

**Número especial:**  
**Física aplicada à biologia  
e medicina**

**Hexágonos, carbono e o Prémio  
Nobel da Física de 2010**

# Índice

- artigo geral
- 2 **Biópsia Óptica OCT**  
Carla Carmelo Rosa
- 6 **Manipulando os spins nucleares** por ressonância magnética para obter imagens da perfusão cerebral  
Patrícia Figueiredo
- 11 **Divisão de Física Médica** dinâmica de uma caminhada  
Maria do Carmo Lopes
- 13 **Aplicações biomédicas** com feixes de iões  
Teresa Pinheiro
- 18 **Dinâmica do crescimento tumoral:** um olhar físico  
Rui Travasso
- inovação
- 24 **Hexágonos, carbono** e o Prémio Nobel da Física de 2010  
N. M. R. Peres  
J. M. B. Lopes dos Santos
- crónica: pensamentos quânticos
- 28 **Eu e Stephen Hawking**  
Jim Al-Khalili
- crónica: física divertida
- 28 **Estrangeirados** em Londres  
Carlos Fiolhais
- 30 **Notícias**  
Célia Henriques, Gustavo Castelo-Branco, Gonçalo Figueira, Rosa Doran, José Marques, Fernando Nogueira
- gazeta do laboratório
- 37 **e-lab: o laboratório online**  
Horácio Fernandes, Sérgio Leal, João Paulo Leal
- entrevista
- 41 **Físicos portugueses** premiados pelo Conselho Europeu de Investigação  
Gonçalo Figueira
- vamos experimentar
- 44 **Porque que é que os fios eléctricos são** cobertos de plástico?  
Constança Providência
- onda e corpúsculo
- 47 **Físicos hospitalares:** uma reflexão  
M.ª da Conceição Abreu  
Luís Peralta

Imagem da capa: fotografia de Fernando Toucedo em <http://www.flickr.com/photos/80465909@N00/2265469731>

Publicação Trimestral Subsidiada



**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



## Scans e uploads de 2010 e depois

Com o fim de mais um ano manda a tradição que se façam balanços, por um lado, e intenções ou previsões, por outro. Resistirei nestas linhas à tentação de listar os êxitos da física deste ano? Quanto a previsões, e porque a ciência é cheia de surpresas, prefiro prever o que **não** poderá, em vez do que poderá, acontecer.

Por maior que seja, a lista do que aconteceu em física durante um ano é sempre parcial e distorcida: a ciência faz-se e desfaz-se, e pode necessitar de tempo para se revelar em pleno, para as ideias se enraizarem ou se evaporarem. Por exemplo, o LHC ter entrado em funcionamento a 10 de Março foi importante, mas agora é mais relevante que centenas de estudantes de doutoramento vão ter o privilégio de digerir os resultados nesta nova fronteira extrema de energia, e que novas perspectivas surjam das suas dissertações de doutoramento. Noutras fronteiras, conseguiu-se criar um condensado de Bose-Einstein feito de fótons e ainda lasers de fonões (simplicadamente, lasers de som). Como vão as promessas de inovação assim levantadas, respectivamente, no fabrico de células solares e em técnicas de imagiologia 3D, concretizar-se?

A física tem inexoravelmente passado do laboratório, e dos computadores, para a vida. Um dos exemplos que escolhemos para este número especial é o das aplicações à Biologia e à Medicina. Foi no século XVIII que de forma generalizada se afirmou o potencial da aplicação da ciência na vida quotidiana, em particular na medicina e na saúde: nos salões privados encenaram-se entretenimentos bizarros, alguns com base nas aplicações da recém-descoberta electricidade à medicina. E nem sempre só rãs foram utilizadas. Houve mesmo desvarios de aplicações de choques eléctricos em pessoas para curar cegamente doenças. Hoje o optimismo nas aplicações da ciência é menos ingénua, mas uma dose certa deste optimismo ainda faz bem: é preciso para disparar a imaginação e o engenho. A experiência ao longo dos tempos fez-nos mais cépticos, o que também não faz mal: o cientista é um progressista conservador. E com as aplicações na medicina há razão redobrada para não se poder experimentar tudo, e é mais que essencial o cruzamento interdisciplinar da ciência (dura) com as questões do direito, ética e política (do bem colectivo e bem privado).

Até noutros sectores sem ser a saúde, esta ligação entre a ciência e o direito tem de ser, e vai ser cada vez mais, a regra. Aqui nos USA onde escrevo este editorial, uma das polémicas do Outono/Inverno foi a utilização de *scans* para segurança nos aeroportos. Outros *scans* poderão vir a tornar-se vulgares no futuro. Por exemplo, a tecnologia baseada em *Arterial Spin Labeling* (ASL) incorporada à imagiologia por Ressonância Magnética, de que se fala neste número, avalia com precisão a hemodinâmica cerebral, e poderá vir a ser utilizada em programas para monitorizar populações, de forma a precocemente se aplicarem tratamentos que travem ou aliviem o desenvolvimento da doença de Alzheimer (em Portugal o número de mortes por ano declaradas como devidas a esta doença, passou de 200 em 1995 para 1500 em 2010!) . As questões éticas e de direito que tais programas de prevenção levantam excedem certamente em gravitas e consequências, a da violação do pudor privado dos *strip* virtuais dos aeroportos. É provável que nas sociedades com grande duração e qualidade média de vida, passada a crise económica de hoje, programas como este se juntem aos programas nacionais de vacinação infantil de há cinquenta anos.

Com a possibilidade de os *scans* actuais revelarem actividade cerebral e serem cartografias de pensamento, no ponto em que estamos, apenas acredito que em 2011, e nos anos mais próximos, ainda **não** vai ser possível fazer *downloads* ou *uploads* de indivíduos – com o todo das memórias, convicções, personalidade, manias e desejos de cada um – com o *click* de uma tecla de computador. E apenas a simulação de um indivíduo, uma outra forma de clonagem sem tubos de ensaio, não poderá vir a ser possível? Talvez. Mas a nova humanidade só poderá surgir quando hardware e software se misturarem num só, como no cérebro. Não será em 2011, certamente. (No máximo, no equivalente aos salões sociais e redes de partilha de conhecimento do século XVIII – o *Facebook* – a febre de exposição colectiva pode acabar em *posts* de *scans* e filmes coloridos de cérebros, iluminados como árvores de Natal, mas só isso por enquanto...)

Outra certeza, esta ainda mais certa, é que 2011 vai ser o Ano Internacional da Química – IYC – em comemoração dos 100 anos de atribuição do prémio Nobel da Química a Marie Curie, como declarado pela UNESCO. E ainda o ano das comemorações do centenário da descoberta do núcleo do átomo por Ernest Rutherford, entre as quais a *Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics*, a realizar em Manchester no mês de Agosto.

Teresa Peña

## Ficha Técnica

### Propriedade

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

### Equipa

Teresa Peña (Directora Editorial)  
Gonçalo Figueira (Director Editorial Adjunto)  
Carlos Herdeiro (Editor)  
Filipe Moura (Editor)  
Tânia Rocha (Assistente Editorial)  
Adelino Paiva (Assistente Editorial)  
Ana Sampaio (Tradutora)

### Secretariado

Maria José Couceiro  
mjose@spf.pt

### Colunistas e Colaboradores regulares

Ana Simões, Carlos Fiolhais, Constança Providência, Jim Al-Khalili

### Colaboraram também neste número

Carla Rosa, Célia Henriques, Fernando Nogueira,  
Gustavo Castelo Branco, Horácio Fernandes,  
João Lopes dos Santos, João Paulo Leal, José Marques,  
Luís Peralta, Luís Silva, Maria da Conceição Abreu,  
Maria do Carmo Lopes, Nuno Peres, Patrícia Figueiredo,  
Rosa Doran, Rui Travasso, Sérgio Leal, Teresa Pinheiro,  
Vítor Cardoso

### Design / Produção Gráfica

Dossier, Comunicação e Imagem  
www.dossier.com.pt  
NIPC 501094628

Registo ICS 110856

ISSN 0396-3561

Depósito Legal 51419/91

Tiragem 1.800 Ex.

Publicação Trimestral Subsidiada

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.

# Biópsia Óptica OCT

Carla Carmelo Rosa

INESC-Porto, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto  
Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto  
ccrosa@fc.up.pt

**A introdução da Tomografia de Coerência Óptica (OCT) em meados da década de 90 revolucionou o diagnóstico médico em oftalmologia. Após duas décadas de evolução galopante, existe actualmente uma variedade apreciável de sistemas OCT, um conjunto alargado de empresas a trabalhar no sector, e muitas aplicações candidatas à utilização desta técnica. Neste artigo introduz-se o princípio de funcionamento da técnica OCT e as suas características principais, ilustrando-se algumas aplicações em áreas distintas.**

O mercado de aparelhos de diagnóstico oftalmológico foi abalado em 1995 pela introdução do primeiro sistema OCT, reflexo do conceito experimental publicado pela equipa liderada por James Fujimoto [1]. Este aparelho revolucionou a prática de diagnóstico de retinopatias, permitindo a detecção prematura de problemas estruturais nas camadas retiniais, *in vivo*, em tempo real, não evasivamente, por seccionamento óptico de finas fatias da retina. O seccionamento é semelhante à biópsia “mecânica” de tecidos biológicos, comum em citologia, pelo que é comum referir OCT como *biópsia óptica*. Nos últimos 15 anos a técnica sofreu desenvolvimentos galopantes, associados a novas fontes de luz e novas abordagens de medida, assim como ao crescimento das velocidades de relógio de CPU actuais. Actualmente, é utilizada em vários campos da Medicina, encontrando também aplicações muito apelativas na caracterização micrométrica de estruturas, onde tanto as técnicas de microscopia tradicional como a confocal são de difícil implementação, ou apresentam resposta limitada [2,3].

Vejamos melhor em que consiste a Tomografia de Coerência Óptica – OCT. Nesta técnica, um sistema óptico tem a função dupla de iluminar a amostra e de recolher a luz retro-reflectida ao longo da direcção de propagação do feixe incidente na amostra. Até aqui, o funcionamento parece semelhante ao de um microscópio (tradicional, ou confocal), excepto no facto de que a amostra analisada com OCT não necessita ser fisicamente preparada em finas fatias, como requerido em microscopia.

Na Figura 1 mostra-se o esquema simplificado de um microscópio confocal [4]. A luz radiada por uma fonte de uma certa extensão espacial é projectada sobre a amostra. Pequenas estruturas na amostra, centros difusores, induzem o espalhamento da luz incidente, o que é visto pela lente L como fontes quasi-pontuais distribuídas em volume, na amostra. A lente colecta a luz retro-reflectida por espalhamento nos difusores. Dependendo da espessura da amostra, a informação em cada ponto no plano imagem do detector pode derivar de vários eventos de retro-reflexão da luz em estruturas dispersas no volume da amostra, pelo que se verifica sobreposição de informação e conseqüentemente a degradação da qualidade da imagem formada, o que se representa na figura pelo traçado dos raios cinza e negro, na ausência da abertura  $\mathbf{a}_2$ . Em microscopia tradicional esta limitação é resolvida à custa do seccionamento em finas camadas da amostra. Em microscopia confocal utilizam-se aberturas micrométricas<sup>1</sup>,  $\mathbf{a}_1$  e  $\mathbf{a}_2$ , devidamente colocadas, e combinam-se o varrimento transversal do ponto de incidência/observação na amostra, através de  $\mathbf{a}_1$ , com a direcção de colecção de luz no detector, através

<sup>1</sup> pin-holes, literalmente pequenos orifícios de alfinete

do movimento sincronizado de  $\mathbf{a}_2$ . Desta forma, a luz proveniente de ponto da amostra fora do plano focal é bloqueada pela abertura  $\mathbf{a}_2$  e a qualidade da imagem significativamente melhorada. Este efeito de filtragem é caracterizado por uma elevada abertura numérica do sistema óptico,  $NA = n \sin \alpha$ , em que  $\alpha$  corresponde ao ângulo máximo de colecção de luz e  $n$  ao índice de refração do meio de propagação da luz. A teoria da difracção determina a profundidade de foco  $\delta z_{\text{confocal}}$  nestas condições como sendo inversamente proporcional ao quadrado da abertura numérica,

$$\delta z_{\text{confocal}} = 0.89 \frac{\lambda n}{NA^2} \quad (1)$$

A resolução da imagem é tanto melhor quanto menor for a profundidade de foco, pelo que se justifica a utilização de objectivas de elevada abertura numérica e, em situações especiais, objectivas de imersão que utilizam óleos de elevado índice de refração. A configuração confocal também otimiza ligeiramente a resolução transversal do sistema de imagem, por comparação com o limite de difracção de um microscópio convencional. As resoluções transversal e longitudinal chegam a dimensões subcelulares, de 200-500 nm. No entanto, a microscopia confocal exige distâncias de trabalho muito curtas, requerendo frequentemente contacto com a amostra em estudo, o que nem sempre é satisfatório para aplicações de diagnóstico e imagiologia *in vivo*. Em contraposição, a tomografia de coerência óptica utiliza técnicas interferométricas para obter elevada resolução espacial: a resolução transversal é definida pelo limite de difracção do sistema colector na cabeça sensora, e a resolução longitudinal, em profundidade, é fixada por implementação de *interferometria de luz branca*, também dita de *baixa coerência*.

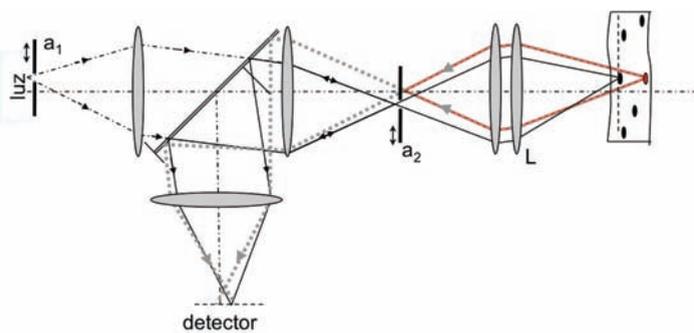


Fig. 1 - Esquema óptico de microscópio confocal:  $\mathbf{a}_1$  e  $\mathbf{a}_2$  são aberturas micrométricas móveis,  $L$  a lente colectora de luz da amostra. Na inexistência de  $\mathbf{a}_2$ , o percurso óptico da luz colectada a partir de dois centros difusores da amostra é indicado pelos traços negro e cinza.

Fenómenos de interferência ondulatória podem ocorrer quando se verifica sobreposição espacial de duas ou mais ondas. A interferência pode ter carácter destrutivo ou construtivo, i.e. a sua soma pode resultar numa amplitude de valor superior (interferência construtiva) ou inferior (interferência destrutiva)

ao valor da soma das amplitudes de cada onda.

A interferência de ondas electromagnéticas só ocorre quando se verifica um conjunto de condições: as ondas incidentes partilham a mesma direcção de vibração (polarização), coexistem espacialmente (localização), e apresentam alguma correlação entre si (coerência). Como já se indicou, em OCT, coerência é a palavra de ordem! Nos interferómetros de dois feixes (configurações de Michelson e de Mach-Zehnder), a luz emitida pela fonte é dividida em dois feixes independentes por incidência num divisor de feixe. Porque obtidos do mesmo feixe inicial, os feixes são, à partida, correlacionados. Os dois feixes propagam-se em percursos ópticos distintos: o caminho-referência, em que as condições de propagação são bem controladas, e o caminho-amostra, que envolve uma parte de percurso na amostra em estudo. Os dois caminhos terminam num divisor de feixe onde os feixes são recombinados.

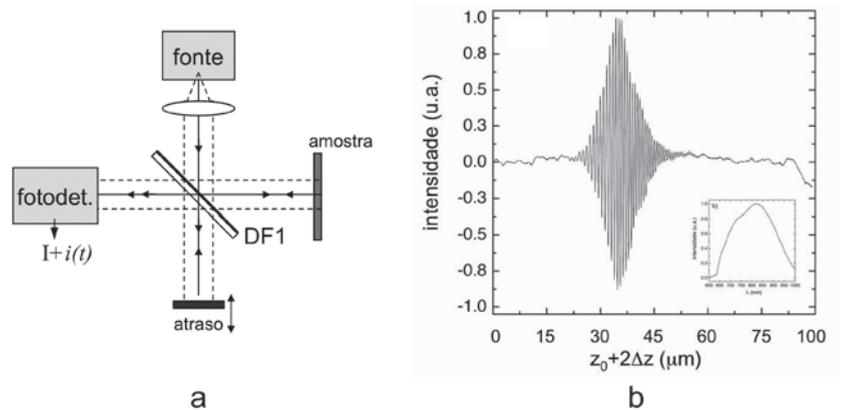


Fig. 2 - (a) esquema simplificado de um interferómetro de Michelson; (b) interferograma obtido quando se ilumina o interferómetro em (a) com uma fonte de halogéneo.

