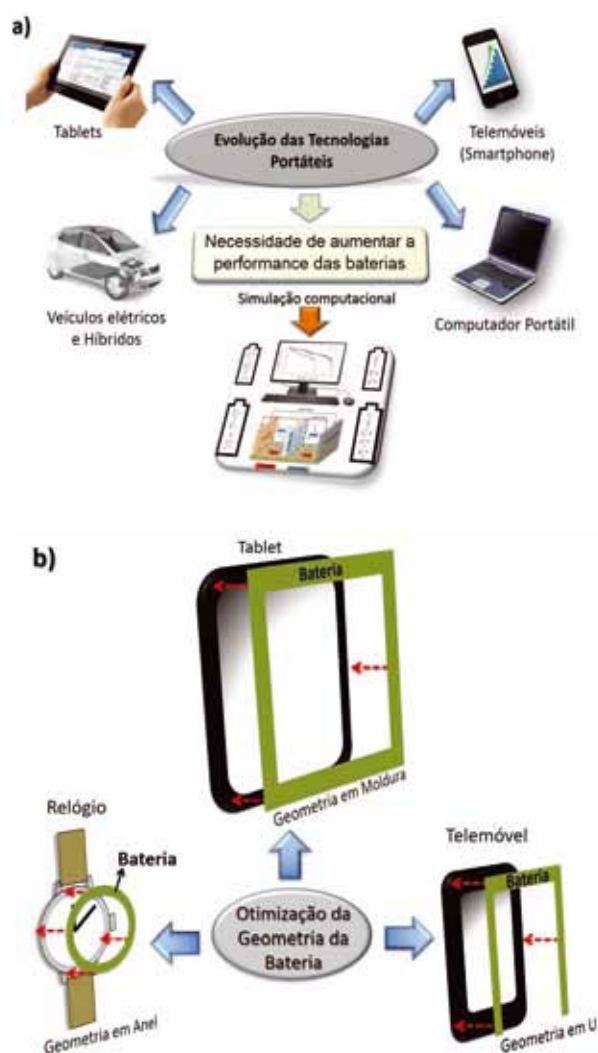


Fig. 2 - Representação esquemática de: a) alguns dispositivos eletrónicos portáteis que utilizam baterias de íões de lítio. b) aplicação de diferentes tipos de geometria da bateria (em forma de U, moldura e anel) em dispositivos eletrónicos portáteis.

blets e relógios de pulso ocupando apenas as margens destes dispositivos. Assim, o fabricante possui uma maior disponibilidade de espaço na zona central do dispositivo para aplicação de outros sistemas eletrónicos.

A otimização da geometria permite ainda o aumento da capacidade, desempenho e a autonomia das baterias. As baterias com geometria interdigitada (Figura 3) destacam-se pelo aumento de capacidade e autonomia, uma vez que este formato diminui significativamente a resistência associada ao movimento e transporte de cargas, sendo esta uma opção promissora a aplicar tanto em veículos elétricos como em baterias impressas para serem integradas em dispositivos portáteis e flexíveis [4].

Como se pode observar na Figura 3a, a otimização de uma geometria interdigitada relativamente a uma geometria convencional com as mesmas dimensões pode ser conseguida por um balanço entre o número dígitos e respetivas espessura e comprimento. A figura 3b mostra que se pode aumentar a capacidade de uma bateria aumentando o número de dígitos e o seu comprimento.

É também pelo ensaio de diferentes geometrias que se po-

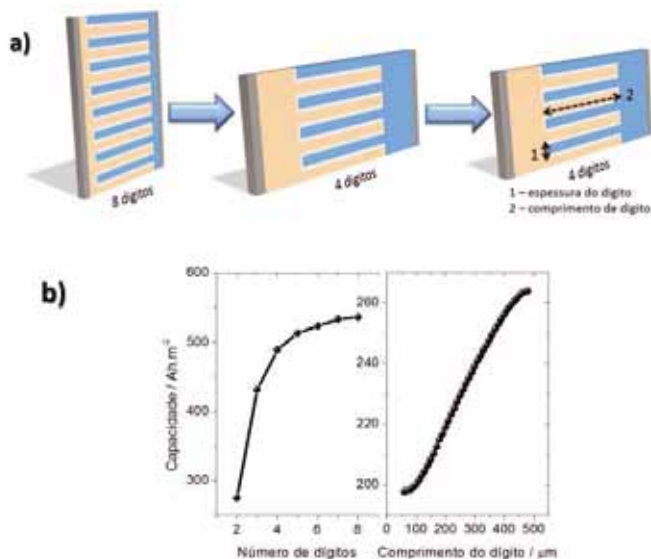


Fig. 3 - a) Representação esquemática das variações dos parâmetros geométricos na geometria interdigitada; b) Otimização do valor da capacidade em função do número de dígitos e do seu comprimento mantendo o mesmo volume final da bateria.

dem estudar os efeitos térmicos devido à geração de calor durante o funcionamento (seja em carga ou em descarga) e as trocas de calor com o exterior, permitindo aumentar a eficiência de dissipação para que não sejam atingidas temperaturas elevadas que provocam a degradação acelerada dos materiais e dos diferentes componentes das baterias.

3. Modelos teóricos das baterias de íões de lítio

O desenvolvimento de modelos computacionais de baterias de íões de lítio à macroescala passa por várias fases, tais como o desenho da bateria, a implementação das equações dos diferentes processos relevantes que nela acontecem e a obtenção e análise de dados. Existe uma grande diversidade de programas comerciais que permitem realizar as simulações, tais como Abaqus, Ansys, Comsol Multiphysics, Matlab, entre outros. Por outro lado, o modelo teórico e os métodos de resolução numérica podem ser implementados utilizando linguagens de programação tais como C++, Fortran, etc.

As simulações podem considerar modelos térmicos, mecânicos e eletromagnéticos, entre outros, que fornecem valiosos contributos complementares ao modelo eletroquímico, aquele que melhor descreve os processos fundamentais que ocorrem no funcionamento de baterias. A Figura 4 mostra a interligação entre os vários modelos que podem ser aplicados nas baterias de íões de lítio, bem como os dados de entrada necessários para cada modelo e os tipos de resultados obtidos nas simulações.

A Figura 5 mostra as etapas que devem ser seguidas na construção, implementação e execução da simulação de modelos teóricos de baterias de íões de lítio.

Após a definição do tipo de estudo a realizar e do número de dimensões do problema (linear - 1D, em área - 2D, ou em volume - 3D) e escolhida a geometria de configuração dos elétrodos e do separador (por exemplo, interdigitada, como se mostra na Figura 3a, ou convencional como se pode ver na Figura 6), é escolhido o tipo de modelo que se conjuga

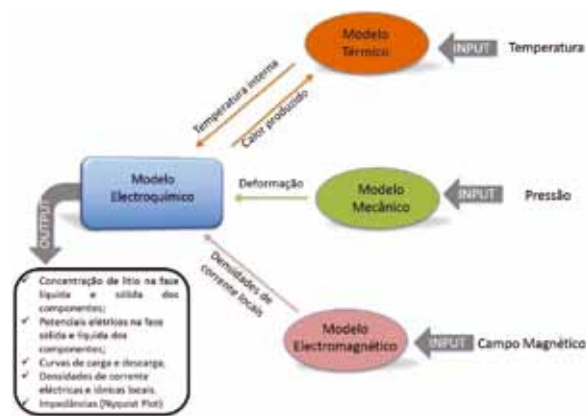


Fig. 4 - Diferentes modelos utilizados na simulação de baterias de íões de lítio e suas interligações.



Fig. 5 - Etapas de uma simulação de baterias de íões de lítio.

com o modelo eletroquímico e são estabelecidas as condições fronteira que definem o espaço ocupado por cada componente, os limites da bateria e as fases sólida e líquida dos elétrodos (Figura 6 b).

As constantes físicas e eletroquímicas relativas aos materiais que são utilizados nos diversos componentes da bateria (elétrodos, separador, eletrólito e coletores de corrente), são introduzidas como parâmetros no programa de simulação (por exemplo, a constante de um gás ideal R , ou a constante de Faraday F), bem como a temperatura T a que se pretende fazer a simulação (embora no modelo térmico T seja uma variável). Devem ainda ser definidos os valores iniciais de todas as variáveis que representam as grandezas físicas que os modelos contemplam, como por exemplo: a concentração de íões de lítio no eletrólito ($C_{L,0}$), a concentração de lítio na fase sólida do elétrodo (C_F), ou o potencial da fase líquida no eletrólito ($\phi_{L,0}$). É também necessário introduzir a intensidade de corrente aplicada quer se trate de um processo de carga ou de descarga da bateria.

Os elétrodos têm uma fase sólida e uma fase porosa preenchida pelo eletrólito (daí ser designada por

fase líquida) através da qual se fará a intercalação ou a extração dos íons de lítio. Tendo em conta os diferentes materiais ativos aplicados no ânodo e no cátodo, são introduzidos os valores dos seguintes parâmetros: concentração máxima de lítio na fase sólida $C_{E,max}$, raio das partículas esféricas do material

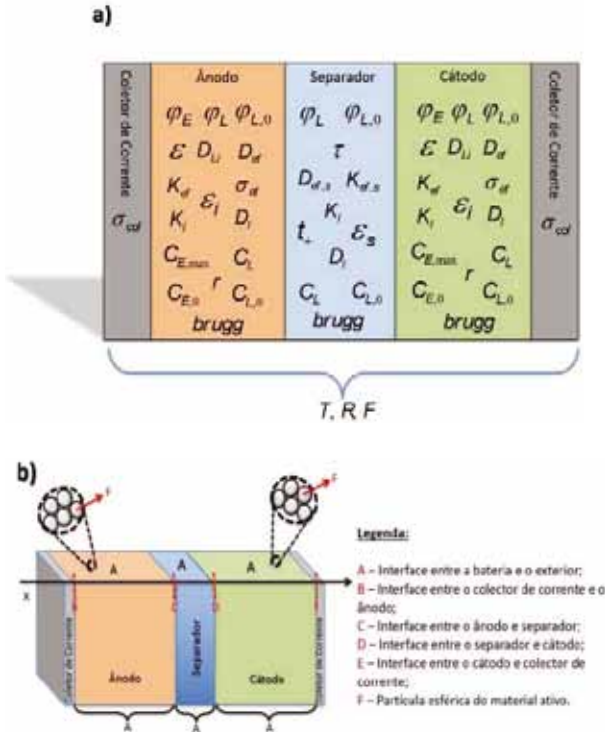


Fig. 6 - Representação esquemática: a) dos parâmetros, dos valores iniciais nos diversos componentes da bateria e das constantes físicas presentes no modelo; b) das fronteiras presentes numa bateria de íons de lítio com geometria convencional.

ativo (estrutura cristalina que funciona como reservatório de íons de lítio no qual “saem” e “entram” os íons de lítio no processo de carga e descarga, respetivamente) r , coeficiente de difusão iónica efetiva na fase líquida D_{ef} , coeficiente de difusão de lítio na fase sólida D_{Li} , condutividade iónica efetiva na fase líquida K_{ef} , condutividade elétrica efetiva na fase sólida σ_{ef} , sendo esta dependente do valor da condutividade elétrica na fase sólida σ , da porosidade dos elétrodos ϵ_a e ϵ_c , do coeficiente de Bruggeman b , da fração de volume dos aditivos de condução elétrica (*fillers*) em cada elétrodo ϵ_a e ϵ_c , do potencial elétrico na fase líquida φ_L . Para o potencial elétrico na fase sólida dos elétrodos φ_E é introduzida uma função de interpolação que traduz o valor do potencial na fase sólida de cada elétrodo em função da concentração de lítio na fase sólida do mesmo elétrodo. Esta interpolação depende do material ativo aplicado em cada elétrodo.

Atualmente as baterias têm um separador constituído por um material polimérico poroso preenchido pelo eletrólito. Os parâmetros do separador a considerar nas simulações são a porosidade ϵ_s , o coeficiente de difusão efetiva dos íons $D_{ef,S}$, a condutividade efetiva dos íons $K_{ef,S}$, o coeficiente de Bruggeman b e a tortuosidade τ , uma vez que os íons não atravessam

o separador segundo uma linha reta, mas percorrem uma trajetória irregular ao longo dos poros difundindo-se através do eletrólito.