Na configuração de Michelson, representada na Figura 2.a), a amostra em estudo é um espelho semelhante ao espelho presente no caminho-referência. Dependendo do comprimento (óptico) dos dois caminhos, haverá um atraso temporal entre os feixes. Se se utiliza uma fonte de luz monocromática (com comprimento de onda único, ex. laser vermelho de HeNe), sempre que a diferença de percurso óptico  $\Delta z$  entre os dois feixes for múltipla do comprimento de onda da luz, o fotodetector regista o sinal máximo; quando  $\Delta z$  equivale a múltiplos ímpares de meio comprimento de onda, a soma das duas ondas é destrutiva, a intensidade óptica é nula. Ao mover o espelho no caminho-referência a velocidade constante  $v$ , o fotodetector regista um sinal sinusoidal de frequência  $f_D = 4v/\lambda$ , resultante do movimento do espelho. Substituindo o fotodetector por um alvo pode observar-se esta frequência pela intermitência da luz projectada, entre o escuro da interferência destrutiva total e o brilho da interferência construtiva máxima. Quando o interferómetro é iluminado por um laser de HeNe este comportamento pode ser observado até diferenças  $\Delta z$  da ordem de centímetros, ou mesmo metros. Substituindo o laser por uma fonte de halogéneo, fonte que tem um espectro rico e contínuo no visível e infravermelho próximo (inserção da Figura 2.b), já

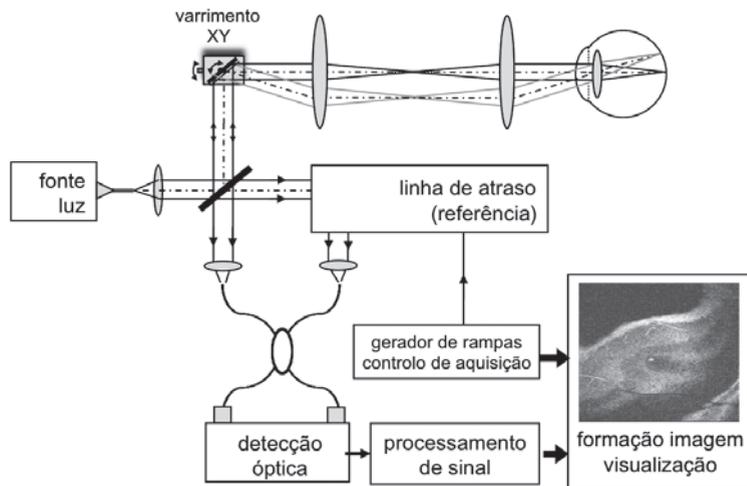


Fig. 3 - Esquema de blocos de um sistema OCT, indicando-se o varrimento do objecto através do sistema de espelhos xy, e o varrimento rápido do caminho referência pela linha de atraso.

não se observa o mesmo comportamento: só é possível ver o sinal de interferência quando a diferença  $\Delta z$  é praticamente nula, a menos de uma quantidade designada de comprimento de coerência<sup>2</sup> da fonte. Para distâncias maiores, o valor da intensidade detectada resulta simplesmente da soma das intensidades luminosas dos dois feixes. Da figura, em que se mostra a intensidade luminosa detectada em função da diferença  $\Delta z$ , pode extrapolar-se que o comprimento em que se verificam franjas de interferência e em que existe correlação entre os dois feixes, ou coerência, é de cerca de  $10 \mu\text{m}$ . Tal significa que só se poderá detectar o sinal interferométrico quando os dois percursos, referência e amostra, são equivalentes a menos de  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Em concreto, o comprimento de coerência da fonte depende das características do seu espectro de emissão, e normalmente é definido por

$$\Delta z_c = c\tau_c = \frac{41n^2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda},$$

em que se considera o comprimento de onda central  $\lambda$  e a largura total  $\Delta\lambda$  medida a meia altura.

Resumindo, o truque da *Tomografia de Coerência Óptica para gerar resolução longitudinal* é a utilização de interferómetros iluminados por fontes de espectro muito largo! Associando a este o varrimento rápido da amostra na direcção transversal ao feixe sobre a amostra, assim como a variação rápida do comprimento óptico da referência, sintonizando a profundidade em estudo (linha de atraso), podem construir-se mapas tridimensionais obtidos de forma não invasiva, com resoluções longitudinais e transversais (sub)micrométricas e desacopladas, e com a elevada sensibilidade característica de medidas interferométricas.

Na presença de múltiplas camadas reflectoras ao longo do caminho-amostra, o varrimento do caminho-referência com uma precisão mais fina que o comprimento de coerência revelará conjuntos de franjas localizadas sempre que o atraso da referência sintoniza o interferómetro para cada uma das superfícies reflectoras. Em meios biológicos o princípio de funcionamento é idêntico, mas o sinal do fotodetector resulta da sobreposição da reflectividade da amostra, constituída por meios estruturados e com distribuições contínuas de centros difusores. A propagação da luz ao longo do meio é regida pela lei de Beer-Lambert,

$$I(\Delta z) = I_0 \exp\{-(\mu_a + \mu_s) \Delta z\},$$

em que os coeficientes  $\mu_a$  e  $\mu_s$  introduzem perdas de energia por absorção e por espalhamento de luz, respectivamente. O coeficiente de atenuação por espalhamento é o mais relevante na imagiologia OCT, porque o sinal OCT em tecidos biológicos deriva dos fótons que são retrodifundidos por espalhamento, e por o seu valor depender das características particulares de cada tecido [5].

Na prática, os sistemas OCT são um pouco mais complexos que a simples montagem de Michelson, sendo necessário atender a questões específicas ligadas à utilização de sistemas ópticos com resposta espectral uniforme numa zona larga do espectro, e à necessidade de adquirir imagens em tempo real. A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos simplificado do protótipo OCT instalado na Unidade de Optoelectrónica do INESC-Porto e descrito com mais detalhe em [6].

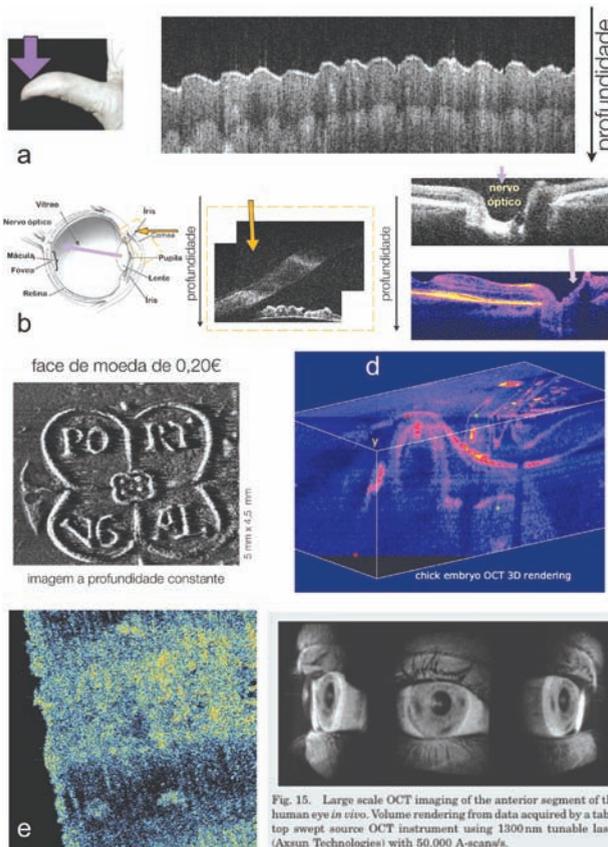


Fig. 15. Large scale OCT imaging of the anterior segment of the human eye *in vivo*. Volume rendering from data acquired by a table top swept source OCT instrument using 1300nm tunable laser (Axun Technologies) with 50,000 A-scans/s.

Fig. 4 - imagens OCT de um conjunto variado de amostras - descrição detalhada no texto. Copyright (a)-(e): autor; (f): Optical Society of America.

2 É mais correcto referir-se tempo de coerência da fonte  $\tau_c$ , ao qual corresponde um comprimento  $v\tau_c$  que não deve ser confundido com a coerência espacial da fonte, esta associada à extensão emissora e correlação entre diferentes pontos emissores.

A Figura 4 apresenta amostras de diferentes características analisadas por OCT, iluminadas com luz infravermelha (SLD Superlum a 830 nm,  $\Delta\lambda=20$  nm,  $\Delta z_c \sim 15 \mu\text{m}$ ). As setas coloridas nas imagens indicam a direcção de incidência do feixe sobre a amostra. Em (a) observa-se um corte longitudinal do polegar, sendo visíveis a estrutura corrugada da superfície/impressões digitais, uma interface interior que separa a epiderme da derme, e pontos brilhantes correspondentes aos condutos de transpiração; em (b) apresentam-se imagens de uma retina normal (fóvea e nervo óptico), e do vértice da córnea com a íris, obtidas *in vivo*. Conseguem identificar-se facilmente vasos sanguíneos como zonas escuras, onde a luz é muito absorvida. As camadas mais reflectoras correspondem ao Epitélio Pigmentado da Retina, uma das estruturas importantes na detecção precoce de risco de descolamento de retina. Em (c) ilustra-se a utilização da técnica OCT como perfilometria de elevada resolução espacial, com uma imagem obtida a profundidade constante, correspondendo assim a uma fatia de material de cerca de  $15 \mu\text{m}$  de espessura. Em (d) observa-se uma reconstrução 3D do volume de um embrião de galinha, a partir de uma sequência de imagens obtidas a profundidade incrementalmente constante, estudado *in ovo*, durante o seu desenvolvimento nos primeiros dias de incubação. Este estudo foi feito para avaliar a aplicabilidade da técnica OCT como complemento à técnica confocal utilizada rotineiramente em Biologia do Desenvolvimento [7]. Neste caso particular a técnica OCT apresenta a vantagem de interferir minimalisticamente com o crescimento do embrião, possibilitando o estudo do crescimento embrionário no mesmo ovo durante intervalos de tempo à escala de dias, por oposição aos tempos em estudos assistidos por técnicas confocais, que requerem manipulação do embrião. Na Figura 4.e) mostra-se uma imagem obtida a profundidade constante de uma amostra de madeira, correspondendo a uma fatia de  $15 \mu\text{m}$  de espessura, onde se podem identificar estruturas características associadas aos anéis de crescimento claro-escuro, alternados.

Na verdade, a história não fica por aqui. Na última década tem-se assistido a desenvolvimentos significativos em detecção espectral e em fontes laser sintonizáveis, aliados ao processamento muito rápido de sinal em computador que permitiram atingir taxas de produção de imagens similares aos padrões vídeo, proporcionando a recolha de informação em processos dinâmicos ou tão simplesmente para determinar fluxos sanguíneos ou de agentes contrastantes. Maciej Wojtkowski publicou recentemente uma excelente revisão sobre as diferentes variantes da técnica OCT ultra-rápida [2] acompanhada de um bom conjunto de casos clínicos (oftalmologia)

que demonstram o valor clínico da tomografia de coerência óptica – veja-se o exemplo de imagens OCT de Larga Escala do segmento anterior do olho na Figura 5.f) [2]. O futuro certamente levará a OCT a novas áreas das ciências biomédicas, e da caracterização microscópica nas ciências e na indústria.

1. D. Huang, E. A. Swanson, et al., "Optical coherence tomography", *Science* 254 (5035), 1178-81 (1991).
2. Maciej Wojtkowski, "High-speed optical coherence tomography: basics and applications", *Appl. Opt.* 49, D30-D61 (2010).
3. David Stifter, "Beyond biomedicine: a review of alternative applications and developments for optical coherence tomography", *Applied Physics B* 88, 337-357 (2007).
4. Kjell Carlsson e Nils Åslund, "Confocal imaging for 3-D digital microscopy," *Appl. Opt.* 26, 3232-3238 (1987).
5. Valery Tuchin, "Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instrumentation for Medical Diagnosis", *SPIE Tutorial Texts in Optical Engineering*, Vol. TT38 (2000).
6. Carla Carmelo Rosa, John Rogers, Justin Pedro, Richard Rosen, e Adrian Podoleanu, "Multiscan time-domain optical coherence tomography for retina imaging", *Appl. Opt.* 46, 1795-1808 (2007).
7. Michael Leitner, "White Light Interferometry, applications in high resolution sensing and biomedical imaging", PhD Thesis, Universidade do Porto, Porto (2010).



**Carla Carmelo Rosa** é Professora Auxiliar no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, e Investigadora da Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC-Porto, onde tem desenvolvido trabalho de investigação em técnicas de medida e imagiologia óptica de elevada resolução espacial. No âmbito do seu doutoramento, e em colaboração com o Applied Optics Group da University of Kent, Inglaterra, desenvolveu um sistema OCT-Multiscan, direccionado para diagnóstico de patologias da retina. Actualmente, explora a aplicação da técnica OCT na caracterização microscópica tridimensional das propriedades ópticas e estruturais de (bio)materiais.

[<http://www.fc.up.pt/pessoas/ccrosa>]

# Manipulando os *spins* nucleares por ressonância magnética para obter imagens da perfusão cerebral

Patrícia Figueiredo

Instituto de Sistemas e Robótica, Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa

A perfusão sanguínea é um dos parâmetros fisiológicos de maior importância na avaliação da função cerebral. Por essa razão, têm-lhe sido dedicadas múltiplas técnicas de medição, tanto no contexto de experimentação laboratorial como no âmbito das aplicações clínicas. A imagiologia por ressonância magnética nuclear oferece a possibilidade de obter medidas quantitativas da perfusão cerebral, sem recurso à administração de meios de contraste e portanto de forma completamente não-invasiva. Os *spins* dos núcleos de hidrogénio das moléculas de água são manipulados por meio da excitação com impulsos de rádio-frequência, de modo a produzir um marcador endógeno do fluxo sanguíneo. Com esta técnica, hoje é possível obter imagens detalhadas da perfusão sanguínea no cérebro humano, com grande utilidade não só a nível da investigação científica mas também no diagnóstico médico.

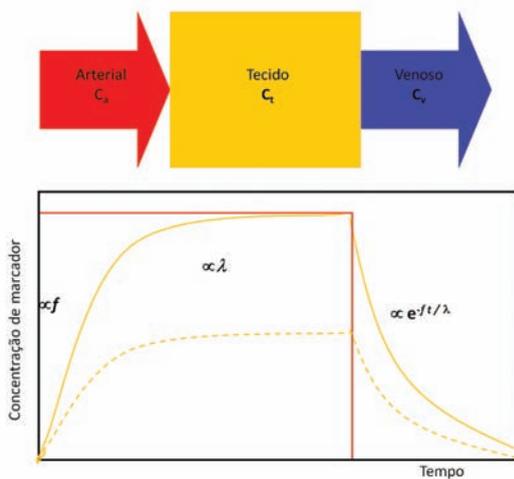
## Origens históricas

Em 1945 surgiam simultânea e independentemente os dois trabalhos científicos pioneiros que estiveram na origem do posterior desenvolvimento das técnicas de medição da perfusão cerebral por imagem de ressonância magnética. Enquanto Kety e Schmidt efectuavam as primeiras medições do fluxo sanguíneo do cérebro humano, Purcell e Bloch descobriam o fenómeno da ressonância magnética nuclear (RMN) que está na base da imagiologia por ressonância magnética (RM).

Na reunião anual da Federation of American Societies for Experimental Biology em 1944, foi amplamente discutida a dificuldade recorrente da inexistência até então de uma técnica para a medição do fluxo sanguíneo cerebral em doentes não anestesiados [1]. Em resposta a este desafio, Kety e Schmidt inventaram um método baseado na inalação de uma baixa concentração do gás inerte óxido nitroso ( $N_2O$ ) seguida da amostragem da sua concentração no sangue arterial e venoso [2]. A ideia assentava no já então

conhecido princípio de Fick, segundo o qual a taxa a que um gás inerte como o  $N_2O$  é absorvido pelo tecido cerebral é igual à taxa a que este lhe é distribuído pela circulação arterial menos a taxa a que lhe é retirado pela circulação venosa. A constante de tempo para atingir o equilíbrio entre os vários compartimentos (arterial, tecidual e venoso) é então dada pela razão entre o volume de distribuição do gás (ou seja, o cérebro todo) e a taxa a que este é distribuído (ou seja, o fluxo sanguíneo cerebral total) (ver Fig. 1). Foram assim obtidas as primeiras medidas quantitativas do fluxo sanguíneo do cérebro humano.

São estes os princípios fundamentais da cinética de marcadores diluídos no sangue (ilustrados na Fig. 1) nos quais se baseiam, mais ou menos directamente, todas as técnicas actualmente utilizadas para a medição da perfusão cerebral. Todas elas recorrem à utilização de um marcador da perfusão sanguínea



**Fig. 1 - Princípios da cinética de marcadores diluídos no sangue.**

A evolução temporal da concentração do marcador (baixo) é descrita com base num modelo de compartimentos (arterial, tecido e venoso) (cima), em função da perfusão,  $f$ , e do coeficiente de partição do marcador entre o sangue e os tecidos,  $\lambda$ , o qual corresponde ao volume de distribuição do marcador.

que é diluído no sangue e cuja concentração é medida por meio de algum sistema de detecção apropriado. Desde as experiências pioneiras de Kety e Schmidt, foram muitos os desenvolvimentos destas técnicas, mas talvez o mais importante tenha sido aquele que levou à utilização de métodos imagiológicos que permitissem a medição da perfusão nas várias regiões do cérebro. Entre estes encontram-se as técnicas da medicina nuclear de tomografia por emissão de positrão (*Positron Emission Tomography*, PET) e tomografia por emissão de fóton único (*Single Photon Emission Tomography*, SPECT), com as quais é possível medir a concentração da água marcada radioativamente [3,4]. Mais recentemente, o espantoso progresso da imagiologia por RM conduziu ao aparecimento de duas novas técnicas de imagem da perfusão sanguínea: uma recorrendo à administração de um agente de contraste paramagnético e outra, completamente não-invasiva, por meio da utilização de um marcador endógeno.

Na origem da imagiologia por RM está o fenómeno descoberto de modo independente por Felix Bloch e Henry Purcell em 1945 [5,6]. Conduzindo experiências diferentes, ambos observaram que os núcleos de hidrogénio absorviam e re-emitem energia na gama das rádio-frequências (RF) quando expostos a um campo magnético com uma intensidade relacionada com a frequência da radiação de acordo com a equação anteriormente demonstrada por Sir Joseph Larmor ( $\omega_L = \gamma B$ , onde  $\gamma$  é a razão giromagnética do núcleo). O fenómeno de RMN é observado para todos os núcleos exibindo a propriedade quântica de *spin* (que, por isso, são frequentemente designados como *spins* por simplicidade) e os físicos perceberam imediatamente que o processo de relaxação dos núcleos excitados para o seu estado fundamental fornecia um mecanismo com grande

**A imagiologia médica por RM** baseia-se essencialmente na interacção de Zeeman dos momentos magnéticos dipolares dos núcleos de hidrogénio das moléculas de água (que existem em abundância nos tecidos biológicos) com um campo magnético aplicado muito intenso (tipicamente ~1-3 Tesla, gerado por um magnete super-condutor). Como resultado do seu número quântico de spin  $\frac{1}{2}$ , estes núcleos são polarizados entre dois níveis energéticos e é assim gerada uma magnetização macroscópica cuja amplitude correspondente à diferença entre as duas populações (determinada pela distribuição de Boltzmann). Quando excitados por energia da frequência apropriada (gerada por uma bobine de rádio-frequência colocado junto do corpo), os spins de menor energia transitam para o nível de maior energia levando a uma redução da magnetização. A magnetização de equilíbrio é reposta pelo retorno ao estado fundamental, o qual se processa através de dois tipos de mecanismos distintos: a relaxação spin-rede, por meio de interacções com o meio, com uma constante de tempo  $T_1$ ; e a relaxação spin-spin, por meio da interacção entre spins, com uma constante de tempo  $T_2$ .

potencial para medir a interacção dos núcleos com o meio circundante. Designadamente, as constantes de tempo de relaxação associadas às interacções spin-rede,  $T_1$ , e spin-spin,  $T_2$ , reflectem características importantes da amostra. Surgiram rapidamente aplicações ao estudo da estrutura química da matéria por meio de espectroscopia, mas foi apenas em 1973 que Paul Lauterbur obteve as primeiras imagens de RM aplicando gradientes espaciais ao campo magnético para codificar a posição dos núcleos através das suas frequências de ressonância [7].

Desde a sua descoberta, a técnica de imagem por RM não tem parado de se multiplicar nas mais variadas vertentes e aplicações, não só no diagnóstico médico mas também em várias áreas de investigação científica. Uma das suas características mais interessantes é provavelmente a enorme versatilidade no contraste das imagens que se conseguem obter [8]. De facto, a magnetização total da amostra que é medida em cada instante pode ser manipulada por meio da aplicação de impulsos de rádio-frequência com a potência e forma adequadas, de modo a produzir imagens ponderadas em parâmetros como a densidade protónica ou as constantes de tempo de relaxação  $T_1$  e  $T_2$ . Para além disso, são também conseguidas modificações do contraste das imagens como resultado de pequenas perturbações do campo magnético aplicado, nomeadamente através da administração de agentes de contraste paramagnéticos, as quais se traduzem em constantes de tempo de relaxação spin-spin,  $T_2^*$ , mais curtas.

### A técnica de contraste de susceptibilidade dinâmica (DSC)

A primeira técnica desenvolvida para a medição da perfusão cerebral por RM baseia-se precisamente na monitorização, através de imagens rápidas, da passagem pelos tecidos de um bolo de substância paramagnética introduzido na circulação [9]. Os únicos agentes de contraste até agora

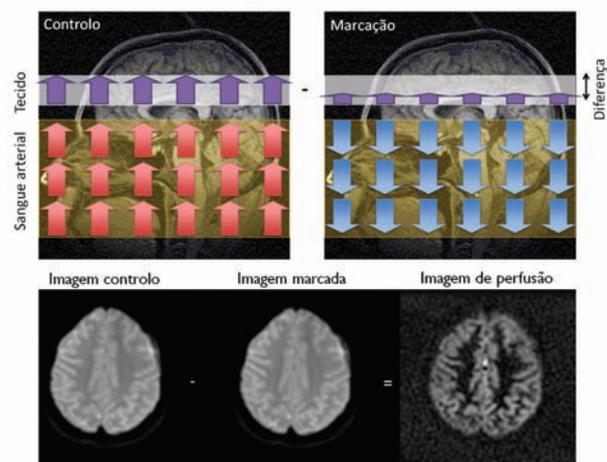
aprovados para aplicações médicas são compostos que integram o íon metálico paramagnético gadolínio (Gd). Devido à toxicidade da sua forma iônica, o Gd é usado como um quelato, ou seja, é integrado em moléculas orgânicas grandes formando um complexo ligante estável ao seu redor. Como consequência, estes agentes de contraste paramagnéticos não são capazes de atravessar a barreira hemato-encefálica e permanecem no espaço intra-vascular. A sua presença nos vasos sanguíneos conduz então a uma redução do sinal ponderado em  $T_2^*$ , por efeitos ditos de susceptibilidade magnética, pelo que este tipo de imagem é conhecida como contraste de susceptibilidade dinâmico (*Dynamic Susceptibility Contrast, DSC*).

Os compostos paramagnéticos utilizados em DSC constituem um tipo de marcador fundamentalmente diferente dos até aqui referidos, no que diz respeito à sua distribuição no cérebro. De facto, o marcador original utilizado por Kety e Schmidt, o gás inerte  $N_2O$ , é livremente difusível do compartimento vascular para o compartimento dos tecidos, pelo que o seu volume de distribuição é o cérebro todo. No entanto, como os marcadores paramagnéticos permanecem sempre no espaço intra-vascular por não poderem atravessar a barreira hemato-encefálica, o seu volume de distribuição fica limitado ao volume sanguíneo cerebral. Esta diferença leva a que, com base na teoria da cinética dos marcadores diluídos no sangue, a técnica de DSC seja considerada mais adequada para a medição do volume do que da perfusão sanguínea do cérebro [10]. De qualquer forma, a utilização de marcadores paramagnéticos está bem estabelecida na prática clínica e os neurorradiologistas extraem informação útil a partir dos dados de DSC, ainda que esta não seja rigorosamente quantitativa.

### A técnica de marcação dos spins arteriais (ASL)

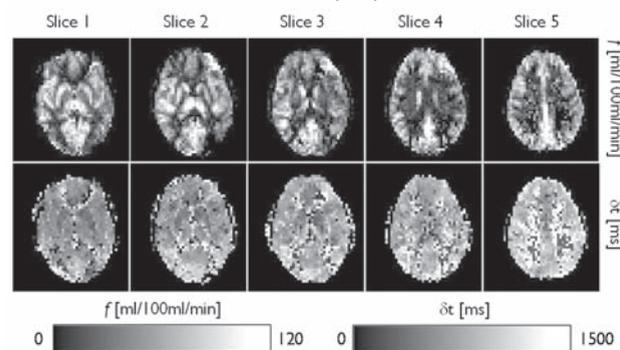
Entre 1992 e 1995 surgiram as primeiras demonstrações da possibilidade de obter imagens de perfusão por RM baseadas na marcação das moléculas de água no sangue arterial por meio da aplicação de campos RF apropriados (*Arterial Spin Labeling, ASL*) [11,12]. O efeito destes campos RF é saturar (anular) ou inverter a magnetização das moléculas de água (ver Fig. 2). Após um tempo de trânsito na circulação arterial, estas moléculas chegam às redes de capilares que irrigam o tecido cerebral e são transferidas do compartimento vascular para o do tecido. Uma imagem é então recolhida num certo instante após a marcação (tempo de inversão) e a magnetização medida é comparada com a que é medida na ausência de marcação (imagem de controlo). Para certos tempos de inversão, a diferença de magnetização é essencialmente proporcional à perfusão sanguínea local, pelo que é possível obter um imagem ponderada na perfusão a partir da simples subtração de uma imagem controlo a uma imagem marcada (Fig. 2).

A diferença de magnetização entre a imagem de controlo e a imagem marcada está relacionada com a perfusão sanguínea local, bem como com o tempo de trânsito arterial, através dum modelo da cinética de marcadores diluídos no sangue [13]. É portanto possível obter medidas quantitati-



**Fig. 2 - Princípios da técnica de Arterial Spin Labeling (ASL).** Os spins das moléculas de água do sangue arterial são marcados por inversão da sua magnetização (cima, direita) e a magnetização total medida nos tecidos é subtraída à magnetização medida numa imagem de controlo (cima, esquerda). O resultado é uma imagem ponderada na perfusão sanguínea cerebral (baixo), com uma resolução de  $\sim 4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$ .

vas da perfusão sanguínea e do tempo de trânsito arterial a partir da estimação deste modelo, se forem adquiridos dados de ASL em múltiplos tempos de inversão (Fig. 3) [14]. Vários métodos de aquisição e análise dos dados têm sido propostos no sentido de



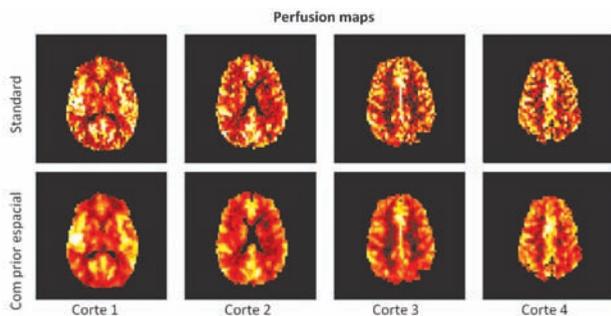
**Fig. 3 - Mapas quantitativos de perfusão e tempo de trânsito arterial por ASL.**

Mapas quantitativos de perfusão e tempo de trânsito arterial obtidos a partir da modelação cinética de dados de ASL adquiridos a múltiplos tempos de inversão, para 5 cortes representativos de um indivíduo saudável [14].

melhorar a qualidade dos mapas de perfusão que se conseguem obter [15]. Em particular, no nosso grupo no IST estamos interessados na utilização de métodos Bayesianos que incorporam informação a priori acerca dos valores fisiológicos dos parâmetros biofísicos, bem como da sua distribuição espacial, para otimizar a escolha dos tempos de aquisição, assim como a estimação dos parâmetros dos modelos cinéticos em cada pixel (Fig. 4) [16,17].

### Aplicações

A medição da perfusão sanguínea por técnicas imagiológicas constitui um elemento de grande valor no diagnóstico e monitorização de doenças cerebrovasculares, nomeadamente acidentes vasculares

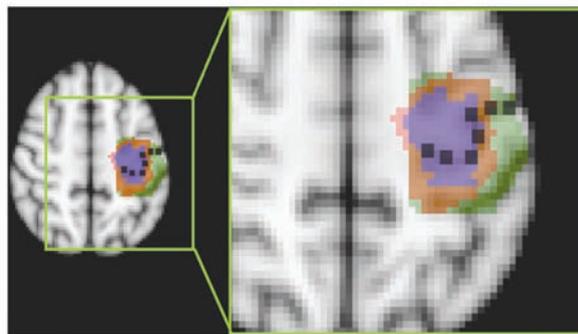


**Fig. 4 - Optimação da estimação de modelos cinéticos em ASL.** Mapas de perfusão obtidos a partir da modelação cinética de dados de ASL adquiridos a múltiplos tempos de inversão, num sistema Siemens Verio de 3 Tesla (Hospital da Luz), para quatro cortes representativos de um indivíduo saudável, usando um método de estimação Bayesiano, incluindo informação *a priori* sobre os parâmetros fisiológicos apenas (cima) e informação *a priori* sobre a variação espacial (baixo) [16]. É visível a melhoria na qualidade dos mapas de perfusão quando é incorporada a informação espacial [17].

cerebrais, tumores cerebrais, epilepsia, demência, enxaqueca, entre outras patologias neurológicas e psiquiátricas [18].

Para além das múltiplas aplicações ao estudo da perfusão sanguínea cerebral de base, a técnica de ASL tem também recebido muita atenção como potencial medida indirecta da actividade neuronal e, logo, como mecanismo de contraste para a obtenção de imagens funcionais do cérebro (*functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI*) [10]. De facto, desde o seu aparecimento em 1992 que foram detectadas, por meio da marcação de spins arteriais, alterações da perfusão sanguínea do córtex visual em resposta a estímulos visuais [19]. Relativamente à técnica mais comum de fMRI, que usa um contraste devido à oxigenação sanguínea (*Blood Oxygen Level Dependent, BOLD*), a técnica de ASL apresenta algumas vantagens importantes. Nomeadamente, verificamos já que o seu carácter quantitativo permite obter medidas mais reproduzíveis da activação cerebral [20]. Por outro lado, mostramos recentemente num trabalho de colaboração com o Departamento de Imagiologia do Hospital da Luz que as áreas de activação identificadas por ASL fornecem a melhor localização da activação cerebral relativamente a marcos bem conhecidos das zonas anatómicas envolvidas (Fig. 5) [21], o que se deve ao enviesamento do sinal BOLD para o compartimento venoso já anteriormente observado [20].

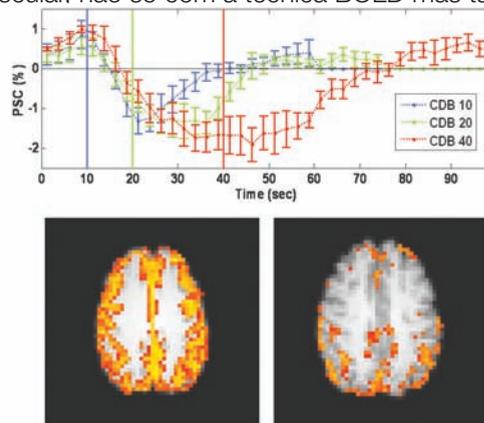
Nas doenças cerebro-vasculares, há especial interesse no estudo da reactividade cerebro-vascular, definida como a capacidade de vaso-dilatação ou vaso-constricção, e consequentes aumentos ou reduções da perfusão sanguínea, em resposta a determinados estímulos. Para tal, têm sido utilizados diferentes tipos de desafios com o objectivo de testar os limites desta capacidade, nomeadamente através da inalação de concentrações relativamente elevadas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (cujos efeitos vaso-dilatadores são bem conhecidos) ou da execu-



**Fig. 5 - Imagem funcional de actividade motora por contraste ASL e BOLD.**

Mapas de activação em resposta ao movimento da mão direita, obtidos num sistema Siemens Verio de 3 Tesla (Hospital da Luz), usando os contrastes ASL (azul), BOLD simultâneo com ASL (vermelho) e BOLD optimizado (verde), num grupo de 15 indivíduos saudáveis, comparados com a localização anatômica da área cortical motora primária (pontado, preto) [21].

ção de períodos de apneia (que conduzem na prática ao aumento da concentração sanguínea de  $\text{CO}_2$ ). A dificuldade de execução de apneias suficientemente prolongadas e o desconforto associado à inalação de concentrações elevadas de  $\text{CO}_2$  levaram-nos a investigar a possibilidade de, alternativamente, obter medidas de vaso-reatividade a partir da execução de períodos de hiper-ventilação controlada (Fig. 6) [22]. Em particular, procuramos optimizar o paradigma de modo a que seja possível obter medidas de reactividade cerebro-vascular, não só com a técnica BOLD mas também



**Fig. 6 - Avaliação da vasoreactividade por meio de fMRI.**

Respostas médias (em termos de *Percent Signal Change, PSC*) a hiper-ventilação controlada (*Cued Deep Breathing, CDB*) durante períodos de 10, 20 e 40 s (cima) e respectivos mapas de vaso-reatividade obtidos por BOLD (esquerda) e por ASL (direita) a 40 s (baixo), obtidos para um indivíduo saudável num sistema Siemens Verio de 3 Tesla (Hospital da Luz) (Sousa et al., submetido).

com ASL. De facto, as medidas através do contraste BOLD têm sido mais comumente utilizadas para este fim devido à superior razão sinal-ruído, mas apresentam a desvantagem de serem indirectas e sujeitas à influência de outros factores fisiológicos difíceis de controlar. Os nossos resultados mostram que o método de hiper-ventilação controlada pode de facto ser optimizado no sentido de fornecer medições úteis da vaso-reatividade cerebral em termos de perfusão.

## Desenvolvimentos futuros

A técnica de ASL apresenta um enorme potencial para

a obtenção de mapas de perfusão quantitativos de forma completamente não-invasiva, mas começa apenas agora a entrar na prática clínica. De facto, a obtenção de imagens por ASL requer sequências de aquisição especialmente desenvolvidas para o efeito e equipamentos de elevado campo magnético que assegurem a sensibilidade necessária, sendo ainda preciso resolver vários problemas metodológicos. A grande dificuldade da técnica ASL reside essencialmente no facto de apresentar uma razão sinal-ruído intrinsecamente muito baixa, a qual, aliada à complexidade dos modelos cinéticos do sinal medido, faz dela um dos grandes desafios actuais da imagiologia por RM. O recente aparecimento de sequências de ASL disponíveis comercialmente, bem como o número crescente de estudos relatando diversas aplicações da técnica, leva a crer que em breve esta se poderá estabelecer definitivamente, não só na prática clínica mas também como ferramenta de grande importância na investigação básica em Neurociências.

### Agradecimentos:

Apoio financeiro pela FCT, através do Projecto PTDC/SAU-BEB/65977/2006 e do financiamento plurianual do ISR/IST, e apoio logístico do Departamento de Imagiologia do Hospital da Luz.