Os parâmetros relevantes para o eletrólito têm os mesmos valores independentemente do local que ocupe (seja no separador ou nos poros dos elétrodos) e são a condutividade iónica K_i , que depende da concentração de íons de lítio no eletrólito C_L , o coeficiente de difusão iónica D_i e o número de transporte t^+ .

Quanto aos coletores de corrente, apenas é introduzido o valor da condutividade elétrica (σ_{col}) de acordo com o material condutor aplicado.

4. O modelo eletroquímico de Doyle/Fuller/Newman

A maioria dos modelos computacionais de baterias de íons de lítio utiliza o modelo eletroquímico de Doyle/Fuller/Newman [5-8], cuja resolução numérica segue um método de elementos finitos [9].

Este modelo descreve com boa precisão a resposta corrente/tensão a partir de um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares que representam os processos de difusão dos íons de lítio nas fases líquida e sólida dos elétrodos

Nos elétrodos

A variação da concentração de íons de lítio no eletrólito presente nos elétrodos, C_L , em função do tempo combina a lei de difusão de Fick com a densidade de corrente de intercalação/extração, j_{Li^+} , associada à transferência dos íons entre as fases líquida e sólida, de acordo com a equação:

$$\epsilon \frac{\partial C_L}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla C_L) + a(1 - t^+) j_{Li^+} \quad (1)$$

sendo a o valor médio da área da interface entre a matriz sólida do elétrodo e o eletrólito.

A difusão pode ser modelada usando uma equação de difusão radialmente simétrica (considerando a forma esférica para as partículas do material ativo nos elétrodos), como é apresentado na equação:

$$\frac{\partial C_E}{\partial t} = D_{Li} \left[\frac{\partial^2 C_E}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_E}{\partial r} \right] \quad (2)$$

em que a variação da taxa de concentração de lítio na fase sólida C_E , ao longo do raio r da partícula de material ativo depende do coeficiente de difusão de lítio na fase sólida D_{Li} .

Por sua vez, a densidade de corrente j_{Li^+} , está associada às diferenças de potencial entre as fases sólida e líquida, sendo descrita pela equação de Butler-Volmer:

$$j_{Li^+} = j_0 \left\{ \exp\left(\frac{F\eta}{2RT}\right) - \exp\left(-\frac{F\eta}{2RT}\right) \right\} \quad (3)$$

Sendo F a constante de Faraday no qual η é definido como o potencial de ativação (*overpotential*) e traduz a diferença de potencial entre as fases sólida e líquida do elétrodo ($\varphi_E - \varphi_L$) face à tensão da bateria em circuito aberto u^0 :

$$\eta = \varphi_E - \varphi_L - u^0 \quad (4)$$

Na equação (3), j_0 é uma densidade de corrente que depende em cada instante das concentrações e da difusão dos iões entre as fases sólida e líquida.

O potencial elétrico na fase líquida φ_L , é expresso pela lei de Ohm considerando os processos que contribuem para as variações locais da concentração iónica (difusão e extração ou intercalação):

$$-\nabla \cdot (K_{ef} \nabla \varphi_L) = F a j_{Li^+} + \frac{2RT}{F} (1 - t^+) \nabla \cdot [\nabla \ln(C_L)] \quad (5)$$

Já na fase sólida, o cálculo do potencial φ_E , é obtido a partir de fluxo de iões de lítio de acordo com a lei de Faraday:

$$-\nabla \cdot (\sigma_{ef} \nabla \varphi_E) = F a j_{Li^+} \quad (6)$$

O coeficiente de difusão iónica efetivo na fase líquida é reduzido do coeficiente de difusão iónica por um fator que tem em conta a tortuosidade, expressando-se por:

$$D_{ef} = D_i \varepsilon^b \quad (7)$$

expressão semelhante se aplica à condutividade iónica efetiva relativamente à condutividade iónica:

$$K_{ef} = K_i \varepsilon^b \quad (8)$$

sendo ε a porosidade de cada eletrodo e $b = 1,5$ é o coeficiente de Bruggeman que melhor se ajusta à distribuição das formas geométricas dos poros.

Por seu turno, a condutividade elétrica efetiva dos eletrodos é diminuída da condutividade elétrica de cada material ativo em cada eletrodo devido às respetivas porosidades e frações de aditivos (*fillers*):

$$\sigma_{ef} = \sigma (1 - \varepsilon - \varepsilon_f) \quad (9)$$

No separador

Os iões de lítio difundem-se através do separador, não havendo aí lugar a processos de oxidação/redução ou, equivalentemente, de intercalação/extração. Neste caso o processo de difusão iónica é descrita por uma equação mais simples do que a equação (1) para os eletrodos:

$$\varepsilon_s \frac{\partial C_L}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef,s} \nabla C_L) \quad (10)$$

À semelhança dos eletrodos, a equação (5) também descreve o potencial na fase líquida do separador, sendo a condutividade iónica efetiva dada por:

$$K_{ef,s} = K_i \varepsilon_s^b \quad (11)$$

De igual forma o coeficiente de difusão iónica efetivo na fase líquida é expresso por:

$$D_{ef,s} = D_i \varepsilon_s^b \quad (12)$$

5. Considerações finais

As simulações computacionais descritas e apresentadas neste artigo à macro/micro-escala, permitem obter uma previsão e otimização do desempenho de baterias de iões de lítio tendo em conta os fenómenos electroquímicos, térmicos e mecânicos que ocorrem durante o seu funcionamento. Ao mesmo tempo, essas simulações contribuem para uma melhor compreensão desses fenómenos pela forma como se sucedem, se interligam e se condicionam mutuamente, permitindo observar o seu alcance e a sua extensão em todos os componentes de uma bateria.

O recurso às simulações é fundamental não só para a previsão de resultados experimentais, como também para melhorar os procedimentos experimentais adotados nos ensaios de laboratório. Não menos importante, permitem um elevado número de testes e estudos que a serem feitos em laboratório teriam custos financeiros elevadíssimos além de que demorariam tempos infínitos a realizar.

É pelas simulações computacionais que se torna possível o desenvolvimento de modelos teóricos que permitem uma otimização das baterias tendo em vista aplicações específicas, como, por exemplo, a diminuição da espessura ou do seu peso, uma vez que submarinos de controlo remoto aplicados em oceanografia, inspeção de pontes, de mapeamento, bem como os sistemas de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado ou drone) necessitam de baterias leves que alimentem os seus equipamentos (sensores, sistemas de sonar e de captação de imagem), sem comprometer a autonomia e a eficiência destes sistemas. Baterias leves são igualmente relevantes em dispositivos médicos, etiquetas RFID e cartões inteligentes, entre outros. Será também através de simulações computacionais que se irá assistir à evolução de baterias de estado sólido, em que os atuais eletrólitos líquidos poluentes serão substituídos por eletrólitos sólidos mais eficientes e ecológicos.

Agradecimentos

Aos colegas do Centro de Física da Universidade do Minho (<http://www.cf-um-up.pt/>) e do BCMaterials (www.bc-materials.net) no âmbito da investigação em Electroactive Smart Materials (<https://www.esmg.pt>) pelas interessantes discussões, trabalho conjunto e excecional ambiente. Agradecemos à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo apoio através do projeto estratégico UID/FIS/04650/2013 e UID/QUI/00686/2013 (incluindo os fundos FEDER através do Programa COMPETE 2020 e Fundos Nacionais), projeto PTDC/CTM-ENE/5387/2014, PTDC/FIS-MAC/28157/2017 e a bolsa SFRH/BPD/112547/2015 (CMC).

Referências

1. Mohtasham, J., Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia*, 2015. 74(Supplement C): p. 1289-1297.
2. Diouf, B. and R. Pode, Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy*, 2015. 76(Supplement C): p. 375-380.
3. Miranda, D. C. M. Costa and S. Lanceros-Méndez, Lithium ion rechargeable batteries: State of the art and future needs of microscopic theoretical models and simulations. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015. 739: p. 97-110.
4. Costa, C. M. and S. Lanceros-Méndez, *Printed Batteries: Materials, Technologies and Applications*, John Wiley & Sons, 2018.
5. Doyle, M., T.F. Fuller, and J. Newman, Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 1993. 140(6): p. 1526-1533.
6. Doyle, M., et al., Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 1996. 143(6): p. 1890-1903.
7. Fuller, T.F., M. Doyle, and J. Newman, Simulation and Optimization of the Dual Lithium Ion Insertion Cell. *Journal of The Electrochemical Society*, 1994. 141(1): p. 1-10.
8. Cai, L. and R.E. White, Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) software. *Journal of Power Sources*, 2011. 196(14): p. 5985-5989.
9. Koutromanos, Ioannis, *Fundamentals of Finite Element Analysis: Linear Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, 2018.



Daniel Miranda, licenciou-se em Ensino de Física e Química em 2005, finalizou o mestrado em Física em 2008 e obteve o grau de Doutor em Física em 2017 na Universidade do Minho, Braga, Portugal. Atualmente, é professor Assistente Convocado no Instituto Politécnico do Cávado e Ave (Barcelos, Portugal), membro integrado do Applied Artificial Intelligence Laboratory – IPCA (Barcelos, Portugal) e investigador no grupo de investigação Electroactive Smart Materials da Universidade do Minho (Braga, Portugal). O seu trabalho de investigação está focado no desenvolvimento de simulação e modelação computacional em sistemas de armazenamento de energia, incluindo baterias de ião-lítio, baterias de ião-sódio e baterias impressas.



Renato Gonçalves licenciou-se em Química no ano de 2009, terminou o mestrado em Técnicas de Caracterização e Análise Química em 2011 e obteve o grau de Doutor em Engenharia de Materiais em 2017, na Universidade do Minho, Braga, Portugal. Atualmente é investigador na Universidade do Minho na área de desenvolvimento de novos materiais magnéticos para sensores e atuadores, assim como na síntese e aplicação de novos materiais para armazenamento de energia.



António Mário Almeida, licenciado em Física pela Universidade de Coimbra, aí também concluiu o mestrado em Física Tecnológica. Doutorado em Física pela Universidade do Minho, onde é Professor Auxiliar do Departamento de Física, os seus interesses de investigação centram-se no desenvolvimento de modelos computacionais para estudos de propriedades de materiais.



Carlos M. Costa, licenciou-se em Física em 2005, finalizou o mestrado em Engenharia de Materiais em 2007 e obteve o grau de Doutor em Física em 2014 na Universidade do Minho, Braga, Portugal. Atualmente, é investigador na mesma Universidade e o seu trabalho está focado no desenvolvimento de compósitos poliméricos avançados e novos materiais para aplicações de armazenamento de energia, incluindo baterias de iões de lítio, baterias de ião-sódio e baterias impressas.



Senentxu Lanceros-Méndez, é Professor Ikerbasque e Director Científico no BCMaterials, Centro Basco de Materiais, Aplicações e Nanoestruturas, Derio, Espanha. É professor associado do Departamento de Física da Universidade do Minho, Portugal (em licença), onde pertence ao Centro de Física. O seu trabalho está focado na área de materiais inteligentes e funcionais para sensores e atuadores, energia e aplicações biomédicas.

Estudo de um caso de ensino e aprendizagem da mecânica no 9.º ano de escolaridade

Maria José B.M. de Almeida^{1,3}, Marta C.S. Vasconcelos e Sá^{2,3}

¹ Departamento de Física, Universidade de Coimbra, Portugal

² Agrupamento de Escolas de Pombal, Portugal

³ CFisUC, Centro de Física da Universidade de Coimbra, Portugal
ze@fis.uc.pt

Resumo

Relatam-se práticas pedagógicas de ensino da mecânica centradas no desenvolvimento, em sala de aula, dos modelos mentais dos alunos do 9.º ano de escolaridade. Para medir este desenvolvimento usou-se um extrato do Force Concept Inventory. Os resultados permitiram concluir que houve excelentes aprendizagens dos alunos em termos de correção da maioria das preconcepções iniciais cientificamente incorretas. Salienta-se, por ter tido menor qualidade, a aprendizagem da 3.ª lei de Newton. Sugere-se a replicação em sala de aula da experiência pedagógica proposta, complementada pelo ensino desta lei através de uma linguagem um pouco diferente da habitual.

Introdução

Nos dias de hoje, a entrar nos anos 20 do século XXI, há imensas fontes de informação, tão facilmente acessíveis que vêm ao nosso encontro e nos influenciam mesmo sem quase darmos por elas. As novidades introduzidas na vida dos cidadãos são quase diárias. Surgem com frequência modificações mais ou menos profundas nas máquinas de que dependemos para a atual noção de conforto. A tecnologia reformula-se e expande-se tão rapidamente que muitos dos antigos trabalhos desempenhados pelos cidadãos são agora melhor executados por robots. Há novos empregos associados ao funcionamento das novas máquinas, mas, com algumas exceções, é praticamente impossível prever o que poderão vir a ser as oportunidades para os jovens adultos no futuro próximo.

Os professores devem compreender que o seu papel tem vindo a alterar-se profundamente nalguns aspetos. Como orientar as aprendizagens dos jovens que frequentam hoje o Ensino Básico e que virão a ser adultos dentro de dez anos [1,2]? Que competências lhes permitirão adaptar-se mais facilmente às suas vidas adultas de cidadãos produtivos da sua própria subsistência, numa sociedade que se adivinha extremamente mutável e criativa?

De acordo com uma orientação epistemológica para o ensino da Física e tendo em conta as influências das teorias construtivistas e cognitivistas da aprendizagem [3-5] entende-se que a

resposta tem de passar pelas competências associadas ao processamento das informações a que é cada vez mais fácil aceder e à capacidade de aprender a enfrentar, em sociedade, os novos desafios e oportunidades que virão a surgir. A aprendizagem da Física implica o alargamento ou a reestruturação dos modelos mentais dos alunos, ou seja, das preconcepções constituídas pelas suas ideias ou representações internas sobre o comportamento da natureza, desenvolvidas antes do seu contacto com o ensino formal da Física nas escolas [3,6]. Será útil uma educação que desde os primeiros níveis promova, em grupo, o desenvolvimento de estruturas cognitivas, a interligação de ideias, a expressão de ideias próprias e a interpretação pessoal e crítica de situações problemáticas sobre as quais, como cidadãos adultos, vão decerto ser chamados a pronunciar-se. Assim se fundamenta a educação de futuros físicos e de profissionais de ramos de engenharia e da saúde; mas também se desenvolvem em todos os jovens capacidades e competências úteis na sua adaptação às novas situações de um futuro marcado por um forte desenvolvimento tecnológico [1,2].

As questões de investigação a que se pretende responder são:

1. No início do 9.º ano os alunos já possuem modelos mentais (preconcepções) sobre o comportamento da natureza? Quais as suas características?
2. O ensino da Física normalmente praticado em sala de aula do 9.º ano aproxima os modelos mentais dos alunos dos modelos científicos que se pretende que aprendam?
3. Será possível desenhar atividades pedagógicas a desenvolver nas salas de aula do 9º ano que sejam eficazes na correção das preconcepções incorretas sobre mecânica, e que sejam compatíveis com o cumprimento total do currículo oficial?

Os conceitos básicos de mecânica e as preconcepções incorretas

Neste trabalho focam-se os conteúdos das unidades temáticas “Movimentos na Terra” e “Forças e movimentos” (movimentos retilíneos, sem inversão do sentido do movimento) a aprender no 9º ano [7]. O principal objetivo foi conseguir desenvolver e aplicar estratégias de ensino que levassem os alunos a corrigir, desde os níveis iniciais de aprendizagem [8], as conhecidas preconcepções incorretas sobre a Física [3,9-12]. Quando não são detetadas atempadamente pelos docentes, elas vão-se propagar para as idades adultas, criando resistências cada vez mais fortes a futuras tentativas de ensino da Física. Na Caixa 1 indicam-se algumas preconcepções sobre conceitos de mecânica, bem como razões para a sua existência.

Preconcepções incorrectas comuns	“Experiências do dia-a-dia” invocadas pelos alunos	Razões físicas para as incorreções (omissões racionais):
“... os corpos mais pesados caem mais rapidamente que os corpos menos pesados...”	... os balões que não sobem, caem devagarinho... ... os frutos das árvores caem mais rapidamente que as folhas que se soltam...	... a impulsão de corpos leves no ar (fluidos) não é desprezável... ... os efeitos da resistência do ar dependem da forma e massa dos corpos...
“... para manter o movimento de um corpo num determinado sentido, temos de continuar a exercer força sobre ele, com o sentido do movimento...”	... caixote ou carrinho do supermercado que se empurram e que param “imediatamente” quando se deixa de os empurrar...	... efeitos de forças de atrito...
“... se atiro um corpo para cima, na vertical, ele continua a subir até “esgotar a força” com que o atirei...”	... o corpo sobe, cada vez mais devagar; depois vai parar; e só depois desce...	... os corpos não “têm” forças... ... existem forças instantâneas cujo efeito é apenas comunicar uma velocidade inicial para uma 2ª fase do movimento...
“... num choque, a força que um camião exerce sobre um carro pequeno é maior que a força que o carro exerce sobre o camião...”	... o carro fica bastante danificado e o camião fica quase na mesma...	... forças ação e reação da 3ª lei, simultâneas, com igual intensidade... ... a análise de efeitos posteriores tem de considerar todas as forças aplicadas em cada corpo...

Caixa 1 - Preconcepções comuns sobre mecânica devidas a “experiências do dia-a-dia” presentes na realidade dos jovens alunos, e algumas razões para a sua existência.

Como combater estas bases incorretas de cognição em termos de conhecimentos de Física? Acredita-se que isto é possível conseguindo que os alunos aprendam, desde o início, a compreender e a distinguir os diferentes conceitos e as leis base da mecânica, praticando e discutindo as suas aprendizagens em situações do dia-a-dia e desenvolvendo atividades experimentais bem compreendidas. Assim poderão fundamentar a criação de estruturas cognitivas coerentes com os modelos científicos, desde o início das aprendizagens da Física.

Investigação educacional quase-experimental

Desenhou-se uma experiência de investigação educacional quase-experimental sobre o ensino na prática de sala de aula que foi concretizada no ano letivo de 2017/2018. Neste tipo de investigação quase-experimental [13] comparam-se as aprendizagens dos alunos de duas amostras – o grupo experimental e o

grupo de controlo – submetidas a “tratamentos pedagógicos” diferentes. É uma investigação experimental porque envolve a intervenção dos investigadores, que definem a atuação pedagógica sobre o grupo experimental, o “tratamento” considerado como variável independente. Trata-se de uma investigação quantitativa, uma vez que os resultados – os valores da variável dependente – são medidos através dos números que traduzem as classificações obtidas pelos alunos em testes de avaliação, respondidos antes e após as intervenções letivas e aceites como instrumentos de medida. A designação “quase-experimental” apenas se refere ao facto de os indivíduos das amostras não serem escolhidos ao acaso, mas constituírem turmas definidas pela própria escola. Deve haver o cuidado de uniformizar outras variáveis que poderão vir a influenciar os resultados obtidos. Assim, todas as turmas envolvidas neste estudo tinham aproximadamente o mesmo número de alunos,

menor ou igual a 20, apresentavam percentagens semelhantes de alunos de ambos os sexos e eram equivalentes em termos de aproveitamento escolar. Ao definir os grupos de controlo, com alunos sujeitos ao “ensino tradicional” praticado atualmente nas escolas, houve o cuidado de escolher sempre duas turmas, para se poder assegurar uma maior uniformidade estatística inicial dos grupos estudados. Um dos fatores importantes sobre a equivalência inicial dos grupos experimental e de controlo será a semelhança detetada nas respostas aos pré-testes.

Nesta investigação o grupo experimental foi constituído por uma turma de 9.º ano da Escola Secundária de Pombal com 20 alunos, com igual número

de rapazes e raparigas, com um aluno a repetir o 9.º ano e três alunos indicados como tendo necessidades educativas especiais. Esta turma foi lecionada por uma das autoras deste trabalho (MVS). Como grupo de controlo usaram-se duas turmas do 9º ano de escolas da região centro com o total de 24 alunos, que responderam ao pré-teste. Como no final do semestre letivo foram alegadas “dificuldades relacionadas com falta de tempo para cumprir o programa nestas duas turmas”, recorreu-se a outras duas turmas de escolas da região centro com o total de 38 alunos, que responderam ao pós-teste. Por esta razão existe um grupo de controlo pré e um outro grupo de controlo pós. Reconhece-se que este facto perturbou o desenvolvimento da experiência, mas não há qualquer razão para esperar que os alunos do grupo de controlo pós pudessem ter tido um comportamento significativamente diferente do dos seus colegas no início das atividades letivas do 9º ano.

Como instrumento de medida das aprendizagens usou-se uma tradução para português das 15 questões do *Force Concept Inventory*, FCI, [14,15] que focam os conceitos e leis da

mecânica ensinada no 9º ano de escolaridade em Portugal. Este instrumento é largamente aceite pela comunidade científico-educacional como adequado à deteção da qualidade das aprendizagens dos alunos sobre os conceitos básicos de mecânica [9, 11, 14, 16]. É mais frequentemente usado com alunos dos primeiros anos universitários, mas também com alunos do ensino secundário [11, 17]. Tanto quanto é do nosso conhecimento, esta é a primeira aplicação para detetar a qualidade das aprendizagens de alunos do 9º ano de escolaridade. O FCI contém questões de escolha múltipla com cinco hipóteses de resposta, das quais uma está correta e as outras são coerentes com preconceções incorretas encontradas com elevada frequência mesmo em amostras constituídas por alunos universitários. Tanto as questões como as alternativas de resposta focam situações comuns do dia-a-dia e são de fácil compreensão tanto por alguém que nunca aprendeu formalmente conceitos de física na escola como pelo jovem iniciado nos conteúdos escolares. A Caixa 2 contém as traduções para português de três questões do FCI.

- Q4. Um camião colide de frente com um carro ligeiro. Durante a colisão:
- o camião exerce uma força maior no carro do que o carro exerce no camião;
 - o carro exerce uma força maior no camião do que o camião exerce no carro;
 - nenhum dos veículos exerce uma força no outro, o carro despedaça-se simplesmente porque está no caminho do camião;
 - o camião exerce uma força no carro, mas o carro não exerce uma força no camião;
 - o camião exerce a mesma força no carro que o carro exerce no camião.
- Q25. Uma mulher exerce uma força horizontal constante numa caixa grande, que está no chão. Em consequência, a caixa move-se horizontalmente sobre o chão, com uma velocidade constante " v_0 ". A força horizontal constante aplicada pela mulher:
- tem a mesma intensidade que o peso da caixa;
 - é maior que o peso da caixa;
 - tem a mesma intensidade que a força total que resiste ao movimento da caixa;
 - é maior do que a força total que resiste ao movimento da caixa;
 - é maior, quer do que o peso da caixa, quer do que a força total que resiste ao movimento da caixa.
- Q30. Apesar de um vento muito forte, uma jogadora de ténis consegue bater na bola com a sua raquete, de modo que a bola passa sobre a rede e cai no campo do jogador oponente. Considere as seguintes forças:
- Uma força descendente da gravidade;
 - Uma força devida à "batida";
 - Uma força exercida pelo ar.
- Quais destas forças atuam na bola de ténis no intervalo de tempo após a bola deixar de estar em contacto com a raquete e antes de tocar no campo do outro jogador?
- apenas a força 1;
 - as forças 1 e 2;
 - as forças 1 e 3;
 - as forças 2 e 3;
 - as forças 1, 2 e 3.

Caixa 2 - Exemplos de questões do instrumento de avaliação (tradução do FCI [14, 15]).

No tratamento do grupo experimental utilizaram-se metodologias de ensino orientadas para a promoção e (re)construção dos modelos mentais dos alunos sobre os conteúdos de mecânica. Nas primeiras aulas refletiu-se em grande grupo sobre a palavra "modelo" e os contextos em que poderia ser utilizada. Recordou-se a noção do modelo científico apresentada no 7.º ano, onde são referidos alguns marcos importantes na história do modelo atómico. Foi possível concluir, em conjunto, que o conhecimento constitui uma estrutura em evolução, na qual as ideias se vão associando umas às

outras, servindo de base para analisar e explicar situações concretas. Esta estrutura ajuda a pensar e a processar novas aprendizagens, levando à construção de modelos mentais consistentes, que possibilitam a análise crítica e válida das situações à luz do conhecimento que se possui em cada momento.