### Patrícia Figueiredo

Patrícia Figueiredo licenciou-se em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico em 1996 e completou depois a pós-graduação em Biofísica e Engenharia Biomédica da Universidade de Lisboa. Doutorou-se em 2003 na

área da Neuroimagiologia pela

Universidade de Oxford, onde se especializou em imagem funcional por ressonância magnética.

Após ter leccionado como Professora Convidada na Universidade de Thammasat na Tailândia, regressou a Portugal como investigadora de pós-doutoramento na Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra em 2004. É desde Maio de 2007 Professora Auxiliar no Instituto Superior Técnico, onde exerce a sua actividade na área da Engenharia Biomédica. É actualmente investigadora do Instituto de Sistemas e Robótica de Lisboa, focando o seu trabalho no desenvolvimento e aplicação das técnicas de neuroimagem funcional, área em que lidera actualmente vários projectos científicos.

1. Traystman RJ, "The paper that completely altered our thinking about cerebral blood flow measurement", *J. Appl. Physiol.* 97(5), 1601-1602 (2004).
2. Kety SS e Schmidt CF, "The determination of cerebral blood flow in man by the use of nitrous oxide in low concentrations", *Am. J. Physiol.* 143, 53-66 (1945).
3. Herscovitch P, Markham J, Raichle ME, "Brain blood flow measured with intravenous H<sub>2</sub>(15)O. I. Theory and error analysis", *J. Nucl. Med.* 24(9), 782-789 (1983).
4. Raichle ME, Martin WR, Herscovitch P, Mintun MA, Markham J, "Brain blood flow measured with intravenous H<sub>2</sub>(15)O. II. Implementation and validation", *J. Nucl. Med.* 24(9), 790-798 (1983).
5. Bloch F, Hansen WW, Packard M, "Nuclear Induction", *Phys. Rev.* 69, 127 (1946).
6. Purcell EM, Torrey HC, Pound RV, "Resonance Absorption by Nuclear Magnetic Moments in a Solid", *Phys. Rev.* 69, 37 (1946).
7. Lauterbur, PC "Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance", *Nature* 242, 190-191 (1973).
8. Haacke EM, Robert WB, Michael RT, Ramesh V, "Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design", Wiley (1999).
9. Rosen BR, Belliveau JW, Vevea JM, Brady TJ, "Perfusion imaging with NMR contrast agents", *Magn. Reson. Med.* 14(2), 249-265 (1990).
10. Buxton RB, "Introduction to Functional Magnetic Resonance Imaging: Principles and Techniques", Cambridge University Press (2001).
11. Williams DS, Detre JA, Leigh JS, Koretsky AP, "Magnetic resonance imaging of perfusion using spin inversion of arterial water", *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 89(1), 212-216 (1992).
12. Kwong KK, Chesler DA, Weisskoff RM, Donahue KM, Davis TL, Ostergaard L, Campbell TA, Rosen BR, "MR perfusion studies with T1-weighted echo planar imaging", *Magn. Reson. Med.* 34(6), 878-887 (1995).
13. Buxton RB, Frank LR, Wong EC, Siewert B, Warach S, Edelman RR, "A general kinetic model for quantitative perfusion imaging with arterial spin labeling", *Magn. Reson. Med.* 40(3), 383-396 (1998).
14. Figueiredo P, Clare S, Jezard P, "Quantitative Perfusion Measurements using Pulsed Arterial Spin Labelling: Effects of Large ROI Analysis", *J. Magn. Reson. Imag.* 21, 676-682 (2005).
15. Petersen ET, Zimine I, Ho YC, Golay X, "Non-invasive measurement of perfusion: a critical review of arterial spin labelling techniques", *Br. J. Radiol.* 79(944), 688-701 (2006).
16. Santos N, Sanches JM, Figueiredo P, "Bayesian optimization of perfusion and transit time estimation in PASL-MRI", 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Buenos Aires, Argentina (2010).
17. Santos N, Sanches JM, Figueiredo P, "A Total Variation spatial prior for perfusion and transit time estimation in PASL-MRI", 19th Annual Meeting of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 2011, Montreal, Canada (submetido).
18. Detre JA, Wang Z, Rao H, "Arterial spin-labeled perfusion MRI in basic and clinical neuroscience", *Curr. Opin. Neurol.* 22(4), 348-55 (2009).
19. Kwong KK, Belliveau JW, Chesler DA, Goldberg IE, Weisskoff RM, Poncelet BP, Kennedy DN, Hoppel BE, Cohen MS, Turner R, et al., "Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation" *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 89, 5675-5679 (1992).
20. Tjandra T, Brooks JCW, Figueiredo P, Wise R, Matthews PM, Tracey I, "Quantitative Assessment of the Reproducibility of Functional Activation measured with BOLD and MR Perfusion Imaging: Implications for Clinical Trial Design", *Neuroimage* 27(2), 393-401 (2005).
21. Pimentel M, Sousa I, Vilela P, Figueiredo P, "Localization of the hand motor area using BOLD and ASL fMRI", *Proc. 18th Annual Meeting of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, May 2010, Stockholm, Sweden (2010).
22. Sousa I, Vilela P, Figueiredo P, "Optimization of a Cued Deep Breathing paradigm for CBF and BOLD cerebrovascular reactivity measurements", 19th Annual Meeting of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, May 2011, Montreal, Canadá (submetido).

# Divisão de Física Médica

## dinâmica de uma caminhada

**Maria do Carmo Lopes**

Coordenadora da DFM da SPF

**A Divisão de Física Médica (DFM) da SPF tornou-se, desde 2005 e depois de um difícil e complexo processo de discussão nacional, a associação representante dos físicos médicos em Portugal. A SPF já era, anteriormente, membro da IOMP – International Organization for Medical Physics.**

No entanto, a nível europeu, só em finais de 2007 e também depois de um processo de avaliação por parte de uma “Commission of Good Offices with respect to Portugal” é que a EFOMP – European Federation of Organizations for Medical Physics – reconheceu a DFM como a sociedade científica mais representativa da classe dos físicos médicos em Portugal. Em todos os momentos destes processos foi importante o apoio inequívoco da Direcção da SPF e o empenhamento pessoal do(s) seu(s) presidente(s).

Terminado este difícil mas imprescindível período de reconhecimento nacional e internacional, era tempo de concretizar a principal missão da DFM: promover, cultivar, desenvolver e divulgar em Portugal, as actividades de investigação, ensino, e estudo de todas as aplicações da Física à Medicina assim como da sua prática em ambiente hospitalar.

Começámos por redigir o Regulamento Interno que viria a ser aprovado a 9 de Janeiro de 2008, pela Direcção da SPF. Do ponto de vista interno, realizam-se reuniões gerais pelo menos uma vez por ano, normalmente no início de cada ano. Nelas é apresentado o Relatório de Actividades do ano transacto e discutido o Plano de Acção do ano que se inicia. São ainda realizadas reuniões extraordinárias sempre que haja situações, temas ou circunstâncias que o justifiquem. O número crescente de sócios, que subiu de 60 em 2008 para 80 em 2009 e já soma mais de 100 actualmente, é expressão do interesse que a área da Física Médica desperta.

A DFM tem participado activamente nas Conferências Nacionais de Física quer com painéis dedicados quer com um número significativo de participações científicas.

Em Maio de 2009, a DFM em conjunto com o I3N da Universidade de Aveiro, organizou um evento a que chamou “Medical Physics Workshop – Where is Portugal in the Medical Physics World”. A ideia foi juntar portugueses, com experiências diferentes, mas tendo como denominador comum a área da Física Médica. Pretendeu-se com esta *workshop* fomentar a troca de experiências, partilhar saberes, divulgar iniciativas, discutir pontos de vista. O interesse científico e formativo do evento foi reconhecido pela EFOMP que acreditou a *workshop* como um “CPD event for Medical Physicists”. A *workshop* contou com cerca de 230 participantes de todo o país, para além dos convidados estrangeiros e de uma minoria de participantes de outros países, o que só por si é revelador do interesse despertado pelo tema – Física Médica em Portugal. Do conjunto de participantes, cerca de metade eram estudantes de várias áreas relacionadas com a Física – Física, Física Tecnológica, Engenharia Física e Engenharia Biomédica. Esta forte adesão estudantil mostra o grande interesse dos jovens estudantes de Física nesta temática, vendo-a como uma possível e atractiva área de futuro profissional. Pena é que não lhe seja dada a devida atenção por parte dos dirigentes nacionais.

Ainda em 2009, e aproveitando uma reunião no Porto da ICRP (International Commission on Radiological Protection), que foi uma *joint session* da Comissão Principal com todos os Comitês, convidámos o Comité 3 (“Radiation Protection in Medicine”) para um seminário intitulado “ICRP and Radiological Protection in Medicine”, onde os mais reputados cientistas internacionais neste tema nos apresentaram as principais linhas de actuação, desenvolvimentos científicos e preocupações na área da Protecção Radiológica em Medicina. À coordenadora da DFM foi pedido que apresentasse o panorama da Física Médica e da

Protecção Radiológica em Portugal. A crueza dos números e factos apresentados, nomeadamente a falta de quadro nacional de formação e certificação profissional estruturado e consistente com as recomendações europeias, foi objecto da manifestação da maior preocupação por parte dos membros do comité, nomeadamente o Professor Eliseo Vaño que é também o Presidente do Grupo de Exposições Médicas da EURATOM. Na sequência desta apresentação, foi elaborado um relatório que foi apresentado na reunião de Fevereiro de 2010 daquele grupo da EURATOM. Aguardamos desenvolvimentos, nomeadamente no âmbito do projecto europeu “European Guidelines on Medical Physics Expert” [1].

A grande aposta do ano de 2010 foi a revitalização da página Web e a publicação da Newsletter. A nova página [2] ficou activa em Julho passado, e parece cumprir o objectivo de se tornar uma presença na internet que crie uma relação mais próxima, duradoura e útil aos seus visitantes e que ajude a promover a Física Médica em Portugal. A publicação *on-line* da Newsletter pretende ser um veículo de informação útil e rigorosa tanto para os profissionais da área como para o público em geral. Os ecos que temos recebido quer dos visitantes da página quer dos leitores da Newsletter incentivam-nos a continuar. Já está disponível o nº 2 da Newsletter que contará com um contributo que muito nos honra: o Dr. Madan Rehani, membro destacado da Agência Internacional de Energia Atómica, tem seguido com atenção os desenvolvimentos em Portugal e dispôs-se a contribuir com um dos artigos do número de Novembro. O tema é o da nova era em Tomografia Computorizada e dos potenciais perigos associados quando ao desenvolvimento tecnológico não corresponde a adequada formação e treino dos utilizadores.

De facto, o contínuo desenvolvimento e instalação de equipamentos, técnicas e novas tecnologias de tratamento e diagnóstico cada vez mais complexas, que se tem verificado de forma sistemática no nosso país, sem o necessário enquadramento quer em termos de número de profissionais quer em termos de formação e treino estruturado, coerente e efectivo, é uma estratégia perigosa e potenciadora de riscos graves. É por isso que a DFM elaborou, em Fevereiro de 2008, um relatório que é a proposta da DFM no sentido da formulação de recomendações sobre os esquemas desejáveis de formação e de certificação profissional dos físicos médicos em Portugal, para o exercício em ambiente hospitalar e seguindo as recomendações europeias [3]. Foi entregue quer no Ministério da Saúde quer no Ministério da Ciência e Ensino Superior, já em 2008. Não tendo havido consequências, em Junho passado, foi compilado um dossier alargado incluindo documentação relevante sobre o tema da formação e certificação profissional. A DFM promoveu a sua entrega em várias instâncias do poder político, tais como a Comissão Parlamentar de Saúde, o Ministério da Saúde (ACSS) e a Comissão Independente para a Protecção Radiológica e a Segurança Nuclear, pretendendo marcar posição e alertar, mais uma vez, as autoridades competentes para a urgência

de resoluções conducentes ao reconhecimento de uma profissão – a de Físico Médico – cuja estruturação e desenvolvimento tem sido sistematicamente ignorada em Portugal.

O reconhecimento internacional está afirmado. Dele é exemplo a recente nomeação da coordenadora da DFM como *Chair* do Education and Training Committee da IOMP. A nível europeu, temos também representantes nos vários comités da EFOMP (Education and Training, European Matters e Professional Matters). Apresenta-se assim um quadro favorável de apoio internacional. Temos que o saber potenciar a nível nacional. Há já alguns sinais positivos: a DFM tem sido solicitada, por parte dos tribunais, a nomear peritos em Física Médica em diversos processos judiciais em curso, o que é um indicador de que o reconhecimento nacional começa a ser um facto. Por outro lado, a existência destes processos, indicadores de erros graves que afectam os doentes, é mais uma prova da urgência de se encarar a formação e certificação em Física Médica em Portugal de forma efectiva.

O percurso traçado representa já algumas conquistas, é certo, mas muito caminho está ainda por fazer. A missão da DFM só terá continuidade através da participação activa dos seus membros.

1. <http://portal.ucm.es/web/medical-physics-expert-project>
2. <http://dfm.spf.pt>
3. <http://dfm.spf.pt/relatórios>



### Maria do Carmo Lopes

doutorou-se em Física da Radiação pela Universidade de Coimbra em Novembro de 1991. Desde Agosto de 1992 que se dedica à Física Médica, no Instituto Português de Oncologia de Coimbra (IPOCFG, EPE). É Directora do Serviço de Física Médica desde a sua criação, em Outubro de 2003. Tem-se dedicado ao desenvolvimento de novas técnicas em Radioterapia, tais como Radiocirurgia ou Radioterapia e Braquiterapia Guiadas por Imagem. É Coordenadora da Divisão de Física Médica da SPF desde Maio de 2005, delegada nacional na EFOMP e IOMP e é actualmente Chair do Education and Training Committee da IOMP. É também membro do Physics Committee da ESTRO, desde 2005.

# Aplicações biomédicas com feixes de iões

Teresa Pinheiro

Instituto Tecnológico e Nuclear & Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa

**Neste artigo, as potencialidades da utilização de feixes de iões para estudos biomédicos serão ilustradas com vários exemplos nas áreas de Toxicologia e Saúde Ambiental, Fisiologia e Patologias Humanas. As técnicas com feixes de iões permitem a análise de quantidades vestigiais de elementos nos tecidos biológicos e o seu mapeamento à escala micrométrica. Estas técnicas têm sido exploradas no ITN, desde há 30 anos, acompanhando activamente o progresso científico neste domínio.**

## Introdução

Feixes de iões, normalmente prótons de milhares de electrão-Volt (MeV), produzidos em aceleradores de pequenas dimensões (2-10 m), encontram aplicação em múltiplas áreas das Ciências Biológicas e Médicas no estudo de fluidos biológicos, tecidos e células.

Apesar de os aceleradores de partículas serem utilizados desde a década de 30, o grande salto qualitativo na aplicação das técnicas de feixes de iões remonta aos anos 70, quando Sven Johansson, da Universidade de Lund, na Suécia, demonstrou que a interacção de partículas aceleradas com os átomos presentes numa amostra induzia a produção de raios X permitindo a detecção dos elementos presentes nessa amostra mesmo em quantidades diminutas, da ordem de  $10^{-9}$  g.

A técnica foi designada por PIXE (do inglês, *Particle Induced X-ray Emission*) e é desde então referência na análise elementar em amostras biológicas. Na década seguinte, primeiro John Cookson em Harwell e depois Geoff Grime e Frank Watt, na Universidade de Oxford, desenvolveram sistemas de lentes electrostáticas e electromagnéticas capazes de focar um feixe de iões a dimensões próximas de  $1 \mu\text{m}$  de diâmetro. O varrimento da amostra com estes feixes de iões e a utilização de vários sistemas de detecção (raios X, dispersão de iões e electrões secundários), possibilita a geração de imagens da morfologia da amostra e de mapas de distribuição de elementos químicos com elevada resolução espacial e em tempo real. Este arranjo experimental é usualmente designado por Microsonda Nuclear ou Microscopia Nuclear.

A típica combinação de técnicas destes sistemas inclui a análise elementar com PIXE e RBS (do inglês, *Rutherford Backscattering Spectrometry*) e a análise morfológica utilizando técnicas de STIM (do inglês, *Scanning Transmission Ion Microscopy*) e de detecção de electrões secundários. Estas técnicas espectrométricas baseiam-se em princípios de Física Atómica. No caso do PIXE e da emissão de electrões secundários, a emissão de raios X ou electrões resulta de excitação atómica induzida pelo feixe de partículas aceleradas. No caso do RBS e STIM, a perda de energia da partícula incidente ao ser retrodispersa ou ao atravessar a amostra dá informação sobre a composição, espessura e densidade. O mapeamento permite obter imagens de densidade com resolução msub-micrométricas, obter imagens de distribuição elementar com limites de detecção na ordem dos mg/kg, e estabelecer perfis de concentrações.

Estas técnicas têm vindo a ser desenvolvidas nos Aceleradores Van de Graaff e Tandem do Instituto Tecnológico e Nuclear (Figura 1) há cerca de três décadas, e utilizadas em estudos Biológicos e Biomédicos, nas áreas da Toxicologia



Fig. 1 - Pormenor do acelerador Tandem de 2.5 MeV do ITN.

e Saúde Ambiental, Cardiologia e Dermatologia. Algumas destas aplicações serão seguidamente apresentadas de modo a ilustrar o valioso contributo das técnicas de feixes de iões na investigação biológica e biomédica.