Desenvolveram-se atividades letivas com o envolvimento de todos os alunos, levando-os a pensar e a escrever sobre cada assunto, a expor as suas dúvidas e a apresentar e a defender de forma sustentada as suas ideias. Sobre alguns temas utilizaram-se protocolos do manual [18], enquanto noutros as atividades foram concebidas pelos alunos, com o apoio da docente.

Para contextualizar as atividades letivas da Física em situações do dia-a-dia, implementou-se o Referencial de Educação Rodoviária, integrado no Projeto de Educação para a Saúde, obrigatório em todas as

escolas. No espaço exterior à escola os alunos fizeram observações e recolha de dados sobre os movimentos de automóveis, o que permitiu calcular valores de rapidez média, traçar gráficos e registar comportamentos. Analisaram-se dados estatísticos relacionados com a sinistralidade e valores de velocidade permitidos por lei, procurando-se perceber se as imposições legais teriam sido cumpridas pelos condutores observados. Introduziram-se os temas da eco-mobilidade e da equidade na mobilidade. Este tratamento integrado foi distinguido através de um convite da Direção Geral da Educação a uma das autoras (MVS), para a sua apresentação à comunidade letiva [19] inserida na componente de currículo Cidadania e Desenvolvimento.

Como exemplo do desenvolvimento de atividades pensadas pelos alunos foi-lhes solicitado que, aos pares,

elaborassem por escrito duas hipóteses acerca do comportamento das forças de atrito e propusessem protocolos experimentais que permitissem verificar essas hipóteses, validando-as ou não. Os alunos puderam utilizar o manual e a web para fazer pesquisas antes de elaborarem o protocolo experimental. A docente acompanhou e aconselhou os alunos, sempre que solicitado. A maioria das propostas apresentadas foi no sentido de testar se a massa dos objetos e se a área de contacto com os suportes, influenciariam

a intensidade das forças de atrito. Os resultados obtidos foram discutidos em grande grupo e foram tiradas as conclusões adequadas. Os alunos registaram estas conclusões no caderno diário e, em aula, procederam à leitura das páginas do manual respeitantes a este assunto.

Incentivaram-se os diálogos e as discussões sobre situações concretas e o “pensar em voz alta”. Promoveu-se a apresentação de justificações e dúvidas por escrito, atividades que menos atraíam os alunos. Insistiu-se na resolução de problemas e exercícios do manual que obrigavam à análise de gráficos e tabelas e à elaboração de textos explicativos. Era permitida a realização de exercícios aos pares, sempre que os alunos o solicitavam.

Todos os conteúdos letivos foram lecionados de acordo com o planificado, sem quaisquer atrasos. As atividades de índole prática decorreram quase todas as semanas, quando a turma estava organizada em turnos. Para cada uma das abordagens que envolveram a conceção, pelos alunos, de hipóteses e de atividades experimentais que as testassem, como no estudo do atrito e no estudo sobre o conceito de resultante das forças aplicadas, foram necessárias três aulas. Isso limita uma aplicação mais frequente deste tipo de intervenção dos estudantes.

Nas turmas do grupo de controlo pós foram realizadas atividades práticas do manual [18]. Tanto quanto é do conhecimento das autoras, não foram promovidas discussões em grande ou pequeno grupo, nem atividades de produção de texto.

Resultados e análise

As aprendizagens dos alunos são reveladas pela comparação entre os valores médios das percentagens de respostas corretas obtidas no pós-teste com as obtidas no pré-teste. Pode definir-se um ganho médio absoluto G através da diferença entre estes dois valores. No entanto, com esta definição podem ser subvalorizados os resultados de alunos com boas classificações no pré-teste, o que reduziria as suas hipóteses para o ganho absoluto possível. Assim, foi proposta a definição de ganho normalizado $\langle g \rangle$ [11], que é igual ao ganho absoluto G dividido pelo maior ganho possível para cada amostra. Na Caixa 3 indica-se o modo de calcular o ganho médio normalizado $\langle g \rangle$ [11], bem como o significado que os autores desta proposta entendem dever ser atribuído aos diferentes valores de $\langle g \rangle$ obtidos pelas amostras analisadas.

$\langle g \rangle$ é um parâmetro muito utilizado para verificar a eficácia de diferentes tratamentos pedagógicos nas aprendizagens dos alunos (ver referência [11]).

$$\langle g \rangle = \frac{\text{média de \% de acertos pós} - \text{média de \% de acertos pré}}{100 - \text{média de \% de acertos pré}}$$

Este valor varia no intervalo [0;1]. De acordo com [11], valores inferiores a 0,30 não têm grande significado, valores entre 0,30 e 0,70 indicam uma boa aprendizagem (tanto melhor quanto mais próximos de 0,70) e valores superiores a 0,70 indicam aprendizagens excelentes.

Caixa 3 - Definição do ganho normalizado $\langle g \rangle$

Os resultados médios, em percentagem, dos pré- e pós-testes dos grupos experimental e de controlo estão indicados na Tabela 1. Ao longo do semestre houve uma redução de alunos no grupo experimental. Pode verificar-se que todos os alunos tinham inicialmente um largo espectro de preconceções incorretas pois os dois grupos inquiridos obtiveram a mesma média de acertos de 15 % no pré-teste. Note-se que havendo cinco opções de escolha, seria de esperar um acerto estatístico de 20 %, se os alunos respondessem completamente ao acaso.

O grupo de controlo pós obteve no pós-teste, após a leção dos conceitos básicos da mecânica seguindo uma metodologia normalmente praticada em sala de aula, uma classificação semelhante às obtidas pelos seus colegas nos pré-testes (idêntica quando se consideram as dispersões dos resultados). Isto revela que esse tipo de ensino não foi eficaz na aproximação aos modelos científicos dos modelos mentais iniciais dos alunos sobre os conteúdos da mecânica.

Tabela 1 - Médias dos pré- e pós-testes do grupo experimental e dos grupos de controlo.

	Número de estudantes	Média da % de acertos	
		Pré-teste	Pós-teste
Grupo controlo pré	24	15 ± 12	--
Grupo controlo pós	38	--	17 ± 11
Grupo experimental	20 / 17	15 ± 08	58 ± 09

O grupo experimental conseguiu uma boa aprendizagem durante as atividades letivas, passando de uma média inicial de 15 % de acertos para uma média final de 58%, com um ganho médio normalizado $\langle g \rangle = 0,51$.

Uma análise dos resultados do grupo experimental para cada uma das questões mostrou uma distribuição não uniforme de aprendizagens pelos diversos temas envolvidos. A Tabela 2 contém oito questões do FCI cujos conteúdos foram excelentemente aprendidos pelos alunos do grupo experimental, com uma média de 87 % de acertos após a leção comparados com apenas 21 % iniciais, o que leva ao valor $\langle g \rangle = 0,84$; a Tabela 3, com as restantes sete questões, mostra uma percentagem média de 22 % de acertos no pós-teste contra 10 % iniciais, ou seja, um valor $\langle g \rangle = 0,13$ que indica uma aprendizagem média muito fraca.

Tabela 2 - Percentagem de escolhas corretas dos alunos do grupo experimental; oito questões cujos conteúdos foram excelentemente aprendidos.

Questão FCI 1995	Q1 %	Q3 %	Q13 %	Q17 %	Q25 %	Q27 %	Q29 %	Q30 %	Média da % de acertos
Pré-teste	20	25	5	10	35	35	20	15	21%
Pós-teste	100	94	100	78	78	72	83	89	87%

Tabela 3 - Percentagem de escolhas corretas dos alunos do grupo experimental; sete questões cujos conteúdos foram mal aprendidos.

Questão FCI 1995	Q4 % a/r	Q15 % a/r	Q16 % a/r	Q19 %	Q20 %	Q26 %	Q28 % a/r	Média da % de acertos
Pré-teste	5	15	10	15	5	15	5	10%
Pós-teste	6	56	39	6	17	11	22	22%

Analisando apenas as quatro questões do FCI sobre a 3.^a lei de Newton ou “lei da igualdade da ação-reação”, indicadas na Tabela 3 com a sigla a/r, a percentagem média final de acertos é de 31 %, contra 9 % no início, ou um valor de $\langle g \rangle = 0,24$. Embora tenha havido aprendizagem, ela não é muito significativa.

Proposta para ensinar a 3.^a lei de Newton

São bem conhecidas as dificuldades de compreensão da 3.^a lei de Newton [8]. No trabalho que agora se apresenta verificou-se que ela é tão contraintuitiva, que mesmo os alunos que mostram ter percebido corretamente outros conceitos base cinemáticos e dinâmicos erram a sua aplicação.

Uma reflexão sobre este facto poderá apontar para as dificuldades de aprendizagem da Física devidas a linguagem mal usada e/ou mal compreendida [20]. Na 3.^a lei de Newton, usam-se as palavras ação e reação para duas ações simultâneas, sabendo que é fisicamente impossível distinguir qual delas é a ação e qual é a reação. Porquê usar duas palavras diferentes para entidades indistinguíveis? Os físicos sabem isso e não lhes causa qualquer problema esta designação. Mas, no dia-a-dia uma ação precede sempre uma reação. Esta interpretação intuitiva pode ser a causa de os alunos errarem as aplicações da 3.^a lei. Um dos erros passa por atribuírem uma intensidade maior à força exercida pelo corpo que acham que “atuou primeiro” ou “ao que vem com maior velocidade” [9], focando-se “no corpo que exerceu a ação”. Por outro lado, a palavra “reação” pode fixá-los nos efeitos “após” a interação, fazendo-os atribuir um valor mais elevado à força exercida pelo corpo que ficou menos danificado devido ao efeito do choque, quase sempre o corpo com maior massa [9].

No sentido de melhorar as aprendizagens propõe-se que se evitem as designações ação e reação para as duas forças simultâneas envolvidas numa interação. A 3.^a lei pode ser designada “lei da igualdade das duas ações simultâneas presentes numa interação”, com o seguinte enunciado: “Numa interação entre dois corpos, cada um deles exerce uma força sobre o outro; as duas forças exercidas em simultâneo, uma sobre cada um dos corpos, têm grandezas iguais e sentidos opostos”. É uma lei ou princípio universal da mecânica newtoniana. Acredita-se que esta abordagem focará os alunos na simetria da interação e não na sua origem ou nos seus efeitos.

Conclusão

Neste trabalho mostrou-se que os alunos do 9.^o ano que responderam ao pré-teste eram detentores em elevado grau das preconcepções incorretas bem conhecidas sobre os conteúdos fundamentais da mecânica. Viuse através dos resultados obtidos pelo grupo controlo pós, que o ensino tradicionalmente praticado em sala de aula não corrigiu as preconcepções incorretas que são normalmente detetadas nos pré-testes, não tendo assim aproximado os modelos mentais dos alunos dos modelos científicos que se pretende que aprendam. Verificou-se que foi possível desenvolver um tratamento pedagógico centrado na participação ativa dos alunos que corrigiu de modo muito eficaz muitas das preconcepções incorretas iniciais.

Para melhorar a aprendizagem da 3.^a lei de Newton faz-se uma proposta de futuras abordagens desta lei pondo em evidência a simetria das interações físicas. No entanto, defende-se que apenas poderá haver aprendizagens significativas se as estratégias pedagógicas utilizadas se centrarem no aluno como principal interveniente nas suas próprias aprendizagens.