### Toxicologia ambiental

Os organismos vivos podem ser utilizados como indicadores de poluição ambiental, metálica e orgânica, fornecendo informação relevante sobre o risco de exposição a esses poluentes e sobre a qualidade dos ecossistemas. De um modo geral, a exposição prolongada a poluentes resulta na sua acumulação em tecidos e órgãos. A toxicidade dos metais está relacionada com a sua capacidade de gerarem radicais de oxigénio, que por sua vez oxidam as cadeias lipídicas e proteicas alterando as suas funções, por vezes de um modo irreversível. As células possuem, no entanto, mecanismos bioquímicos antioxidantes, que incluem enzimas como a superóxido dismutase (SOD) e a glutathione S transferase (GST). Estudar a relação entre a acumulação de metais nos órgãos e a actividade destes sistemas antioxidantes pode ajudar a compreender os efeitos de poluentes metálicos e o risco ambiental que representam para os sistemas vivos. Esta estratégia foi utilizada para estudar a contaminação de ecossistemas terrestres e marinhos em Portugal, utilizando-se a técnica de PIXE para a determinação das concentrações elementares nas amostras biológicas e ambientais a par com métodos bioquímicos para avaliação da resposta biológica.

Os efeitos tóxicos resultantes da extracção de minério de cobre foram avaliados numa espécie de peixe de água doce (*Leuciscus alburnoides complex*). Estudou-se a bio-acumulação de elementos no fígado, comparando populações de áreas contaminadas e não contaminadas, na mesma região geográfica e climática. Observaram-se níveis muito elevados de cobre e selénio no fígado dos peixes da área contaminada e um aumento moderado da actividade das enzimas SOD e GST, quando comparados com a população oriunda da zona de referência (Figura 2), o que indica uma boa adaptação metabólica da espécie às condições ambientais adversas.

A disponibilidade ambiental de chumbo em três regiões

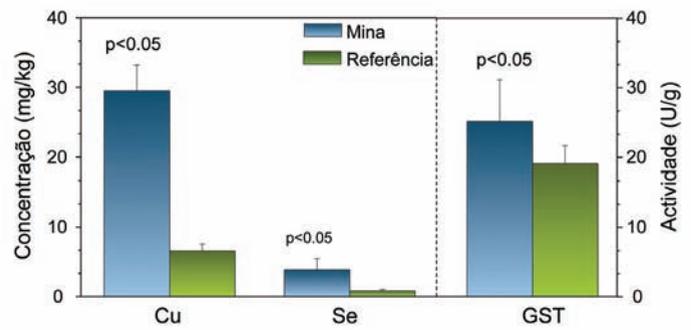


Fig. 2 - Concentrações de Cu e Se e actividade da enzima GST nas populações de *L. alburnoides* capturadas na área poluída (Mina) e numa região não poluída de referência. Valores significativamente diferentes,  $p < 0.05$ .

da costa Portuguesa –Viana do Castelo, Cascais e Santa Luzia – foi estimada utilizando o polvo (*Octopus vulgaris*) como bioindicador, por ser um animal bêntico na base da cadeia alimentar, ubíquo em múltiplos habitats e com valor edível. No músculo, a única parte edível deste animal, o teor de Pb foi inferior a 1 mg/kg (valor limite regulamentado), mas bastante relevante em órgãos com funções metabó-

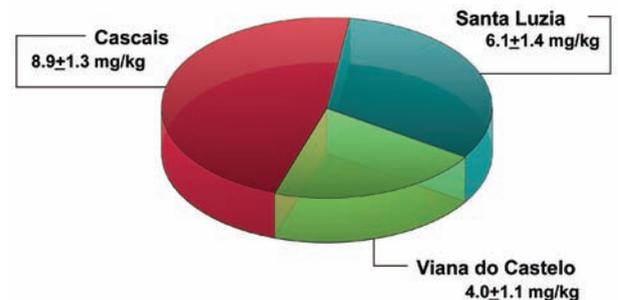


Fig. 3 - Concentração média de Pb nos órgãos de excreção (coação branquial e glândula digestiva) em três regiões da costa Portuguesa. Em Cascais a acumulação de Pb foi significativamente maior ( $p < 0.05$ ).

licas e de excreção (Figura 3), reflectindo o enriquecimento em Pb dos sedimentos marinhos. A concha vestigial, estrutura mineralizada que se desenvolve ao longo da vida do animal por crescimento de anéis concêntricos, apresentou uma deposição diferenciada de P, Cl, Ca, Cu e Fe: o núcleo, correspondente à fase juvenil, com teores mais elevados de P e Ca; os anéis exteriores correspondentes à fase adulta, com concentrações decrescentes destes elementos e um aumento progressivo de Cl (Figura 4). Nos anéis exteriores observaram-se ainda inclusões de Cu e Fe. Estas variações poderão reflectir factores ambientais e fisiológicos que influenciam o ciclo de vida desta espécie.

### Saúde ambiental

Estudos realizados nas últimas décadas têm chamado a atenção para a relação entre o particulado em suspensão na atmosfera e o aumento de mor-

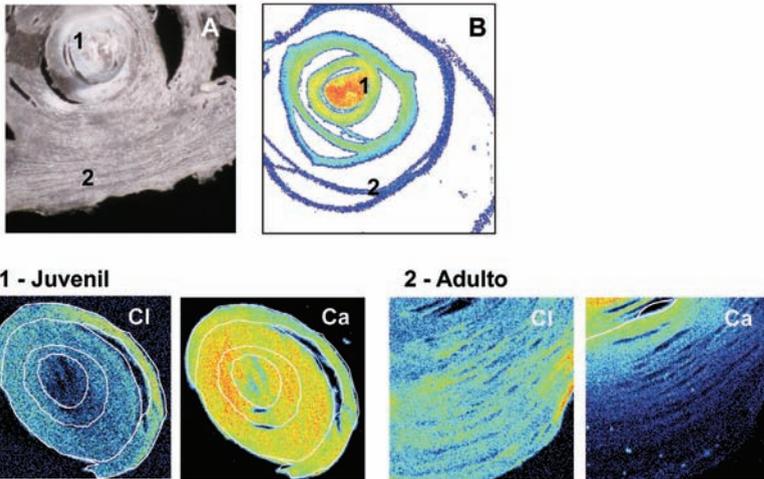


Fig. 4 - Imagens da morfologia de uma secção da concha vestigial de *O. vulgaris* observada por microscopia óptica (a) e por microsonda nuclear (b). A estrutura é formada por anéis concêntricos : 1) fase juvenil correspondente ao núcleo com um número reduzido de anéis (evidenciados pelas linhas desenhadas a branco) e 2) fase adulta correspondente a múltiplos anéis de crescimento exteriores. As imagens de Cl e Ca evidenciam o gradiente ao longo das fases de crescimento (azul - concentração mínima; vermelho - concentração máxima). Áreas de varrimento de  $530 \times 530 \mu\text{m}^2$ .

bilidade e mortalidade nas populações expostas. A toxicidade das partículas inaladas está dependente do tamanho e da composição química, factores que poderão influir na sua penetração, deposição e interacção com as células dos tecidos respiratórios. A partir de secções com  $10 \mu\text{m}$  de espessura de tecidos respiratórios humanos obtidos post mortem, obtiveram-se mapas de distribuição elemental. Identificaram-se partículas isoladas de 2 a  $10 \mu\text{m}$

de diâmetro na mucosa do epitélio da traqueia, aglomerados de partículas de dimensões inferiores nos alvéolos pulmonares e internalizados em macrófagos (Figura 5). Na traqueia a maior parte das partículas eram constituídas por Al, Si, Ca, Ti e Fe, elementos associados à composição da crosta terrestre (Figura 5A). Nas regiões distais do sistema respiratório, quer na superfície do epitélio brônquico e cavidades alveolares, quer nos tecidos adjacentes e células macrófagicas, observaram-se aglomerados com composição elemental diversa, e.g., V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb, na maior parte elementos com toxicidade reconhecida (Figuras 5B e C).

A informação obtida com as técnicas de microscopia nuclear é assim extremamente valiosa, por indicar simultaneamente, a dimensão das partículas, locais de deposição, composição elemental, mobilidade para os tecidos adjacentes e mecanismos de remoção, como por exemplo através da sua internalização nos macrófagos.

### Biomarcadores de doenças humanas

A patogénese da doença pulmonar obstrutiva crónica (DPOC) não se encontra ainda completamente esclarecida, nem existem até hoje marcadores sistémicos para esta patologia. A DPOC é responsável por cerca de 5% da morbilidade em Portugal, causando inflamação das vias aéreas e disfunção pulmonar progressiva.

Foram estudadas as variações de um conjunto de indicadores de lesão oxidativa e resposta anti-oxidante (parâmetros bioquímicos e elementos químicos) na circulação sanguínea de doentes e de indivíduos saudáveis. Registou-se um aumento da concentração de carbonilos proteicos e tióis totais (que são indicadores de danos oxidativos de proteínas) e uma diminuição da actividade de enzimas antioxidantes como o glutatióno peroxidase, nos doentes. As concentrações de Se no plasma também se encontravam reduzidas relativamente ao grupo controlo, especialmente nos indivíduos com níveis muito baixos de pressão de oxigénio arterial (Figura 6). Estas variações não eram influenciadas por hábitos de vida, como por exemplo hábitos tabágicos. Deste modo, as alterações observadas reflectem os danos induzidos por processos oxidativos e a alteração da homeostase electrolítica, podendo ser interpretadas como marcadoras da DPOC.

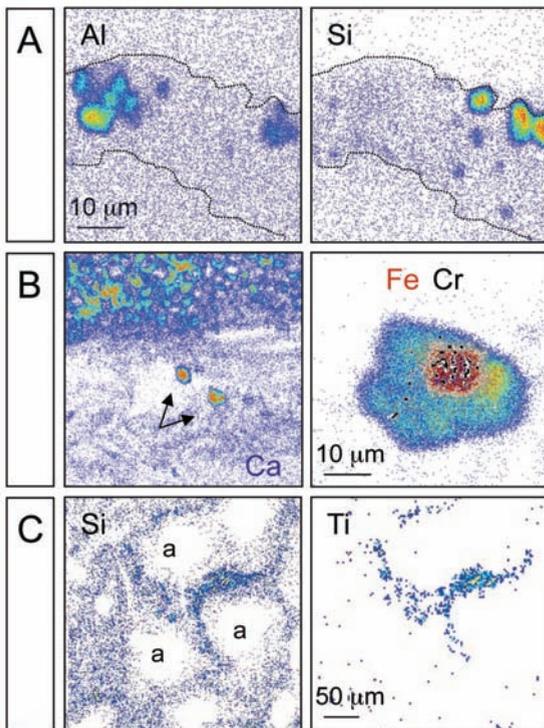


Fig. 5 (a) - Distribuição de Si e Ca (teores representados por um gradiente de cores) evidenciando partículas individualizadas na mucosa do epitélio da traqueia humana (área delimitada pelas linhas a tracejado); (b) células macrófagicas na parede brônquica (setas) visíveis no mapa de distribuição de Ca; à esquerda ampliação de uma das células com inclusões de Fe, mapa de distribuição a vermelho) e Cr (preto), sobrepostos ao mapa de Ca; (c) mapas de Si e Ti evidenciando aglomerados de partículas nas paredes das cavidades alveolares (a).

### Permeabilidade da pele a nanopartículas

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento significativo da exposição das populações humanas a nanopartículas (NPs) sintéticas. Estudos de difusão destas NPs na pele são essenciais para avaliar os riscos para a saúde e estimar níveis de segurança para a sua utilização. Um dos exemplos é a utilização de NPs de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{ZnO}$  como agentes físicos que dispersam ou reflectem a radiação ultravioleta em cremes protectores solares. Para determinar a localização e a eventual penetração de NPs de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{ZnO}$  nas formulações cosméticas, em condições *in vivo* e que reflectissem a habitual utilização dos cremes, delinearam-se protocolos clínicos

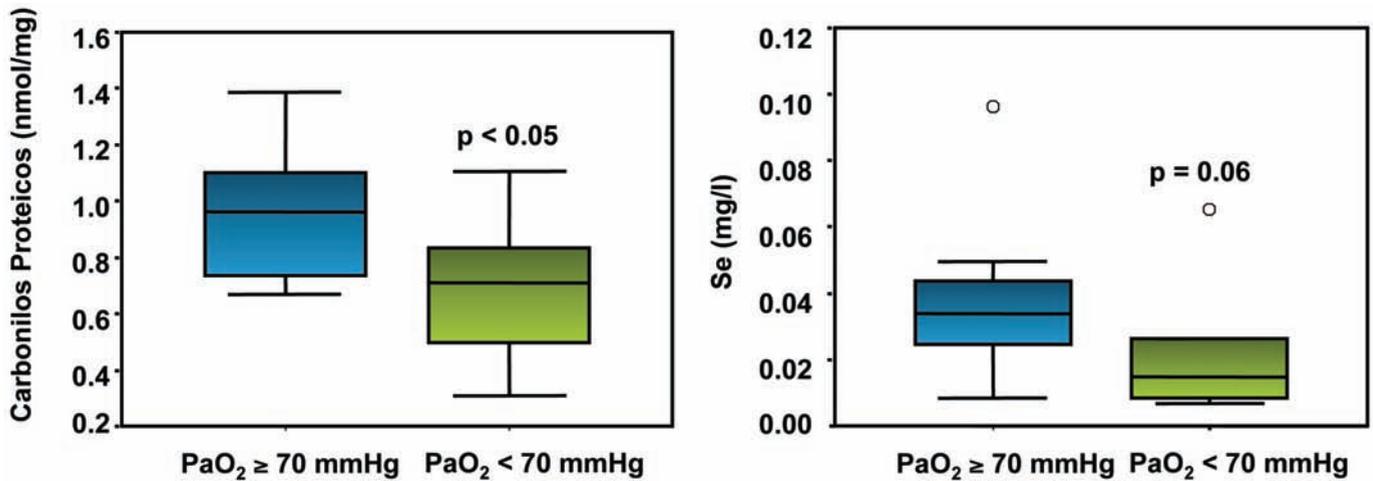


Fig. 6 - Concentração de carbonílios proteicos e de Se no plasma de doentes em função de duas classes de pressão de oxigénio arterial (PaO<sub>2</sub>). Os gráficos representam medianas (linha divisória da caixa), interquartil de 25% e 75% (caixa) e os limites mínimos e máximos (barras verticais). Os valores extremos estão representados por um círculo. As diferenças significativas estão indicadas no gráfico.

específicos tendo em conta a quantidade, o modo de aplicação corrente, e recorreu-se à microsonda nuclear para análise morfológica e determinação dos perfis de concentração de Ti e Zn na pele normal. As amostras de pele foram recolhidas por biopsia (3 mm), congeladas imediatamente a -198 °C e seccionadas em micrótomos de congelação. Imagens de alta resolução da morfologia da pele obtidas

primeira camada de células viáveis da epiderme, o stratum granulosum. A profundidade de penetração foi estimada tendo como limite mínimo de concentração o valor médio dos níveis fisiológicos de Zn na epiderme (3.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ) e o valor do limite de detecção no caso do Ti (<0.3  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ ), dado não se conhecer nenhuma função fisiológica para este elemento no organismo. Este estudo permitiu avaliar pela primeira vez em condições próximas do in vivo, os perfis de penetração de NPs de TiO<sub>2</sub> e ZNO na pele humana e confirmar que a sua utilização em formulações tópicas não apresenta riscos para a saúde humana.

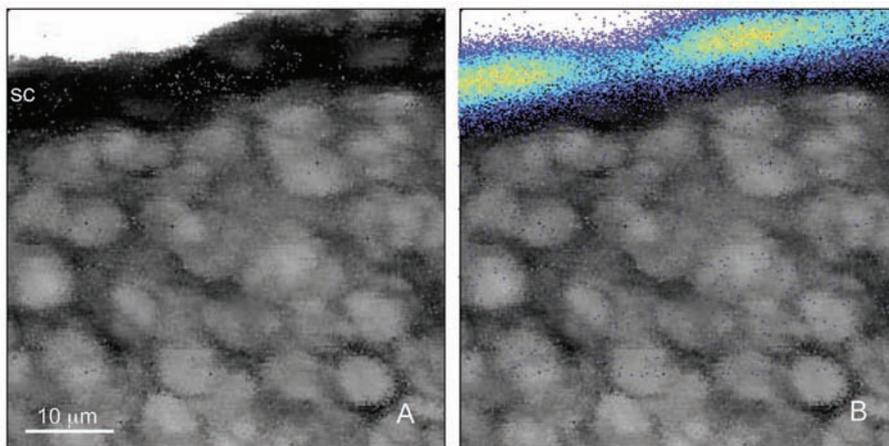


Fig. 7 - Corte transversal de pele tratada com um creme solar com nanopartículas de TiO<sub>2</sub>. A- Imagem da distribuição de densidade obtida com STIM de alta resolução, onde se pode observar a camada externa, stratum corneum (sc) - região de maior densidade (preto), e as camadas inferiores de células (queratinócitos) da epiderme. B - mapa de distribuição de Ti sobreposto à imagem de densidade, representado por um gradiente de cores (azul - mínimo, vermelho - máximo). A penetração de nanopartículas (TiO<sub>2</sub>) na camada córnea não chega a atingir a epiderme.

com STIM e da distribuição elementar com PIXE e RBS permitiram determinar os perfis de concentração de Ti e Zn na pele e a profundidade de penetração das NPs (Figura 7). Verificou-se que a penetração de Ti não ultrapassou 78% da extensão total da camada córnea (estratos queratinizados da epiderme), enquanto que o Zn não excedeu 88%, mesmo para exposições superiores a 72 horas. Em ambos os casos não chegou a haver contacto das NPs com a

### Perspectivas futuras

A utilização de microscopia nuclear representa actualmente uma mais valia significativa em estudos biomédicos por permitir a análise in vivo de tecidos e células, sem recorrer a contrastes ou requerer preparação da amostra por processos químicos, métodos que de um modo geral, modificam a estrutura e alteram a distribuição de metabolitos. Desenvolvimentos tecnológicos e instrumentais recentes permitem a utilização de novas técnicas, como por exemplo a fluorescência induzida pelos electrões secundários (produzidos pela interacção do feixe de partículas com os átomos) e obter resoluções inferiores a 100 nm. As imagens de fluorescência, quer sejam por emissão natural ou induzida, possibilitam a identificação de células, tecidos, fluoróforos, NPs, etc, com resoluções cerca de 10 vezes superiores à microscopia convencional. Estas imagens podem

ser combinadas com as de PIXE (distribuição elemental) ou de STIM (morfologia), o que abre imensas possibilidades em estudos de fisiologia celular e transporte membranar.