Referências

- [1] Relatório do Ministério da Educação, República Portuguesa, Perfil dos alunos para o Século XXI, https://dge.mec.pt/sites/default/files/Noticias_Imagens/perfil_do_aluno.pdf (2017).
- [2] OECD Report, The future of education and skills, Education 2030, <http://www.oecd.org/education/2030/oecd-education-2030-position-paper.pdf> (2018).
- [3] M.J. de Almeida, “As diferentes teorias de aprendizagem e o ensino da física”, *Gazeta de Física*, 40(3/4), 50-54 (2017).
- [4] J. Piaget, “*Seis estudos de Psicologia*”, Publicações Dom Quixote, Lisboa (2000).
- [5] L.S. Vygotsky, “*A construção do Pensamento e da Linguagem*”, Livraria Martins Fontes, São Paulo (2001).
- [6] I.M. Greca and M.A. Moreira, “Mental models, conceptual models and modelling”, *International Journal of Science Education*, 22(1), 1-11 (2000).
- [7] Metas Curriculares do 3.^o ciclo do Ensino Básico, Ciências Físico-Químicas, https://www.spf.pt/files/files/outros/Nova%20DE/eb_cfq_metas_curriculares_3c_0.pdf (2013).
- [8] M.J. de Almeida, D. Martins, M. Sá, A. Pires and J. Tremeço, “Promoting physics teaching through student centered activities” *Research and Innovation in Physics Education: two sides of the same coin*, GIREP-MPTL 2018 International Conference, San Sebastian, Spain (2018).
- [9] L. Bao, K. Hogg and D. Zollman, “Model analysis of fine structures of student models: An example with Newton’s third law”, *American Journal of Physics*, 70(7), 766-778 (2002).
- [10] L.C. McDermott and E.F. Redish, “Resource Letter: PER-1: Physics Education Research” *American Journal of Physics*, 67(9), 755-767 (1999).

- [11] R.R. Hake, "Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses", *American Journal of Physics*, **66**, 64-74 (1998).
- [12] J.L. Docktor and J.P. Mestre, "Synthesis of discipline-based education research in physics", *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, **10**, 020119, 1-58 (2014).
- [13] J.R. Fraenkel, N.E. Wallen and H.H. Hyun, "How to Design and Evaluate Research in Education", McGraw-Hill International Edition, New York (2012).
- [14] E. Mazur, "Peer Instruction: a User's Manual", Prentice-Hall Series in Educational Innovation, New Jersey (1997).
- [15] D. Hestenes, M. Wells and G. Swackhamer, "Force Concept Inventory", *Physics Teacher* **30**(3), 141-158 (1992).
- [16] A. Madsen, S.B. McKagan and E.C. Sayre, "Gender gap on concept inventories in physics: What is consistent, what is inconsistent, and what factors influence the gap?", *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* **9**, 020121 (2013).
- [17] D. Dervic, D.S. Glamocic, A.G. Busuladzic and V. Mesic, "Teaching Physics with Simulations: Teacher-Centered versus Student-Centered Approaches", *Journal of Baltic Science Education*, **17**(2), 288-299 (2018).
- [18] A.J. Silva, C. Simões, F. Resende e M. Ribeiro, "Zoom 9 - Física-Química - 9º ano", Areal Editores, S.A. (2018).
- [19] Marta V. Sá, 4º Encontro de Segurança Rodoviária, Escola Superior de Educação, Viseu (2018).
- [20] M.J. de Almeida, "Preparação de professores de Física: uma contribuição científico-pedagógica e didática", Editora Almedina, Coimbra (2004).



Maria José B.M. de Almeida, é Professora Catedrática Jubilada do Departamento de Física da FCTUC. Doutorada em Física pela Universidade de Cambridge, foi docente de Didática da Física e orientadora de Estágios Pedagógicos e de Projetos de Investigação Educacional. Desenvolve investigação em Ensino da Física (PER), tendo orientado Teses de Doutoramento. Coordenou/colaborou em vários Projetos de Investigação sobre o Ensino da Física, nacionais e europeus.



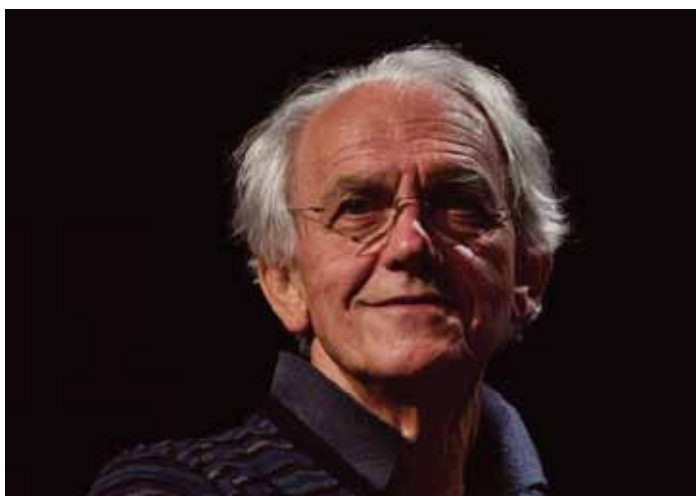
Marta Cristina S. Vasconcelos e Sá, é Professora dos Ensinos Básico e Secundário no Agrupamento de Escolas de Pombal e doutorada em Física, ramo de História e Ensino da Física, na Universidade de Coimbra. Dedicou-se à formação de professores de Física e Química dos ensinos Básico e Secundário, tendo sido orientadora cooperante de estágios pedagógicos. Colaborou como investigadora no projeto FSE/CED/83453.2008, financiado pela FCT e desenvolveu trabalho apoiado pela mesma fundação. Participou, a convite, em projetos promovidos pelo Ministério da Educação. Ao longo dos anos, tem vindo a colaborar com o CFisUC. É autora de artigos de investigação sobre o ensino da Física.

Entrevista – Gérard Mourou

Gonçalo Figueira

Departamento de Física & GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear
Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

goncalo.figueira@tecnico.ulisboa.pt



Gérard Mourou, um dos vencedores do Prémio Nobel da Física de 2018, esteve em Portugal no passado mês de Abril, para uma série de palestras em Lisboa e no Porto. Tivemos oportunidade de o entrevistar para a Gazeta de Física durante a sua visita ao Instituto Superior Técnico, e de falar sobre o Nobel, a sua investigação e a sua visão para os lasers do futuro. Para uma melhor compreensão da entrevista, recomendamos a leitura prévia do artigo “Lasers de alta potência e o Prémio Nobel da Física de 2018”, nesta mesma edição.

No início dos anos 80, estava a trabalhar na ideia de como amplificar impulsos curtos. Quero começar por lhe perguntar sobre como tudo começou – em particular, há aquela história de quando propôs à Donna Strickland (co-premiada com o Nobel da Física) que testasse pela primeira vez a técnica de *chirped pulse amplification* (CPA), e ela receou que não fosse suficientemente importante para uma tese de doutoramento.

É verdade. No início, quando a Donna começou a trabalhar comigo, ela vinha “fresquinha” da universidade. Então eu propus-lhe esta ideia, agora imagine que diz a um aluno: pegas num impulso laser, esticas, amplificas e comprimes e pronto, isso será a tua tese.... Ela disse, bem, talvez não seja suficiente... Afinal, foi uma ironia muito positiva, ela tinha razão: talvez não fosse suficientemente bom para uma tese, mas sim para um prémio Nobel!

Disse que a invenção do CPA não foi exatamente um momento *eureka*, mas sim o resultado de pensar continuamente sobre a possibilidade de alongar e comprimir os impulsos. No entanto, a ideia-chave de usar um par expensor-compressor conjugado surge quando se estava a preparar para esquiar.

Não me estava a preparar, estava mesmo já a caminho, sentado no teleférico! Quando começámos os primeiros testes de CPA com a Donna, a única forma que conseguíamos era amplificar cem vezes: começávamos com um impulso curto que era alongado por um factor de cem numa fibra óptica, amplificávamos, comprimíamos cem vezes usando um par de redes de difracção. Mas o impulso final não era “limpo”, tinha um patamar, por culpa da dispersão na fibra não ser perfeitamente compensada. Sabíamos que o conceito era muito elegante, muito poderoso, mas eu achava que estávamos limitados a essas cem vezes. E eu queria ir a mil, dez mil, cem mil vezes, como fazemos agora. Mas para isso era preciso um par expensor-compressor perfeitamente combinado. E então, na véspera de ir esquiar, li um artigo do Oscar Martinez, onde ele descrevia um compressor de impulsos adequado para a banda das comunicações ópticas, na região dos $1,5 \mu\text{m}$. As fibras ópticas, na zona acima de $1,3 \mu\text{m}$, têm uma dispersão negativa, por isso ele construiu um compressor capaz de introduzir dispersão positiva para a compensar. Quando me apercebi disso, estava eu no teleférico, pensei: espera aí, é disto que eu estou à procura! O compressor do Oscar era o meu expensor ideal, capaz de conjugar todas as ordens de dispersão. Hoje em dia, é claro que toda a gente o usa, mas acho que esse foi realmente um momento *eureka*. Agora, na verdade, raramente explico este conceito com este nível de detalhe, claro, normalmente tenho que fazer uma descrição mais abreviada!

¹ “Numa mesa” por oposição aos sistemas laser de terawatt da época, que ocupavam dezenas de metros quadrados.

Há um artigo seu sobre estes tempos em Rochester e a descoberta do CPA, em que descreve a primeira aplicação experimental do CPA para gerar impulsos laser de terawatt (10^{12} watts) – aparentemente, num sábado à noite! Como foi esse momento?

É verdade! O terawatt- numa-mesa¹, ou T3 (*table-top terawatt*), aconteceu durante a noite. Estava lá no laboratório com a minha equipa, foi uma festa! Então ocorreu-me: o que vem a seguir a “tera”? Fomos todos para o gabinete do director a tentar descobrir em algum livro. Nisto, entra o director, fica surpreendido a olhar para nós e eu digo-lhe: Bob, acabámos de criar um terawatt em cima de uma mesa! Entretanto, alguém descobre que a seguir a “tera” vem “peta”. Então, vamos ter que ir ao petawatt, disse eu, e esse foi o ponto de partida de um artigo chamado *En route to the petawatt*.

Apercebeu-se logo da importância que o CPA teria, de como levaria ao crescimento sem precedentes da intensidade máxima dos lasers?

Eu diria que a percepção da importância começou a surgir por volta de 1987-88. No princípio, eu tinha a noção de que estávamos a mudar as coisas por várias ordens de grandeza e, geralmente, quando se mudam coisas por várias ordens de grandeza, algo acontece. Esse foi o meu raciocínio na altura. Por exemplo, eu sabia que no CEA (França), no grupo do Manfray e noutros estavam a gerar harmónicos de ordem elevada, e então pensei que também podíamos gerar harmónicos usando o CPA – já seria bom, mas nós queríamos mais aplicações. Mas foi só em 1989 – e é uma história muito interessante, sabe, o Toshiki Tajima e eu não nos conhecíamos – o Toshiki tinha publicado um artigo com o John Dawson em 1979, sobre esta ideia de acelerar partículas na esteira (*wakefield*) de um plasma usando lasers de alta potência. Mas, claro, na época não havia lasers com potência suficiente, o CPA só foi demonstrado em 1985 e depois na versão melhorada com o expansor-compressor combinado, o terawatt e por aí fora ... ou seja, eu não conhecia o Toshiki nem a ideia da aceleração a laser. Em 1988, mudei-me de Rochester para a Universidade de Michigan, e por volta dessa altura o pessoal do NRL (Naval Research Laboratory) – o Eric Esarey, o Tony Ting, o líder do grupo, Phil Sprangle – esses tipos perceberam que poderiam juntar as duas coisas: a ideia do Tajima e o CPA. Eles conheciam os dois conceitos, sabiam sobre aceleração a laser e tinham acabado de ouvir falar sobre o CPA, e perceberam que colocá-los lado a lado poderia realmente ser algo de revolucionário. Este foi um passo muito importante, só mais tarde é que me apercebi. Lembro-me de que o Eric veio várias vezes ao Michigan enquanto eu lá estava, para conversar com o Donald Umstadter, e foi nessa fase crucial que nasceram algumas das

aplicações mais espectaculares que eu andava a procurar.

Das muitas aplicações que resultaram do CPA, tem alguma que seja a sua preferida pessoal? Falou da aceleração de electrões, ou talvez a cirurgia ocular...