## Agradecimentos

Os estudos foram realizados com o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia e da Comunidade Europeia, em colaboração com investigadores do Centro de Biologia Ambiental da Faculdade de Ciências e da Faculdade de Medicina da Universidade de Lisboa, do Hospital de Santa Maria, e Universidades de Bordeaux (França), Lund (Suécia), Madrid (Espanha) e Oxford (Inglaterra).

### Para saber mais

P. Filipe et al., *Skin Pharmacol. Physiol.* 22, 266-275 (2009); doi: 10.1159/000235554

S. A. E. Johansson e T. B. Johansson, *Nucl. Instr. Meth.* 137, 473-516 (1976); doi:10.1016/0029-554X(76)90470-5

P. A. Lopes et al., *Sc. Total Environ.* 280, 153-163 (2001); doi:10.1016/S0048-9697(01)00822-1

P. Napoleão et al., *Sc. Total Environ* 345, 41-49 (2005); doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.10.026

T. Pinheiro et al., *Nucl. Instr. Meth. B* 158, 499-504 (1999); doi:10.1016/S0168-583X(99)00369-9

T. Pinheiro et al., *Nucl. Instr. Meth. B* 267, 2140-2143 (2009); doi:10.1016/j.nimb.2009.03.064

M. Ren, et al., *J. Appl. Phys* 103, 014902 (2008); doi:10.1063/1.2827106

M. C. Santos et al., *Biomarkers* 9, 461-469 (2004); doi: 10.1080/135475004000247685087(82)90119-3

M. D. Ynsa et al., *J. Microscopy* 224, 298-305 (2006); doi:10.1111/j.1365-2818.2006.01705.x



**Teresa Pinheiro** é Investigadora Auxiliar do Instituto Tecnológico e Professora Associada Convidada do Departamento de Física do Instituto Superior Técnico. É licenciada em Biologia pela Faculdade de Ciências e Doutorada em Fisiologia Animal (1995) pela

Universidade de Lisboa. No início dos anos 90 participou nas experiências iniciais de aplicações biomédicas com microscopia nuclear na Universidade de Lund, Suécia. Tem actualmente colaborações neste domínio, com o Hospital de Santa Marta em Lisboa, a Faculdade de Medicina da Universidade de Lisboa, e com as Universidades de Madrid e Singapura. A sua actividade recente no domínio das Ciências Biomédicas centra-se em aspectos relacionados com as alterações fisiológicas de tecidos e células em patologias humanas.

# Dinâmica do crescimento tumoral: um olhar físico

Rui Travasso

Centro de Física Computacional, Departamento de Física  
Universidade de Coimbra - Rua Larga, 3004-516 Coimbra

**A Física é já essencial no desenvolvimento de técnicas de monitorização de processos oncológicos, mas o seu papel neste tópico não se encontra esgotado. O futuro da luta contra o cancro passa pela utilização de modelos concebidos por físicos e matemáticos e que, apesar da sua natureza computacional, são desenvolvidos em cooperação com médicos e biólogos de modo a emular o crescimento de tumores. A modelação poderá representar um passo importante na direcção da existência de terapias anti-cancerígenas específicas para cada paciente. Neste artigo descrevo resumidamente algumas destas estratégias de modelação do desenvolvimento de um tumor sólido.**

## Introdução

Devido à sua importância social e médica o crescimento tumoral chamou a si a atenção de diversos especialistas, tornando-se uma das temáticas multidisciplinares mais dinâmicas em Ciências Médicas. Tratando-se de um sistema complexo, no desenvolvimento de um tumor são relevantes processos que ocorrem a escalas muito diferentes. Por exemplo, alterações dos níveis de transcrição de genes no núcleo das células tumorais podem levar a uma modificação

das propriedades mecânicas do tecido, e consequentemente influenciar a evolução de todo o tumor.

A Física tem contribuído de forma relevante para o diagnóstico e tratamento oncológico, nomeadamente através do desenvolvimento de vários métodos de imagiologia, como os raios x, a tomografia computadorizada, o PET ou a ressonância magnética. Contudo, diversos modelos teóricos capazes de simular processos físicos relacionados com o desenvolvimento tumoral têm vindo a ganhar cada vez mais importância.

A relevância destes modelos e do prosseguimento desta linha de estudos é reconhecida de um ponto de vista institucional. A título de exemplo, o Instituto Nacional para o Cancro (NCI) nos Estados Unidos financiou recentemente a criação de 12 centros de investigação de interface entre a Física e a Medicina para estudar problemas oncológicos. Estes centros, localizados em instituições de prestígio como o MIT, Princeton ou Berkeley, tiram usufruto da indiscutível capacidade da Física de analisar problemas complexos de modo a encarar o desenvolvimento de tumores de uma nova perspectiva, apresentando novos meios de actuar sobre o problema.

A variedade de modelos relacionados com o crescimento tumoral que surgiu nos últimos anos é enorme, como se verá abaixo. Em [1] os autores

fazem uma revisão detalhada dos modelos que põem ênfase na descrição de propriedades contínuas da massa tumoral e não no comportamento de cada célula. O número de referências deste artigo é superior a 550 e na sua maioria tratam-se de implementações de um determinado modelo aplicado a um aspecto distinto relacionado com crescimento tumoral. Não são necessariamente modelos complementares entre si nem concordam nos métodos de representação do tumor. Para compreendermos a razão de ser deste imenso zoológico de modelos, o primeiro passo será entender que tipos diferentes existem, em que princípios físicos se baseiam e quais as suas aplicações. Este artigo dará um passo nesta direcção.

Assim, irei apresentar diferentes maneiras de abordar o crescimento de tumores através da modelação teórica. Em particular, na secção 2 irei descrever em mais detalhe alguns modelos que se inspiram nas propriedades fractais da superfície tumoral, que prevêem a dinâmica da interface tumor/células saudáveis e outros que tratam células tumorais individualmente, descrevem as suas mutações e a sua adaptação ao meio envolvente. Na última secção discutirei a contribuição destes modelos para a melhor compreensão da dinâmica tumoral e quais os passos futuros nesta área de investigação.

## Modelos aplicados à dinâmica tumoral

### Fractais e Tumores

Num tumor sólido o limite espacial da região tumoral é o local da interface entre células tumorais e células saudáveis, ou seja, a superfície do tumor. Um modelo que descreva a evolução desta superfície no tempo conseguirá prever a evolução do crescimento tumoral no paciente. Os conhecimentos sobre o crescimento estocástico de superfícies em diversas áreas da física foi utilizado para medição e análise das propriedades fractais da superfície tumoral. Por exemplo em [2] Brú et al tentam identificar a classe de universalidade da dinâmica tumoral. De acordo com este trabalho, superfícies que crescem por epitaxia por feixe molecular (*molecular beam epitaxy*, MBE) possuem os mesmos expoentes de crescimento que a superfície de um tumor (se bem

que este ponto é debatido por outros [3]). Assim, a equação que descreve a evolução de superfícies em MBE poderá ser aplicada ao crescimento tumoral. Se bem que bastante polémico e não aceite pela comunidade oncológica, o trabalho de Brú tem o condão de aplicar de uma forma quase heurística princípios de crescimento de superfícies num contexto tumoral. Baseado nos seus estudos, Brú chega a propor estratégias terapêuticas controversas baseadas na presença de “pontos barreira” (*pinning points*) na superfície [4].

### Modelos Contínuos: Multi-fase e Interface Difusa

O que falta obviamente ao tipo de modelos anteriormente descrito são fundamentos biológicos e físicos que justifiquem a dinâmica da superfície observada. Para isso será necessário partir de um maior conhecimento do sistema. Uma das principais correntes de modelação tumoral neste sentido é a de modelos multi-fase (Fig. 1). Nestes, o tecido tumoral é interpretado como uma mistura heterogênea constituída por diferentes fases. Células tumorais, células

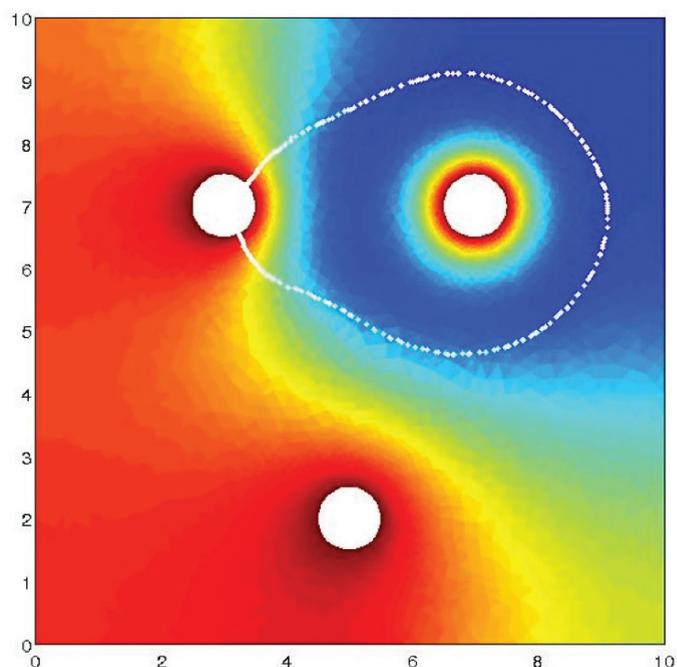


Fig. 1 - Modelo multi-fase descrevendo um tumor (interface marcada com linha branca) que rodeia uma artéria (círculos brancos). Tumor cresce na direcção de uma segunda artéria. Cores representam densidade de nutrientes [5]. Com permissão de Springer Science+Business Media, Journal of Mathematical Biology, “Multiphase modelling of tumour growth and extracellular matrix interaction: mathematical tools and applications”, Vol. 58 (2009), Pág. 625, Preziosi e Tosin.

saudáveis e a matriz extra-celular constituem, por exemplo, diferentes fases cuja evolução é simulada usando teoria de misturas. Assim, cada uma das fases obedece a relações constitutivas que relacionam a pressão e a composição num determinado ponto, com a velocidade dos componentes da fase e/ou a acumulação de energia elástica no sistema. A taxa de proliferação das diferentes células é implementada como uma função da pressão local e da concentração de nutrientes. Depois de se escreverem estas relações para cada uma das fases, é utilizado outro conjunto de equações para prever a evolução do sistema, que implementam a conservação local de massa dos diferentes componentes e dos momentos linear e angular. Pode ser visto em [5], por exemplo, uma derivação cuidadosa das equações de uma descrição multi-fase de um tumor.

Este tipo de modelos necessita um número bastante elevado de hipóteses sobre os diferentes tipos de células e de como formam agregados. É esta grande variedade de escolha dos detalhes a incluir no modelo (visco-elasticidade, zona necrótica dos tumores como uma fase extra, matriz extra-celular, vasos sanguíneos e linfáticos, diferentes tipos de tecido, anisotropia dos tecidos celulares, etc.) que está na origem tanto da grande variedade de modelos na literatura como da elevada plasticidade deste tipo de modelos. Podem ser directamente incluídos no modelo tanto alguns processos que ocorrem ao nível celular, como proliferação ou morte celular (por falta de nutrientes ou por morte programada, ou apoptose), assim como características globais de um determinado tecido, como o seu módulo de Young ou coeficientes de resistência à passagem de líquido intersticial.

O crescimento do aglomerado celular é função da distribuição de nutrientes no tecido onde cresce o tumor, a qual é também por vezes controlada pelo tumor, graças a proteínas que ele segrega e que levam ao desenvolvimento de novos vasos sanguíneos na sua vizinhança. Esta relação entre o tumor e a rede vascular é parte integrante de modelos multi-fase de tumores em estágios avançados do seu crescimento.

Modelos de multi-fase podem ser simplificados no contexto de crescimento tumoral. A partir de um determinado modelo de multi-fase, pode-se obter analiticamente as equações que descrevem a dinâmica da superfície tumoral. O formalismo normalmente utilizado neste caso é o de modelos de interface difusa (também designados por *phase-field*, Fig. 2),

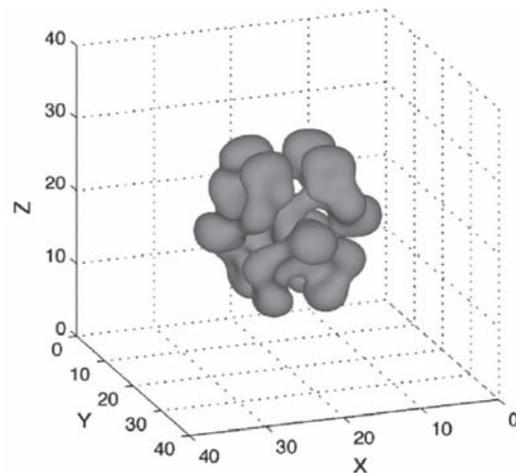


Fig. 2 - Modelo de interface difusa de um tumor na sua fase avascular (antes de recrutar a sua própria rede capilar). Este modelo descreve as instabilidades na superfície do tumor devido a termos não lineares [7,10]. Com permissão de Elsevier Limited, Journal of Theoretical Biology, "Three-dimensional multispecies nonlinear tumor growth-II: Tumor invasion and angiogenesis", Vol. 264 (2010), Pág. 1254, Hermann B. Frieboes, Fang Jin, Yao-Li Chuang, Steven M. Wise, John S. Lowengrub e Vittorio Cristini.

onde o interior de cada domínio (tipo de tecido neste caso) é descrito da forma mais simples possível, tendo em consideração que a dinâmica das interfaces é mantida<sup>1</sup>. A modelação de interface difusa é correntemente utilizada em diversos modelos de crescimento tumoral [6,7].

Apesar de alguns parâmetros incluídos em modelos multi-fase poderem ser medidos experimentalmente, para muitos outros não existem dados experimentais. Este é um dos pontos onde a interacção entre a modelação e a medicina molecular pode desempenhar um papel muito importante. Até recentemente, experiências têm vindo a ser concebidas com vista à descoberta de novos mecanismos usados pelas células tumorais sobre os quais podemos actuar. Em paralelo, a modelação impulsiona a realização de um novo tipo de experiências que têm como objectivo a quantificação de grandezas físicas e biológicas que são necessárias para os modelos de crescimento tumoral. Esta estratégia leva sem dúvida a um conhecimento mais completo sobre os fenómenos físicos que desempenham um papel importante no desenvolvimento de uma massa tumoral.

<sup>1</sup> O nome desta técnica vem do facto das interfaces terem uma espessura  $\epsilon \neq 0$ , de modo a facilitar o cálculo computacional de derivadas de diversas quantidades na direcção perpendicular às interfaces. A aproximação é válida desde que o raio de curvatura local da interface seja muito maior do que a sua espessura.

### **Modelos Discretos: Potts Celular e Dinâmica de Populações**

Até agora foram apresentados modelos que tentam descrever directamente a superfície do tumor ou cada tipo de tecido como um todo. Outra estratégia é começar ao nível celular. Ora, as células são extremamente complexas e será bastante difícil conseguir implementar todos os mecanismos que nelas ocorrem. O primeiro passo para criar um modelo discreto de desenvolvimento tumoral é, partindo de toda a complexidade (proliferação, apoptose, movimento das células na direcção de gradientes de diferentes factores, adesão a outras células, deformação celular, consumo de nutrientes, produção de ácido láctico, interacção com o sistema imunitário, etc.), escolher os mecanismos a modelar que estejam especialmente relacionados com o estágio de crescimento tumoral de interesse.

No início de um tumor, uma grande relevância terá de ser dada à influência de mutações na proliferação e sobrevivência das células. Para estágios mais tardios, o movimento das células como resposta à concentração local de diversos factores de crescimento torna-se muito importante.

Os dados experimentais para este tipo de modelos são bastante difíceis de conseguir, visto que só nos últimos anos se tornou possível medir quantitativamente a concentração de proteínas no interior de cada célula.

Existe uma variedade muito grande de modelos discretos para a evolução tumoral. Um tipo de modelo discreto bastante utilizado é o modelo de Glazier e Graner (ou modelo de Potts celular, Fig. 3) [1,8]. O modelo de Potts é semelhante ao modelo de Ising usado para descrever materiais ferromagnéticos: a cada ponto de uma rede é associado um de  $n$  estados<sup>2</sup>. A energia é mínima se cada ponto estiver no mesmo estado que os pontos vizinhos, o que em geral não é possível. No modelo de Glazier e Graner, para além desta interacção a curta distância, existe uma penalização energética quando cada domínio (célula) tem um volume e/ou uma área de superfície diferente dos seus valores de equilíbrio. Assim, o modelo consegue obter domínios que tentam manter a sua forma e que conseguem responder a forças de compressão ou de extensão.