A cirurgia ocular foi uma enorme surpresa. Agora é engraçado, claro, mas na altura foi um acidente com um aluno meu, ficou com uma lesão na retina... felizmente foi uma lesão muito pequena e ele hoje em dia vê perfeitamente. Sabe, naqueles tempos trabalhava-se com lasers sem usar óculos de protecção, não é como agora. Faziam-se as coisas assim, alinhava-se um laser sem usar qualquer protecção. Foi o caso, dá-se o acidente e o estudante veio ter ao meu gabinete e contou o que se tinha passado. Lembro-me que ele estava muito abatido, não tanto por ter causado um acidente a si próprio, mas pelo sentimento de culpa, já que isto poderia levar ao encerramento do laboratório, nos EUA estas coisas são levadas muito a sério. Bom, levo o estudante às urgências e ele foi visto por um médico – quer dizer, na altura nem era médico, ainda estava a fazer o internato – chamado Ron Kurtz. Examinou-lhe o olho, concluiu que sim, tinha uma lesão na zona da fóvea – não ficou cego por milímetros! Mas também ficou surpreso com a perfeição da lesão, disse que era o *furo mais perfeito* que já tinha visto. Tinha sido um laser de femtossegundos, ele nunca tinha visto nada assim. Passados uns dias, recebi uma chamada do Ron a perguntar se podia vir trabalhar comigo no nosso laboratório. Esse foi o começo da moderna cirurgia ocular de femtossegundos. E foi muito bom vê-los aos dois, o Ron e o meu antigo aluno, em Estocolmo, quando recebi o prémio.

Além da investigação académica, teve um papel no lançamento da empresa de tecnologia laser Medox – quais foram as suas principais contribuições para isso?

É verdade. Tudo começou ainda em Rochester, antes da Medox nós usávamos *klystrons* e esse tipo de coisas, não eram lá muito rápidos. Os nossos lasers funcionavam a uma taxa de repetição de 10 Hz, o que não é muito. Um grande amigo meu, Marcel Bouvier, estava em França e com vontade de ir passar algum tempo nos EUA, pelo que veio trabalhar comigo. O Marcel teve a ideia de desenvolver circuitos electrónicos para controlar células de Pockels², e consegui fazer-lo e demonstrá-lo ao nível do kilohertz. Ora isto significava que, a partir desse momento, os lasers poderiam disparar a kilohertz! A partir daí muitas portas se abriram. Naquela altura surgiu também o laser de titânio-safira e, graças à excelente condutividade térmica deste cristal, conseguimos obter uma potência média elevada. Isto foi demonstrado pelo François Salin, que veio passar um ano sabático ao Michigan, e pelo Jeff Squier. Criaram o primeiro laser potente de kHz por causa da célula de Pockels e do nosso sistema Medox, e a partir daí, além da potência de pico, também a potência média dos la-

² Dispositivos electro-ópticos para rodar a polarização de um feixe laser, muito usados em amplificadores laser de alta potência para injeção e extracção de impulsos.

sers disparou. Por outro lado, o número de lesões oculares também se multiplicou por cem (risos)!

Há cerca de dez anos atrás, no verão de 2008, visitou o Técnico para uma reunião do projecto ELI e teve a oportunidade de lhe fazer uma breve entrevista para a Gazeta de Física. Na sua opinião, como tem evoluído desde então a tecnologia laser de alta intensidade e quais são os principais marcos?

Não podemos desacoplar os lasers de alta intensidade de todo o progresso que teve lugar com os impulsos curtos. Por exemplo, na área dos attossegundos o progresso tem sido extraordinário. Temos hoje impulsos de 50 attossegundos, isto é fundamental para tentar atingir intensidades ultra-elevadas.

A conjectura de Mourou.

Exactamente. Chamamos *potência à energia* dividida pelo *tempo*. Logo, se quer uma potência muito elevada, vai precisar de impulsos curtos. Mas o contrário também é verdade: para obter impulsos muito curtos, preciso de potências de pico elevadas. É mesmo assim. E nesta área estamos a progredir nos dois caminhos, a tentar criar impulsos curtos para obter altas potências e a tentar criar altas potência para obter impulsos curtos.

Acha que algum dia chegaremos a um ponto de saturação por limitações tecnológicas, em termos de se atingir um limiar na potência de pico?

Não estou a ver isso acontecer. Repare, com o meu amigo Toshiki Tajima, há 25 anos que exploramos os limites e as possibilidades dos lasers de alta potência... Por enquanto, este tipo de lasers trabalha na região espectral do visível, ou perto, mas se entrarmos na região dos raios-X podemos ir até intensidades muito, muito mais elevadas. Hoje temos lasers ultra-potentes com durações de 10 ou 20 fs, se conseguirmos comprimir ainda mais estas durações, atingiremos um regime de raios-x de intensidade ultra-elevada.

Acha que chegar ao nível do exawatt é apenas uma questão de escala?

Não me parece; quer dizer, sim se for no sentido de *diminuir* o tamanho, criando impulsos de durações muito curtas. Se eu tiver um impulso com uma energia de um joule – como sabe, um joule é uma quantidade ínfima de energia – mas com uma duração de attossegundos, então obtemos 10^{18} watts! Acho que é muito parecido com os começos do CPA, quando eu estava em Rochester no Laboratório de Energética Laser: todo o edifício era ocupado por um laser terawatt, e nós fizemos o mesmo em cima de uma mesa, porque usámos impulsos muito mais curtos.

A estratégia é então avançar para comprimentos de onda cada vez mais curtos?

Sem dúvida. Para mim, esse é o caminho, porque permite criar potências de pico muito elevadas e aceder quase imediatamente ao regime de Schwinger. A outra coisa que me atrai nos raios-x é que ao criar potências elevadas (estou a falar de alta potência de pico, terawatts a petawatts nos

raios-X) então podemos fazer aceleração *wakefield* em sólidos, já que os raios-X se podem propagar em sólidos, e isto permite obter amplificações muito elevadas. Isto continua válido hoje em dia, para obter potências de pico elevadas, há duas maneiras: ou aumentando a energia (e isso significa sistemas laser muito grandes), ou tentando encurtar o impulso e manter o sistema muito compacto. Esta é minha visão.

Ainda em relação a tecnologia laser, e tendo em conta que é um forte proponente tanto de sistemas de estado sólido como de fibras ópticas, qual vê como sendo a mais promissora para os lasers do futuro?

Tenho estado envolvido no projecto XCAN para acoplar fibras ópticas de alta potência, e acho que está a progredir muito bem. Já somos capazes de sincronizar 60 lasers de fibra de alta potência, ora ao conseguir 60, chegamos às 100, e se temos 100... por aí fora. Isto é ideal para aplicações realmente grandes, na casa das centenas de milhões de euros – estou a pensar, por exemplo, na transmutação. Se queremos uma máquina capaz de realizar transmutação, vamos inevitavelmente precisar de centenas de milhões de euros. Temos que pensar em termos de aplicações e, para este tipo de aplicações, o custo não pode ser um problema. Se a sociedade precisa, será feito.

Finalmente, li uma entrevista recente do John Dudley, onde ele diz que você tem muitos interesses além da física – em particular, que também compõe música.

Ah não, não é realmente compor, eu não sou compositor... Bom, sim, pode-se dizer que gosto de compor música, mas é na companhia de músicos de verdade! É verdade que gosto de música, é a minha paixão, certamente, mas também adoro nadar... e esquiar, é claro!

Sem sombra de dúvida

Carlos Herdeiro

Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Já muito se escreveu, em particular no último número da Gazeta de Física (Vol. 42, N.º 2, 2019), sobre o eclipse do Sol de 29 de Maio 1919, o seu contexto e consequências. Vários livros foram recentemente publicados sobre o assunto, dos quais destaco o de Daniel Kennefick, “*No shadow of a doubt*”, que apresenta um trabalho de investigação e análise resultando, não só, numa leitura aprazível, mas também em material para reflexão. E, de entre as muitas ideias sobre as quais valeria a pena escrever, há uma, em particular, que partindo do contexto do dito eclipse, o transcende.

A ideia concerne às narrativas que são criadas em redor do processo científico e dos seus autores. E neste caso relaciona-se com o cientista que mais se associa à observação do eclipse de 1919, Arthur S. Eddington.

Apesar de não ter uma origem privilegiada, o mérito académico de Eddington permitiu-lhe estudar no *Trinity College*, da Universidade de Cambridge, no topo da academia britânica. Aí, em 1904, tornou-se o primeiro estudante do segundo ano a ganhar o título de “*Senior Wrangler*”, atribuído ao melhor estudante nos exames de matemática do exigente “*Cambridge Mathematical Tripos*” (duração normal de três anos). Após a graduação, tornou-se assistente principal do astrónomo real no Observatório de Greenwich, onde desenvolveu competências observacionais na astrometria, mas em 1913 regressou a Cambridge, onde obteve uma importante cátedra de astronomia, tornando-se pouco depois o diretor do observatório da Universidade.

Esta rápida ascensão até ao píncaros da ciência britânica atesta a competência de Eddington e reconhecimento pelos pares. Eddington juntava, como poucos, competências observacionais e teóricas em física-matemática. Foi dos primeiros a reconhecer a importância dos artigos de Einstein, em particular a forma final da teoria da Relatividade Geral, de 1915, bem como a oportunidade de testar esta teoria com um eclipse. Por isso, é natural que Eddington te-

nha sido selecionado para participar numa das expedições de 1919 pelo Comité Conjunto Permanente de Eclipses da *Royal Society* e *Royal Astronomical Society*, presidido pelo astrónomo real Frank Dyson, precisamente a expedição que foi à ilha do Príncipe.

Medir o pequeno efeito da deflexão da luz pelo Sol previsto por Einstein, com a tecnologia de 1919, era reconhecida-mente difícil, mesmo em condições ideais. Porém, as condições que as duas expedições encontraram, em particular as condições atmosféricas no Príncipe, não foram as ideais. Da observação do eclipse pelas duas expedições foram obtidos três conjuntos de dados: um no Príncipe e dois na outra expedição, a Sobral, no Brasil, onde foram usados dois telescópios, que observaram independentemente. Na análise de dados, contudo, um conjunto de dados (obtido em Sobral) foi desvalorizado, sendo precisamente o que mais se afastava do valor previsto por Einstein.

Este facto causou um desconforto relativamente à maneira cabal como Dyson, Eddington e Davidson (que participou na expedição do Sobral) afirmaram, no artigo que descreve as observações de 1919, que os resultados confirmam a teoria de Einstein. De entre os críticos modernos, destacam-se os filósofos, John Earman e Carl Glymour, cujo influente artigo de 1981 questiona a lógica com que os resultados foram apresentados, e não só o procedimento. Suspeitas sobre como as visões convergentes pacifistas de Eddington e Einstein, por um lado, e a reconhecida admiração do Britânico pela Relatividade Geral, por outro, poderiam ter levado Eddington a *querer* que a teoria de Einstein estivesse correta, pairavam no ar. Foi criada uma narrativa, uma sombra de dúvida, sobre a imparcialidade de Eddington e um possível viés (“*bias*”) das observações de 1919 e da sua apresentação.

É precisamente esta sombra de dúvida que Kennefick pretende dissipar. O livro contextualiza e desconstrói as críticas feitas aos resultados de 1919, que não sobrevivem a uma análise detalhada. A argumentação do viés de Eddington é falaciosa logo porque, em particular, não foi Eddington que tomou a referida decisão controversa na análise de dados, mas sim Dyson, a conselho de Davidson, que operou o telescópio que produziu os resultados alegadamente menos

fiáveis obtidos numa das medições no Sobral. Suspeitas sobre estes dados, alias, surgiram *in situ*, bem antes de terem sido reduzidos. E a postura de Dyson sobre a relatividade era de interesse, mas também ceticismo.

A análise de Kennefick desmistifica narrativas conspirativas e sugere que Eddington e colegas fizeram o seu trabalho tão bem quanto poderia ser feito. O julgamento e interpre-

tação da criação científica, principalmente a revolucionária, é sempre dependente de observador. Mas há sempre um julgamento supremo: o julgamento do tempo e da história com benefício do conhecimento posterior. E neste caso a história deu razão a Eddington e colegas. E disso, não há sombra de dúvida.

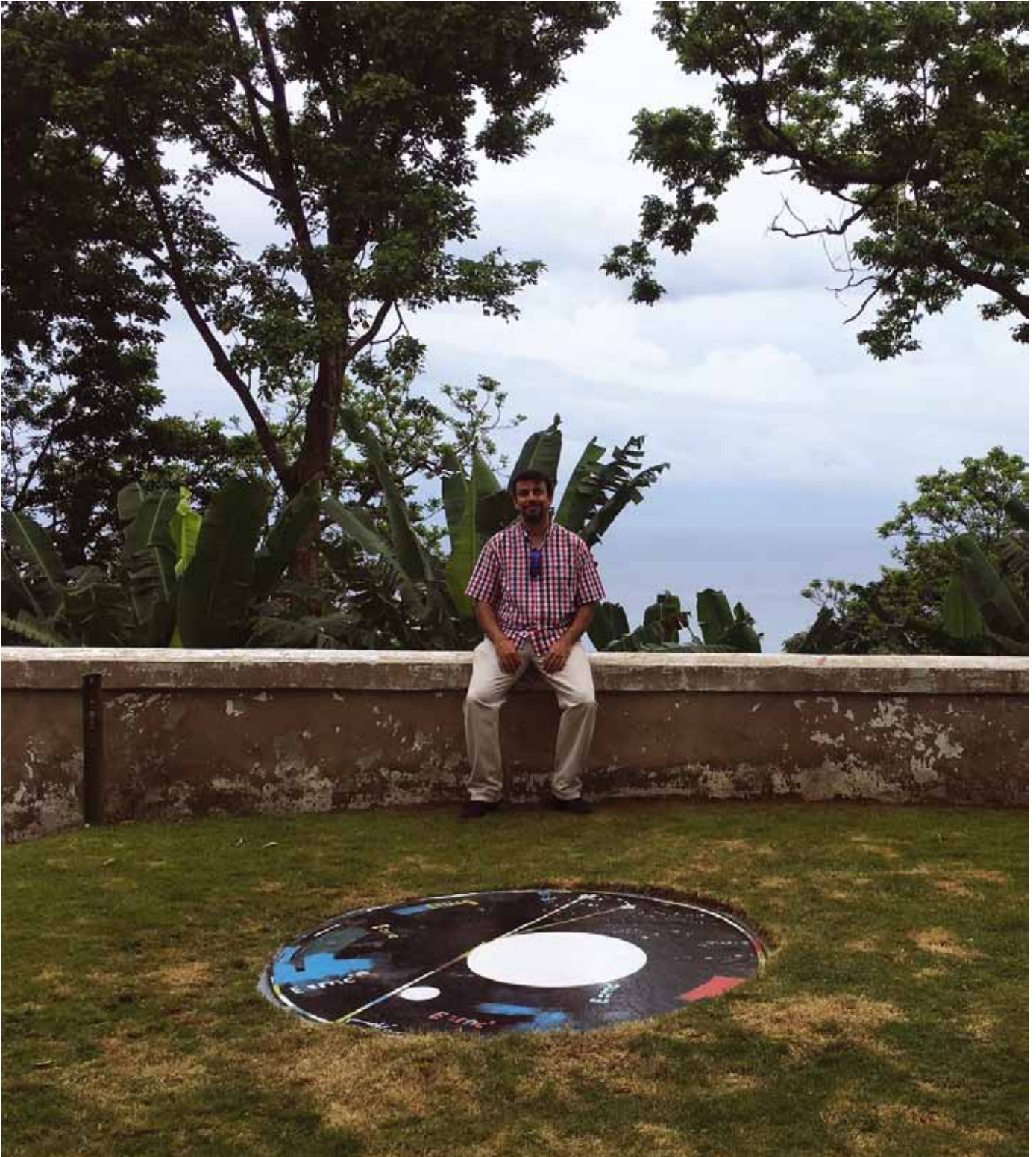


Fig. 1 - O autor, no preciso local onde Eddington e Cottingham montaram o seu telescópio a 29 de Maio de 1919, na Roça Sundry, na ilha do Príncipe, precisamente 100 anos depois, em 29 de Maio 2019.

Nuvens e icebergues

Constança Providência¹

¹ Centro de Física, Universidade de Coimbra

Material

- Taça ou frasco grande e largo transparente
- Copo
- Prato
- Gelo
- Lanterna
- Termómetro e congelador
- Cubos Gelo
- Sal

Uma pequena nuvem

Já reparaste que a água pode aparecer de várias formas? Podemos vê-la como água líquida ou como gelo, e sabemos que, apesar de invisível, está presente no ar na forma de vapor de água. Dizemos que a água pode existir em diferentes estados ou diferentes fases. Para passar de um estado para outro basta alterar a temperatura. As formas que a matéria pode adquirir variando a temperatura têm sido estudadas pelos físicos. Já ouviste falar dos comboios Maglev (fig. 1), comboios que levitam e se deslocam por ação de forças magnéticas? Conseguem mover-se a velocidades muito altas graças à utilização de magnetes num estado a que chamamos supercondutor, que se consegue obter a temperaturas muito baixas. Já o grande acelerador de partículas no CERN foi preparado para criar outro tipo de matéria muito especial, o plasma de quarks e glúões (fig. 2). Esta matéria poderá existir no interior de algumas estrelas. Neste caso



Fig. 1 - Comboio Transrapid 09, um maglev alemão, que se desloca com a utilização de magnetes supercondutores. Foto de Állatka, via Wikipedia

precisamos de atingir temperaturas ou densidades extremamente altas. Mas essas são outras histórias. Hoje vamos falar das fases da água.



Fig. 2 - Detetor ALICE no Large Hadron Collider do CERN utilizado para estudar as propriedades do plasma de quarks e glúões. Foto de António Saba/CERN

Quando chove, de onde vem a água que cai? Das nuvens, claro, só chove quando há nuvens. Mas então o que são as nuvens e como se formam?

Quando está calor e o vento sopra, a água evapora-se, a água dos lagos, dos mares ou dos rios, transforma-se num gás leve que sobe, o vapor de água. A atmosfera está mais fria do que a superfície da Terra. Assim, ao subir, o vapor de água vai arrefecendo e transforma-se novamente em água líquida: gotas de água muito pequeninas. As nuvens são formadas por estas gotinhas de água misturadas com vapor de água. À medida que a nuvem arrefece, as gotinhas de água vão ficando cada vez maiores. Se ficarem demasiado grandes caem e começa a chover! As nuvens cinzentas são formadas por gotas de água grandes que não deixam passar a luz do Sol.

Podes fazer uma pequena nuvem dentro de um frasco (fig. 3)! Pede a um adulto para deitar água quente dentro de uma taça transparente ou de um frasco grande. Põe dentro um copo de vidro, vazio, com a boca para cima. O copo serve de medidor de chuva e indica-te quanto choveu. Cobre a taça ou frasco com um prato e coloca pedaços de gelo em cima do prato. O prato com o gelo representa a atmosfera fria, e a água quente a água dos lagos aquecida pelo Sol, e que se evapora.

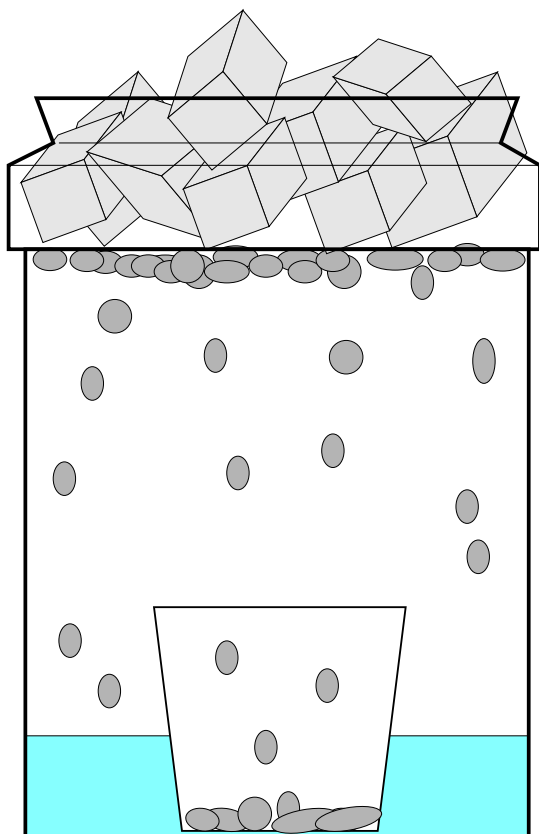


Fig. 3 - Nuvem num frasco de vidro

Observa o que acontece. Conseguiste criar uma nuvem? E chuva? O teu medidor de chuva indica que choveu?

Para veres bem a nuvem depois de deitares a água quente na taça, fecha as janelas e as luzes da sala, e faz incidir a luz de uma lanterna na taça. Consegues ver uma "pequena nuvem"?

Parte da água quente transformou-se em vapor de água, um gás leve que sobe. Quando o gás chega ao prato com gelo, arrefece e volta a transformar-se em água líquida, em pequenas gotas de água. As gotas vão aumentando até caírem! Para chover a água precisa primeiro de se transformar em vapor de água e depois novamente em água líquida! As duas

transformações são possíveis porque a temperatura varia. E sabes em que condições conseguimos transformar água líquida em gelo?

Um pequeno icebergue

Coloca um copo com água no congelador e mede a temperatura da água de 30 em 30 minutos. Regista os teus dados num caderno. A que temperatura se começa a formar gelo? Qual é a temperatura da água enquanto ainda há água líquida?

A água transforma-se em gelo à temperatura de 0°C . E enquanto existir uma mistura de água e gelo a temperatura mantém-se em 0°C . Só quando a água tiver solidificado totalmente, a temperatura do gelo baixa até ficar à mesma temperatura do congelador. Usa o termómetro para saberes que qual é a temperatura do congelador.

Prepara um copo com água à temperatura de 0°C e junta vários cubos de gelo. Observa o que acontece. Não te esqueças de medir e registar a temperatura da água regularmente, de cinco em cinco minutos. O que concluis?

É verdade, enquanto o gelo não se derreter todo a temperatura da água mantém-se em 0°C .

Como desafio descobre a que temperatura congela a água quando tem sal e como essa temperatura depende da quantidade de sal que deitas na água. Que experiência propões?

Da observação do modo como se formam e derretem os icebergues no Ártico e no Antártico os cientistas concluem que a Terra está a aquecer (fig. 4). As consequências de um aquecimento global podem ser muitos graves para a vida na Terra. Todos temos de actuar e impedir que o aquecimento seja devido ao modo como vivemos!



Fig. 4 - Icebergue na Gronelândia. Foto de Kim Hansen via Wikipedia

Bibliografia

Ciência a Brincar 3: Descobre a água, Constança Providência, Benilde Costa e Carlos Fiolhais, Editorial Bizâncio, 1999.

notícias

Professor do Ensino Secundário vence prémio da *European Physical Society*

A Divisão de Educação da *European Physical Society* (EPS) atribuiu o prestigiado prémio *EPS Secondary School Teaching Award* a um professor português de Física do Ensino Secundário.

O professor Jorge do Carmo António foi o vencedor da edição 2019 do *EPS Secondary School Teaching Award*, “for his contributions to the improvement of physics education in the country of East Timor, mainly at secondary level, but also on primary and university level, as well as his contributions to the public understanding of physics in East Timor and in several smaller towns in Portugal”.

Este prémio é atribuído de dois em dois anos entre os professores propostos pelas respetivas Sociedades membros da EPS. Este ano, o professor proposto pela Sociedade Portuguesa de Física, SPF,

foi o selecionado pelo comité internacional. O prémio foi entregue durante a conferência GIREP-EPEC-MPTL, que teve lugar em Budapeste, de 1 a 5 de julho.

Ao receber a notícia do seu prémio o professor Jorge António mostrou-se muito feliz e orgulhoso com a distinção tendo acrescentado “ser uma honra e um privilégio, para mim, para Portugal e para a SPF”. Natural de Abrantes, encontra-se atualmente em Timor Leste no âmbito do projeto CAFE, que resulta de um protocolo de Cooperação entre a República Portuguesa e a República Democrática de Timor-Leste, para a implementação e funcionamento do Projeto: Centros de Aprendizagem e Formação Escolar de Timor-Leste. Afirmou ainda que “este prémio é o reconhecimento do trabalho iniciado há uns anos, por um lado, e por outro é um incentivo e uma fonte de inspiração para fazer sempre mais e melhor.”