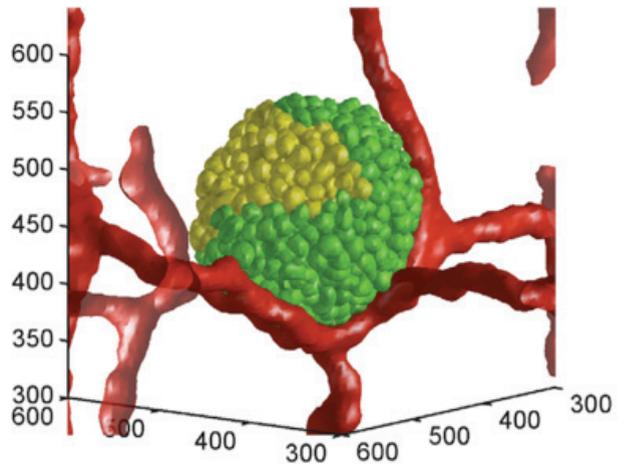


Fig. 3 - Grupo de células tumorais, simuladas através do modelo de Potts celular, e os capilares que as alimentam (a amarelo estão identificadas as células em hipóxia) [8].

Resumindo, o modelo de Potts celular utiliza princípios de minimização de energia para dividir o espaço em pequenas regiões (correspondentes às células) que podem ter diferentes maneiras de responder ao meio envolvente. Este é um formalismo bastante plástico e daí a grande quantidade de literatura onde diferentes aspectos do crescimento tumoral são estudados tendo este modelo como base.

Um aspecto essencial no desenvolvimento de diversos tumores é a adaptabilidade das suas células a diferentes circunstâncias, como, por exemplo, a novos ambientes citotóxicos. A proliferação desregulada num tumor leva a uma taxa elevada de mutações e, conseqüentemente, a uma grande adaptabilidade da colónia ao seu meio envolvente. Num conjunto de células tumorais existem na realidade diversos grupos com fenótipos distintos e que respondem de maneira diferente ao ambiente local.

Para implementar esta perspectiva num modelo tumoral, investigadores integram, em modelos discretos de tumores, dinâmica de populações sujeitas a uma pressão evolutiva [9]. Mais uma vez se verifica que a modelação de tumores não é somente interdisciplinar no facto de envolver especialistas de diversas disciplinas, como também o é na diversidade de técnicas de modelação que recruta.

### **Modelos Híbridos**

Verificámos que modelos contínuos permitem uma descrição de tumores macroscópicos e, mesmo assim, têm

<sup>2</sup> No modelo de Ising  $n = 2$ , enquanto que no modelo de Glazier e Graner,  $n$  é igual ao número de células a simular.

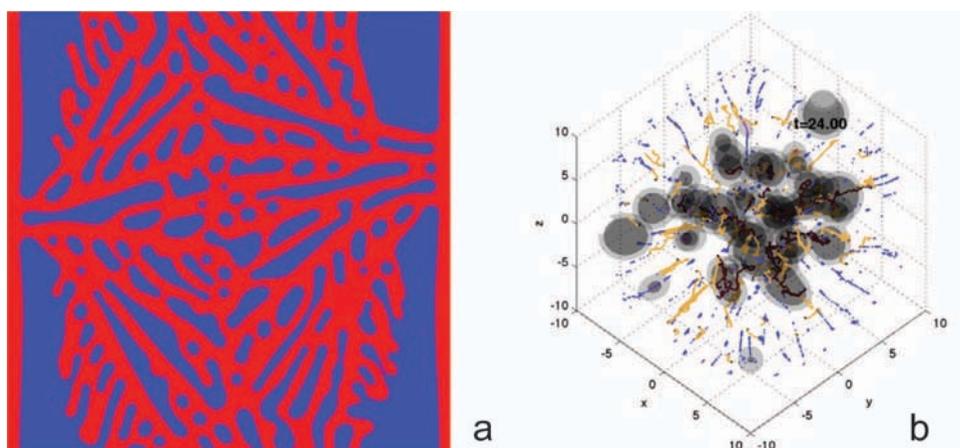


Fig. 4 - (a) Modelo híbrido descrevendo o crescimento de capilares num tecido tumoral. A parte contínua é modelada através do método de interface difusa [6]. (b) Modelo híbrido de um tumor sólido na fase vascular. Em zonas onde a densidade de células é baixa, estas são individualizadas (a azul no diagrama, zonas densas a cinzento). Este tipo de modelo permite descrever a invasão de tecido são através de células individuais. Novos capilares representados a amarelo e a castanho [10]. Com permissão de Elsevier Limited, Journal of Theoretical Biology, "Three-dimensional multispecies nonlinear tumor growth-II: Tumor invasion and angiogenesis", Vol. 264 (2010), Pág. 1254, Hermann B. Friboes, Fang Jin, Yao-Li Chuang, Steven M. Wise, John S. Lowengrub e Vittorio Cristini.

tipicamente menos parâmetros do que modelos discretos (devido ao grande detalhe dos processos incluídos nestes últimos). Por outro lado, muitos processos, como mutações ou metástase, necessitam uma descrição ao nível celular. Assim, foram desenvolvidos vários modelos híbridos que integram modelação contínua e discreta em diferentes regiões do sistema, dependendo da estratégia que localmente melhor modela os fenómenos que estão a ocorrer (Fig. 4) [1,6,10]. Modelos híbridos conseguem aproveitar o melhor de dois mundos, permitindo simulações multi-escala de um tumor macroscópico capazes de poderem ser comparadas directamente com a situação *in vivo*. A grande complexidade destes modelos, por outro lado, põe novos desafios à modelação e implementação computacional. Outro desafio é desenvolver modelos híbridos parametrizáveis a partir de análises que possam ser feitas a pacientes num hospital.

## Conclusão

Foram apresentados diversos tipos de modelos utilizados correntemente para simular um tumor. O que se pretende com todos estes modelos, é compreender melhor o fenómeno de forma a actuar sobre o seu desenvolvimento. Os modelos ajudarão a decidir qual a melhor estratégia para controlar o crescimento tumoral para cada paciente em particular.

Esta nova linha de investigação leva especialistas de diferentes áreas (médicos, biólogos moleculares, químicos, físicos, matemáticos) a desenvolver uma linguagem comum e a trabalhar em ambientes interdisciplinares com o mesmo objectivo. Novos métodos experimentais serão implementados, assim como serão desenvolvidas novas técnicas de modelação computacional.

Tumores sólidos são sistemas altamente complexos nos

quais vários processos biológicos e físicos têm um papel importante. Modelos como os apresentados conseguem integrar vários aspectos deste complexo puzzle, explorando a relação entre eles.

Actualmente alguns modelos conseguem prever correctamente distribuições de tensões num tumor e também descrever o colapso de vasos sanguíneos. Recentemente o acompanhamento de pacientes com tumores cerebrais (neurogliomas) através de simulações computacionais tem ajudado a entender como parametrizar uma simulação para que esta possa ser aplicada a um paciente específico. No entanto, apesar de todo o esforço e por causa da elevada complexidade do problema, a capacidade de previsão dos modelos computacionais de tumores *in vivo* é em geral bastante baixa, e bastante mais trabalho há a fazer nesta área de forma a melhorar este aspecto.

No entanto os resultados existentes demonstram a indiscutível capacidade de modelos teóricos sugerirem hipóteses relevantes quanto ao papel de diversos factores nos processo de modelação tumoral. Sublinha-se portanto a necessidade de uma colaboração entre modelação teórica, imagiologia e técnicas de biologia molecular para melhorar a compreensão, diagnóstico, acompanhamento e terapêutica do desenvolvimento de um tumor.

## Agradecimentos:

À Fundação para a Ciência e Tecnologia e à Fundação Calouste Gulbenkian pelo seu apoio financeiro através dos programas *Ciência 2007* e *Estímulo à Investigação*, respectivamente.

1. J. S. Lowengrub *et al.*, "Nonlinear modelling of cancer: bridging the gap between cells and tumours", *Nonlinearity* 23, R1 (2010).
2. A. Brú *et al.*, "The universal dynamics of tumor growth", *Biophys. J.* 85, 2948 (2003).
3. C. Escudero, "Dynamical scaling of non-euclidean interfaces", *Phys. Rev. Lett.* 100, 116101 (2008).
4. A. Brú, D. Casero, "The effect of pressure on the growth of tumour cell colonies", *J. Theor. Biol.* 243, 171 (2006).
5. L. Preziosi, A. Tosin, "Multiphase modelling of tumour growth and extracellular matrix interaction: mathematical tools and applications", *J. Math. Biol.* 58, 625 (2009).
6. R. D. M. Travasso, M. Castro, J. C. R. E. Oliveira, "Phase-field model in tumor growth", *Philosophical Magazine* 91, 183-206 (2011).
7. S. M. Wise *et al.*, "Three-dimensional multispecies nonlinear tumor growth-I: Model and numerical method", *J. Theor. Biol.* 253, 524 (2008).
8. A. Shirinifard *et al.*, "3D multi-cell simulation of tumor growth and angiogenesis", *PLoS One* 4, e7190 (2009).
9. A. Sottoriva *et al.*, "Cancer stem cell tumor model reveals invasive morphology and increased phenotypical heterogeneity", *Cancer Res.* 70, 46 (2010).
10. H. B. Friboes *et al.*, "Three-dimensional multispecies nonlinear tumor growth-II: Tumor invasion and angiogenesis", *J. Theor. Biol.* 264, 1254 (2010).



### Rui Travasso

licenciou-se em 1999 em Física pela Universidade do Porto. Em 2003 obteve o seu doutoramento pela Universidade de Manchester em Física Teórica da Matéria Condensada. Nos seguintes três anos realizou um pós-doutoramento na Universidade de Pittsburgh onde estudou a formação de padrões hierárquicos em misturas de polímeros. Começou a trabalhar em problemas relacionados com a Biologia em 2006,

re- na Universidade de Lisboa, debruçando-se sobre os mecanismos de enrolamento de proteínas. É actualmente investigador auxiliar no Centro de Física Computacional da Universidade de Coimbra, onde participa e coordena projectos que requerem o desenvolvimento de modelos computacionais para descrever o enrolamento de proteínas, o crescimento de tumores e de capilares, assim como a separação de fases em ligas metálicas.

# Hexágonos, carbono

## e o Prémio Nobel da Física de 2010

N. M. R. Peres\*  
J. M. B. Lopes dos Santos\*\*

\* Departamento de Física e CFUM, Universidade do Minho, 4710-057 Braga

\*\* CFP e Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 4169-007, Porto

**Edwin Abbot, no romance “Flatland: A Romance of Many Dimensions”, criou um mundo abstracto bidimensional habitado por polígonos; a novela é uma crítica à sociedade e cultura Vitorianas. Nesse mundo abstracto a duas dimensões, os hexágonos, embora pertencentes à nobreza, ocupam o nível mais baixo dessa classe social. Ora todos sabemos que não existem mundos bidimensionais povoados por hexágonos.**

E, contudo, a Real Academia Sueca das Ciências distinguiu com o Prémio Nobel da Física de 2010 um mundo bidimensional povoado apenas por hexágonos em cujos vértices residem átomos de carbono, elevando, deste modo, aquele polígono ao mais alto estrato da nobreza dentro das ciências físicas.

Os laureados com o Prémio Nobel da Física de 2010 são os Professores André Geim e Kostantin Novoselov (ver Figura 1), da Universidade de Manchester, no Reino Unido. A citação relativa à atribuição do prémio é:

*“For groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene”*

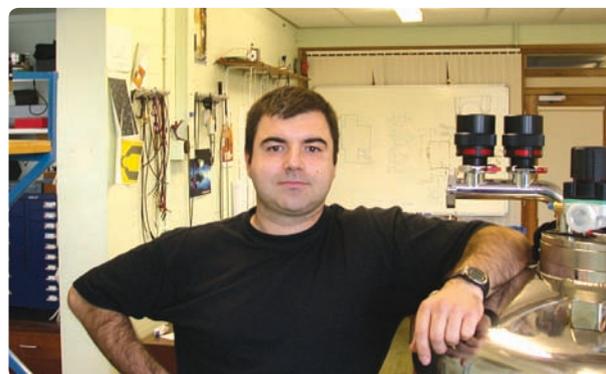


Fig. 1 - De cima para baixo: Kostantin Novoselov e Andre Geim no Laboratório de medidas de magneto-transporte a baixas temperaturas onde foi descoberto o efeito de Hall quantificado quiral, também dito semi-inteiro. (As fotografias são cortesia de Andre Geim e Kostantin Novoselov.)

O que é, então, o grafeno? Esta nova forma de carbono puro consiste numa rede de hexágonos cujos vértices são ocupados por átomos de carbono. Ou seja, o grafeno é uma folha de espessura atômica – da espessura de um único átomo, tornando real o mundo imaginado por Abbot. Na figura 2 representa-se a rede hexagonal do grafeno. A distribuição electrónica do carbono é  $[C]= 1s^2 2s^2 2p^2$ . As orbitais atômicas  $2s$ ,  $2p_x$  e  $2p_y$  hibridizam entre si formando três orbitais planares  $sp^2$ , as quais fazem ângulos de  $120^\circ$  entre elas; as ligações covalentes que se estabelecem entre essas orbitais determinam a estrutura hexagonal da rede. A hibridização entre as orbitais  $p_z$  dá origem às bandas de valência e condução do grafeno,  $\pi$  e  $\pi^*$ , onde pode ocorrer o transporte de carga.

Este sistema é o sólido mais fino que alguma vez a Natureza produzirá. Na verdade, antes de Geim e Novoselov terem, em 2004, isolado e medido um cristal de grafeno, os físicos não acreditavam que um cristal pudesse existir a duas dimensões: em *Flatland* a ordem cristalina deveria ser impossível. Felizmente, a Natureza não para de surpreender os seus mais sábios inquiridores.

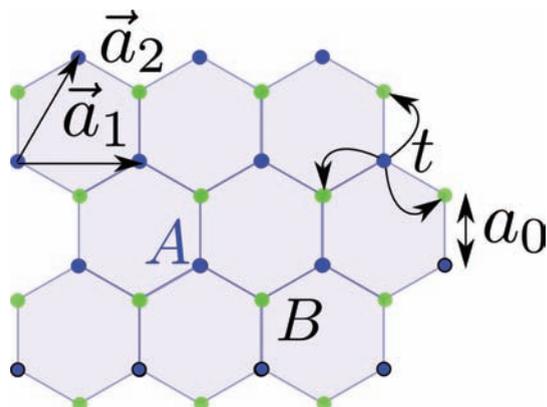


Fig. 2 - Rede hexagonal do grafeno. Em cada vértice de um hexágono existe um átomo de carbono. Do ponto de vista das translações que deixam a rede invariante, os átomos de carbono etiquetados com as letras *A* e *B* não são equivalentes. Os electrões podem mover-se entre carbonos dentro das orbitais  $\pi$ , que existem numa banda contínua de energia de largura  $6t$  em que  $t=2.7$  eV.

O método original de produção de grafeno é tão simples que chega a parecer ingénuo (na verdade é engenhoso). O carvão é um material que consiste no empilhamento de um número gigantesco destes planos de hexágonos, sendo produzido pela Natureza ao longo de milhões de anos, a partir de matéria orgânica, por processos fisico-químicos muito lentos. A grafite tem a mesma estrutura atômica que o carvão, diferindo do carvão apenas no modo como é produzida.

A equipa liderada por Andre Geim conseguiu remover de um cristal de grafite uma única camada hexagonal. Como? Simplesmente usando fita-cola

para esfoliar a superfície da grafite, um pouco como quem depila as pernas usando cera. Bocados de grafite ficam agarrados à fita-cola, tal como os pelos no caso da cera, quando se esfolia a superfície da grafite. Depois, pressionase a fita-cola numa placa de vidro, e (com muita paciência) procura-se entre os resíduos de grafite, a maior parte dos quais são de muitas camadas, um que corresponda a uma única camada. O grande avanço do grupo de Geim foi demonstrar que essa identificação era possível, visualmente, com um microscópio óptico. Com alguma persistência encontram-se mono-camadas de grafeno (ou seja, um único plano) tão grandes como a que se mostra na Figura 3. Em nanotecnologia, este tipo de procedimento, consistindo em partir da macro-escala para nano-escala, é conhecido na literatura como *top-down approach*.