A Sociedade Portuguesa de Física, está particularmente feliz pelo professor proposto pela SPF ter sido o selecionado entre os propostos pelas outras sociedades congéneres europeias. Destacamos que **“através da Divisão de Educação, a SPF tem a ambição de contribuir para fortalecer a perceção da disciplina Física na sociedade e procurar apoiar e fortalecer os professores de Física para manter e melhorar a qualidade do ensino.”** Como reconhecimento do trabalho desenvolvido pelos docentes, a SPF tem vindo a candidatar sócios professores que se distinguem no Ensino.



M^a Conceição Abreu

Sociedade Portuguesa de Física

A 3.^a Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa (3CFPLP) decorreu de 30 de maio a 1 de junho na tranquila Ilha de São Tomé, concretamente no Hotel Praia para podermos ter garantida uma sala de eventos com ar condicionado e demais apoios que a universidade não podia garantir.

As duas conferências anteriores ocorreram em Maputo em 2010 e no Rio de Janeiro em 2012, a terceira edição deveria ter ocorrido em Cabo Verde em 2014, mas dificuldades várias levaram a que não se concretizasse. As Sociedades Brasileira (SBF) e Portuguesa de Física (SPF) resolveram, com a anuência de colegas de outros países de língua portuguesa, dar continuidade a este projeto das CFPLPs. Sendo 2019 o ano da celebração do Centenário da Observação do Eclipse Total de Sol na Ilha do Príncipe e em Sobral, no Brasil, decidimos que retomariamos o evento em São Tomé fazendo da semana 27 de maio a 1 de junho a semana do Esplendor da Física em São Tomé e Príncipe (STP).

A 3CFPLP foi antecedida pelas comemorações no Príncipe, organizadas sobre a designação de eddington@sundy, em que a SPF também participou através de sócios envolvidos em diversas atividades desse evento.

A 3CFPLP teve como designação complementar “a Física para um Desenvolvimento Equilibrado” incluindo cinco tópicos: Física e Ensino, Energia, Ambiente e Clima, Nanotecnologias e Física para a Saúde. Temas inclusivos às atividades de Física desenvolvidas nos seis países participantes.

Esta edição da conferência contou com 66 inscritos, dos quais a maioria apresentaria comunicações (fig. 1). Efetivamente só conseguiram participar no evento 49 colegas. Pensamos que os custos das deslocações limitaram a participação de colegas de Moçambique e Cabo Verde. No caso da Cabo Verde convém notar que a empresa aérea angola-



Fig. 1 - Foto de grupo na Sessão de Boas Vindas

No meio da primeira linha está a Ministra da Educação e Ensino Superior, Julieta Rodrigues. À sua direita o Reitor da Universidade de São Tomé e Príncipe, Aires Bruzaca Menezes. À sua esquerda o Primeiro Ministro Jorge Bom Jesus, seguido de Sekazi Mtingwa, *Chair of the IUPAP C13 Commission on Physics for Development*, Maria da Conceição Abreu da Sociedade Portuguesa de Física e Marcos Luz da Sociedade Brasileira de Física.

na TAAG só anunciou os voos diretos semanais Praia – São Tomé - Luanda no final de abril. Um conhecimento atempado desta oferta poderia ter influenciado substancialmente a participação de colegas cabo verdianos, uma vez que os custos de deslocação se reduziram para um terço.

A proximidade de Angola permitiu a vinda de uma dezena de colegas angolanos e, obviamente, a participação de vários colegas de São Tomé estava à partida muito facilitada.

Esta conferência teve o Alto Patrocínio de Sua Excelência o Presidente da República de STP, o Apoio Institucional da CPLP, e apoios do Instituto Camões, Empresas GALP e REN, e da Escola Portuguesa em STP.

O patrocínio da GALP permitiu a participação de 6 estudantes oriundos de países africanos da CPLP, que se encontram a realizar teses de mestrado ou doutoramento em universidades portuguesas, e de dois cientistas, um de Moçambique e outro de Cabo Verde. O projeto MEDEA10, financiado pela REN, permitiu a presença de um estudante de mestrado que tem acompanhado o desenvolvimento desta atividade. O apoio do Instituto Camões a duas Ações de Formação, propostas pela universidade de STP, permitiu a realização em 3 dias de um curso intensivo de microcontroladores para os alunos de 1.º, 2.º e 3.º ano de engenharia da universidade de STP, tendo tido a participação de 37 estudantes (fig. 2). O curso foi ministrado pelo colega Horácio Fernandes (IST/



Fig. 2 - Curso de Microcontroladores na Universidade de São Tomé e Príncipe Prof. Horácio Fernandes, atrás, de pé, ladeado à esquerda por Ruben Cardoso e a direita por David Neto. Numa sala de informática da universidade.

UL) coadjuvado pelos finalistas de Engenharia Física Tecnológica do IST David Neto e Ruben Cardoso. A outra ação de formação consistiu na apresentação em 3 escolas secundárias, o Liceu Nacional, a ES Maria Manuel Margarido e a ES de Guadalupe, do Projeto “Física do dia a dia” de Rómulo de Carvalho, adaptado aos dias de hoje, sob a coordenação da colega Ana Eiró (FCUL) que propôs a ação. Por motivos de do-

ença esta colega não pôde estar presente, mas essa tarefa foi assumida pelos colegas José António Paixão (DFUC) e Paulo Freitas (INL), acompanhados pelos estudantes Ivo Sengo e Mendita Ugembe, ambos moçambicanos a preparar teses, respetivamente, em Coimbra e Lisboa. Esta ação abrangeu três dezenas de professores e alguns alunos, que tiveram a oportu-



Fig. 3 - Curso Física no dia-a-dia. O Prof. José António Paixão da Universidade de Coimbra e professores do Liceu Nacional “com as mãos na massa”.

tunidade de explorar equipamentos de fácil aquisição e baixo custo que ilustram os principais fenómenos físicos ao nível do ensino básico e secundário (fig. 3).

A Conferência iniciou-se com o tópico a “Física para a Saúde”. Esteve presente o grupo de radiologia do Hospital Aires de Menezes, liderado pela Dr.ª Celeste Alves da Fundação Champalimaud, mas cujas funções em STP são da responsabilidade do Instituto Marquês Vale Flor (IMVF), que apresentou a panorâmica da Radiologia em STP. Estiveram ainda presentes seis técnicas de radiologia do referido Hospital. Nesta sessão foi muito útil a apresentação de César Alves sobre recursos em radioterapia em Angola. A Professora Ana Marques, da Pontifícia Universidade Católica de Porto Alegre, deu uma perspetiva sobre o que a Física pode hoje fazer em conjunto com as Ciências Médicas.

O tópico com maior número de apresentações foi a “Física e o Ensino”, onde os palestrantes mostraram as suas práticas pedagógicas, caso dos Doutores Jorge Mayer do ISCED e Nilson Garcia da Universidade Tecnológica do Paraná, ou propuseram atividades extra escolares para motivar alunos, professores e sociedade para temáticas desta ciência, como por exemplo o impacto da participação de alunos do secundário de STP nas Masterclasses Internacionais de Física das Partículas pelo colega Lúcio Carvalho de STP e Sofia Andringa do LIP-Lisboa sobre “A Física do Presente e do Futuro”.

No tópico “Ambiente e Clima” é de salientar a presença do diretor de serviço meteorológico de Cabo Verde, Dr. José Pereira Lima, do Dr. Adérito Santana, do Serviço do IMN São Tomé e Príncipe e do presidente do Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, Doutor Genito Mauré.

No tópico “Energia” quase todos os países participaram, quer referindo a panorâmica dos seus países, como as apresentações do Dr. Armindo Mussungu do Ministério da Energia e Água de Angola e do Prof. José Silva, que apresentou a perspetiva da Associação Lusófona para as Energias Renováveis para STP e Guiné-Bissau. As outras apresentações referiam sobretudo dispositivos e técnicas para utilização de energias renováveis, como a apresentação liderada pelo presidente do Departamento de Física da Universidade Agostinho Neto, Doutor Pascoal Napoleão. De referir ainda a intervenção do Prof. Amílcar Soares do IST-ULE sobre investigação e o contributo da engenharia para a exploração petrolífera.

No tópico “Nanotecnologias” foram relevantes as apresentações sobre os conteúdos de cursos de micro- e nanotecnologia, do diretor do International Iberian Nanotechnologies Laboratory (INL), Prof. Paulo Freitas, e sobre o estado da investigação neste domínio, pelo Prof. Marcos Luz, que esteve presente em representação da Sociedade Brasileira de Física.

O último dia da conferência foi de elevada importância, tendo começado com a palestra do Prof. Sekazi Mtingwa, *Principal Partner at TriSEED Consultants, LLC* na Carolina do Norte, USA, e *Chair of the IUPAP C13 Commission on Physics for Development*, sobre o “*LAAMP – Light sources for Africa, the Americas, Asia and Middle East Project*”, para impulsionar a investigação nos referidos países (fig. 4).



Fig. 4 – Prof. Sekazi Mtingwa no final da sua palestra.

Temos de realçar a importância da presença do Prof. Sekazi Mtingwa. Participou em todas as sessões e interagiu largamente com todos os presentes, o que foi de enorme importância para todos, incluindo a IUPAP ter um conhecimento factual das nossas realidades.

Após a palestra, seguiu-se a Mesa Redonda onde os presentes declararam o empenho na criação da União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa, projeto que vem desde a 1ª Conferência que teve lugar em 2010 em Maputo. Foi eleita uma Comissão constituída por dois elementos de cada país presente:

Angola- Armindo Mussungo e Jorge Mayer
Brasil – Marcos Luz e Rogério Rosenfeld
Cabo Verde – Mario Lima e Sónia Semedo
Moçambique – Genito Mauré e Enoque Malate
Portugal – Graça Silveira e Horácio Fernandes
São Tomé e Príncipe – Manuel Penhor e Lúcio Carvalho

Ficou decidido que a Assembleia Geral para aprovar os estatutos da União terá lugar em novembro, em Lisboa, onde a União terá a sua sede. Esperamos que a Declaração votada no dia 1 de junho, Dia da Criança, seja promissor da chegada à maturidade desta União que, como é óbvio, tem por objetivo uma maior colaboração entre os físicos destes países, promovendo o intercâmbio de boas práticas a todos os níveis, desde a organização de olimpíadas de física para os jovens até à mobilidade de físicos, no espaço da CPLP.

O dia terminou com uma palestra do colega Carlos Herdeiro, “A silhueta de uma atração fatal” celebrativa da física em 2019, começando pelo Centenário da observação do eclipse total do Sol na Ilha do Príncipe, mas não esquecendo que neste ano vimos pela primeira vez a imagem “real” de um buraco negro, ambos confirmando a belíssima teoria da relatividade generalizada, formalizada por Albert Einstein.

Os trabalhos foram encerrados com a candidatura da Universidade de Cabo Verde, pela voz da Prof.^a Sónia Semedo, à organização da 4.ª Conferência de Física dos PLP em 2022, esperamos que já em novembro seja declarado, pela UNESCO, 2022 como o *International Year of the Basic Sciences for Development* (YIBSD).

Ultrafast Systems



Gas Lasers, DPSS, Single frequency cw lasers



Nd YAG lasers



Ultrafast Systems Diagnostics



Optical tables





ipfn

INSTITUTO DE PLASMAS
E FUSÃO NUCLEAR

**Instituto de
Plasmas e
Fusão Nuclear**

Laboratório Associado

ipfn.tecnico.ulisboa.pt
facebook.com/IPFNLA
instagram.com/ipfnmedia

Conhecimento para a tecnologia do amanhã

Tecnologias a plasma para a síntese de materiais 2D nanoestruturados
Dispositivos para fusão nuclear por confinamento magnético
Sistemas de engenharia de fusão nuclear
Teoria e modelização em fusão nuclear
Plasmas reativos de não-equilíbrio
Plasmas de choque atmosféricos
Aceleradores laser-plasma
Novas fontes de radiação
Computação avançada
Lasers ultra-intensos
Plasmas quânticos
Fusão inercial
Astrofísica



**TÉCNICO
LISBOA**

U LISBOA

UNIVERSIDADE
DE LISBOA