As propriedades eléctricas, químicas e mecânicas do grafeno revelaram-se tão apetecíveis, que a procura de métodos de produção de larga escala evoluiu a uma velocidade espantosa. Recentemente, foi descoberto um novo e eficiente método químico de produzir folhas de espessura atômica com cerca de 50 cm de lado, a partir da decomposição de gases ricos em carbono. Essa decomposição ocorre na presença de cilindros de cobre aquecidos. Após a decomposição dos gases, os átomos de carbono reorganizam-se à superfície do cilindro de cobre formando uma folha de grafeno de tamanho macroscópico. Que tal soa termos nas nossas mãos uma folha de 50 cm de lado de um átomo de espessura? [1]

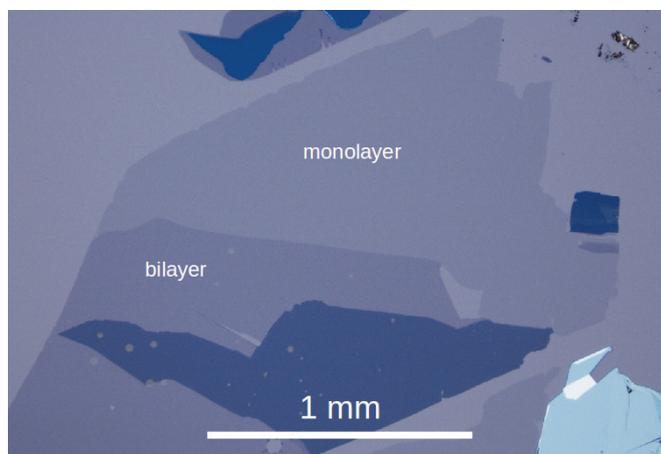


Fig. 3 - Um plano, ou monocamada, de grafeno, ao lado de dois planos, ou bicamada, do mesmo material. A zona mais escura corresponde muitos planos de grafeno empilhados. (A imagem é cortesia de Peter Blake da Universidade de Manchester.)

Vejam, agora, os motivos que levaram a Real Academia Sueca das Ciências a distinguir com o Prémio da Física de 2010 Andre Geim e Konstantin Novoselov pelas suas investigações em grafeno. No testamento de Alfred Nobel, disponível no portal da rede da Fundação Nobel, a física é a primeira a ser citada. Alfred Nobel tornou claro a quem se destinava a distinção do prémio:

*"The whole of my remaining realizable estate shall be dealt with in the following way (...) distributed in the form of prizes*

to those who, during the preceding year, shall have conferred the greatest benefit on mankind.”

A pergunta ocorre com naturalidade: quais os benefícios que o grafeno trouxe, ou trará ainda, à humanidade? Hoje em dia, o significado da palavra “benefícios” é abrangente, pois inclui quer aplicações práticas, quer avanços significativos no conhecimento, mesmo que estes não estejam directamente ligados a aplicações. Na verdade, este conceito mais lato está já presente no testamento de Alfred Nobel: “...important discovery or invention...”.

No caso do grafeno encontramos os dois mundos reunidos: o do avanço do conhecimento em áreas virgens da Natureza e o das aplicações úteis para a vida das pessoas, decorrentes das investigações fundamentais. Do ponto de vista da Física fundamental o aspecto mais extraordinário surpreenderia até Edwin Abbot; numa *flatland* de hexágonos, os electrões comportam-se como se tivessem perdido toda a sua massa em repouso, ou seja, estão no chamado regime ultra-relativista.

É conhecido dos estudantes da disciplina de Física do 12º ano das escolas secundárias que a energia da partícula livre, de acordo com a Teoria da Relatividade Restrita, é dada por  $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$ , onde  $p$  e  $m$  são o momento e a massa da partícula, respectivamente, e  $c$  a velocidade da luz. Em física de partículas, o regime ultra-relativista corresponde à situação em que a energia total é muito superior à energia da massa em repouso, isto é  $pc \gg mc^2$ , tendo-se, portanto,  $E \approx pc$ . Ora, a energia da massa em repouso de um electrão é meio milhão de electrões-volt (0.5 MeV) e a energia cinética dos electrões no grafeno não passa de 1 eV. Contudo a energia dos electrões no grafeno tem a forma,  $E \approx p v_F$  ou seja, tem a forma da energia da partícula livre da teoria de Einstein se colocarmos a massa do electrão igual a zero,  $m=0$ , e trocarmos a velocidade da luz por uma velocidade trezentas vezes menor,  $v_F = c/300$ . É por este motivo que se diz que os electrões no grafeno têm massa nula. Que isto é realmente verdade foi comprovado nas inúmeras experiências levadas a cabo por Andre Geim e Konstantin Novoselov, e pelas de muitos outros investigadores.

Nunca antes havia ocorrido aos físicos que, num sistema de estado sólido, em cima de uma bancada, sem aceleradores tão caros que nenhum país do mundo os pode construir sozinho, os electrões perdessem magicamente a sua massa. Foi necessário calcular todo um conjunto de propriedades electrónicas e ópticas de um tal sistema electrónico, uma vez que não havia artigos ou livros que tivessem contemplado electrões com um comportamento tão singular.

As aplicações utilitárias do grafeno são também inúmeras, algumas já em processo de fabrico industrial. A atribuição do Prémio Nobel, em tempo muito curto – cerca de seis anos desde a descoberta do grafeno – a André Geim e Konstantin Novoselov, premeia quer o avanço do conhecimento em física fundamental quer, como Alfred Nobel deixou escrito, o facto do material prometer muitas e variadas aplicações que beneficiarão a humanidade. As aplicações

do grafeno resultam de uma combinação única de propriedades: (i) a geometria bi-dimensional, da espessura de um átomo; (ii) o carácter livre da estrutura, que não tem de estar confinada no interior de um dispositivo sólido, o que permite a manipulação mecânica e química do material, de modo a realizar certas funções; (iii) e propriedades electrónicas, ópticas, térmicas e mecânicas que mais nenhum material possui. Com esta combinação de propriedades a imaginação parece ser o limite. Há quem tenha sugerido novas facas, com lâminas de grafeno, para preparar sushi, a famosa iguaria japonesa à base de peixe cru. O leitor ajuizará do potencial desta proposta. Mas, numa nota mais realista, que exemplos poderemos dar de possíveis aplicações do grafeno?

- **Novos painéis tácteis** (*touch-screens*) para monitores de computadores e aparelhos de comunicação móvel. Um novo e recente método de produção de grafeno, como acima se notou, permite produzir folhas deste material de cerca de 50 cm de largura. Como o grafeno é transparente e metálico, torna-se claro que pode ser usado para produzir monitores que requerem eléctrodos transparentes. Como é flexível e não quebra com facilidade trará mais durabilidade aos monitores desses aparelhos. Como a sua produção é muito mais barata que os óxidos transparentes de índio e titânio usados hoje em dia, trará uma diminuição do preço das tecnologias associadas, aspecto que será muito apreciado, particularmente nos tempos de aperto financeiro que se anunciam.

- **Células solares.** As células solares necessitam de eléctrodos transparentes à luz, numa larga gama de frequências. A transparência, a flexibilidade, a resistência às deformações e o facto de ser metálico, tornam o grafeno um excelente material para os eléctrodos transparentes neste tipo de dispositivos.

- **Detectores de radiação,** quer para antenas de uso militar quer para sistemas de vigilância em aeroportos, e polarizadores de banda larga em fibras ópticas. Ambas estas aplicações são baseadas nas propriedades ópticas do grafeno e no facto deste material não ter um hiato de energia entre as bandas de valência e condução.

- **Sensores de pequenas quantidades de certos tipos de moléculas** em ambientes fechados, como sejam os casos de laboratórios químicos ou bioquímicos. A condutividade eléctrica do grafeno é muito sensível ao tipo de moléculas que se ligam à sua superfície, pelo que se poderão conceber detectores para espécies químicas específicas. Este tipo de nariz para gases tem o seu poder olfactivo muito aumentado quando a superfície do grafeno é funcionalizada com ADN.

- **Sensores de deformação.** A condutividade eléc-

trica do grafeno depende do estado de deformação do material. Este sustenta deformações até 20% sem quebrar e sem comportamento plástico. É concebível a incorporação em estruturas de sensores baseados em grafeno, para monitorizar os estados de deformação das mesmas [2].

- **Sequenciação das bases que constituem o ADN.** Produzindo pequenos orifícios numa membrana de grafeno e fazendo passar por esse orifício moléculas de ADN, mostrou-se, pelo menos em princípio, que a corrente eléctrica por tunelamento quântico através do orifício, ou corrente iónica associada às soluções separadas pela membrana de grafeno, dependendo do tipo de montagem experimental, poderá ser sensível ao tipo de base, das quatro que constituem o ADN [3].

- **Definição do padrão de resistência eléctrica,** a chamada constante de Klitzing ( $R_K = h/e^2$ ), recorrendo ao efeito de Hall quantificado semi-inteiro. Esta é, portanto, uma aplicação na área da metrologia [4].

Finalmente, quem são André Geim e Kostantin Novoselov? São físicos para os quais o gozo está na compreensão dos mistérios da Natureza. Não têm medo de investir tempo que projectos que podem muito bem falhar. Não ficam presos por toda a vida ao que em dado momento aprenderam a fazer, apenas acumulando publicações com a ferramenta que sabem usar. São pessoas extremamente exigentes consigo mesmos e com todos aqueles com quem colaboram. São pessoas muito generosas, de fino humor e com quem se passa um almoço em agradável companhia.

Kostantin Novoselov gosta de Porto *Vintage* e recebe o Prémio Nobel por trabalhos de investigação que realizou enquanto investigador de pós-doutoramento.

André Geim gosta de lagostins, do Manchester United, de Cristiano Ronaldo (pelo menos quando jogava no Manchester), de mergulho aquático e de escalar montanhas, sendo o primeiro físico a acumular os Prémios Ig-Nobel (2000), por fazer levitar sapos vivos num campo magnético, e Nobel (2010) pelas suas investigações no grafeno. O prémio Ig-Nobel é atribuído a trabalhos científicos que fazem as pessoas rir primeiro e pensar depois (*make people laugh first and think second*).

Como última nota, que esta descoberta estimule e motive os estudantes do Ensino Secundário a escolherem o estudo da Natureza, isto é a Física, como área de formação superior. Ao fim e ao cabo o Prémio Nobel está ao alcance de um bocado de carvão e de uma fita-cola!

1. Sukang Bae *et al.*, "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes", *Nature Nanotechnology* 5, 574 (2010).
2. A este propósito, ver o artigo de André Geim e Konstantin Novoselov em <http://arxiv.org/abs/1010.1072>.
3. Hagan Bayley, "Holes with an edge", *Nature* 467, 164 (2010).
4. Alexander Tzalenchuk *et al.*, "Towards a quantum resistance standard based on epitaxial graphene", *Nature Nanotechnology* 5, 186 (2010).

#### Para saber mais:

K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva e A. A. Firsov, "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *Science* 666, 306 (2004).  
A. H. Castro Neto, F. Guinea e N. M. R. Peres, "Drawing conclusions from graphene", *Physics World* 11, 33 (2006).  
A. K. Geim e K. S. Novoselov, "The rise of graphene", *Nature Materials* 6, 183 (2007).  
A. K. Geim e A. H. MacDonald, "Graphene: Exploring carbon flatland", *Physics Today* 60, 35 (2007).  
A. K. Geim e Philip Kim, "Carbon wonderland", *Scientific American* 298, 68 (2008).  
A. K. Geim, "Graphene: Status and Prospects", *Science* 324, 1530 (2009).  
N. M. R. Peres, "Graphene, new physics in two dimensions", *Europhysics News* 40, 17 (2009).  
A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov e A. K. Geim, "The electronic properties of graphene", *Reviews of Modern Physics* 81, 109 (2009).  
N. M. R. Peres, "Colloquium: The transport properties of graphene: An introduction", *Reviews of Modern Physics* 82, 2673 (2010).



#### Nuno M. R. Peres

é Professor Associado do Departamento de Física da Universidade do Minho. A sua área de investigação é em teoria das propriedades ópticas e electrónicas de sistemas de matéria condensada. Tem vindo a trabalhar na física do grafeno desde Janeiro de 2005.

#### João Lopes dos Santos

é Professor Associado de Física no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências, Universidade do Porto. Fez o seu curso na Universidade do Porto e doutorou-se em Física Teórica da Matéria Condensada no Imperial College da Universidade de Londres. É membro do Centro de Física do Porto e tem um enorme prazer e orgulho em ser Físico.



# Eu e Stephen Hawking

Jim Al-Khalili

**Apresentar a uma plateia o cientista mais famoso do mundo é emocionante, mas ainda mais excitante é fazê-lo no Royal Albert Hall em Londres. Pois foi exactamente isso que eu tive de fazer há poucas semanas. O cientista em causa era, naturalmente, Stephen Hawking e, tal como acontece com as grandes estrelas do espectáculo, todos os 5500 bilhetes foram vendidos, e três vezes mais bilhetes teriam sido vendidos, se os houvesse.**

Tratava-se de uma palestra pública rara e especial: a promoção do seu novo livro “A grande criação”<sup>1</sup>. Antes, eu tinha trocado emails com Hawking através do seu PA e tinha perguntado sobre o conteúdo da palestra, e se ele planeava falar do que pensava sobre a existência de Deus — assunto que tinha sido divulgado nos media algumas semanas antes. Ele pediu-me se seria possível eu dizer algumas palavras esclarecendo a sua posição sobre este assunto, de modo a estar livre para se focar no que era de facto o assunto da palestra: a sua vida, a sua carreira, e a física que tinha ajudado a desenvolver.

Eu fiquei mais que feliz por satisfazer-lhe o pedido: acordei com ele fazer a seguinte declaração: “Stephen Hawking nunca defendeu que Deus não existe. Para ele, e esta é uma visão que também partilho, Deus é o nome que as pessoas dão à razão de estarmos aqui. Para ele, essa razão são as leis da física (ou leis da Natureza), em vez de um poder sobrenatural com quem possamos ter uma relação pessoal”.

Depois da minha apresentação, dei o lugar no palco a Stephen para que começasse a sua palestra. O que se seguiu foram oitenta minutos notáveis. Não tanto por aquilo que ele disse, mas porque quinhentas pessoas, não especialistas, ficaram como que hipnotizadas ao longo de uma palestra sobre tempo imaginário, singularidades do espaço-tempo, e teorias de unificação multidimensional. Certamente não terão seguido ou entendido a maior parte do que foi dito, mas esse é o efeito que Hawking tem sobre qualquer um. Pela mesma razão que milhões compram os seus livros, esta plateia estava contente por simplesmente estar na presença deste homem excepcional. De qualquer forma, a palestra foi altamente profunda, comovente e fascinante.

Depois de ele acabar tive que regressar ao palco para ler algumas das questões postas pelo público. No entanto, eu



Cortesia de Jim Al-Khalili

sabia que ele necessitaria de um ou dois minutos para introduzir as respostas no computador. A enfermeira, que veio ao palco comigo, combinou dar-me um sinal quando ele estivesse pronto, e eu fiquei de dizer qualquer coisa como “ok, good”, e depois contar uma piada. Mas à última hora decidi em vez disso contar “A minha história com Hawking”. Esta história diz o seguinte:

Há muitos anos, assisti a uma palestra em Cambridge dada por Stephen e o seu colaborador de longa data, Roger Penrose. Era a quinta e última de uma série de palestras que eles deram alternadamente nessa semana. Eu tinha decidido só ir à palestra final. No fim, o *chairman* perguntou se alguém do numeroso público que estava presente tinha perguntas a fazer. Eu estava sentado no fundo da sala, mas o meu braço ergueu-se mais depressa que o de qualquer outra pessoa, e como fui imediatamente notado fui convidado a levantar-me e a perguntar a Stephen Hawking a minha questão. Não me lembro exactamente o que era — qualquer coisa sobre a entropia de um buraco negro, acho. De qualquer forma, eu não estava particularmente interessado na resposta, mas queria mais parecer esperto e poder vir a gabar-me de ter feito uma pergunta a Stephen Hawking! De qualquer modo, assim que fiz a pergunta, e como fui o primeiro e não tinha ido às palestras anteriores, não sabia qual era a convenção: deveria permanecer de pé enquanto Stephen compunha a sua resposta? Ou deveria sentar-me? Escolhi permanecer de pé, sentindo-me e parecendo envergonhado e desajeitado. Depois do que me pareceu uma eternidade, a voz do computador ressurgiu à vida: “Sim”, disse, “esse assunto foi explicado na segunda palestra”. Só desejei que o chão me engolisse nesse momento.

Foi esta a história que eu contei no Albert Hall e a multidão pareceu apreciar, e, espero, o Stephen também. Obtive o sinal da enfermeira, coloquei as questões, e Stephen respondeu-as. A multidão aplaudiu vivamente e toda a gente saiu feliz.

<sup>1</sup> S. Hawking e L. Mlodinow, “The Grand Design”, Bantam Books (2010)



**A Royal Society de Londres, ligada ao nome de Isaac Newton e de tantos outros físicos ilustres, está a celebrar os seus 350 anos, orgulhando-se de ser a academia científica mais antiga do mundo em funcionamento ininterrupto (outras mais antigas, como a Accademia dei Lincei, ligada a Galileu, estiveram parada muito anos, ou cessaram mesmo actividade). A sua divisa é, desde o início, “Nullius in verba”, em tradução livre “Não acredites na palavra das autoridades”.**

De facto, o pequeno grupo de sábios que se reuniu na capital da Grã-Bretanha em 1660 estava imbuído do espírito da Revolução Científica: o conhecimento sólido devia ser comprovado pela experiência.

Há uma *portuguese connection* na origem da Royal Society, pois essa sociedade só é real porque recebeu carta de privilégio do rei Carlos II, que era casado com a nossa Catarina de Bragança. Nos seus três séculos e meio de vida, a Royal Society admitiu apenas 25 sócios portugueses, o primeiro dos quais logo em 1668. A maior parte das entradas dos membros portugueses ocorreu, porém, no século XVIII, o tempo do Iluminismo tão bem simbolizado pela Biblioteca Joanina da Universidade de Coimbra, onde uma exposição evoca esses homens de ciência e cultura. Entre os nomes de maior destaque tem de se colocar João Jacinto Magalhães, o monge do Mosteiro de Santa Cruz que emigrou para Inglaterra porque não queria viver num

## Estrangeirados em Londres

Carlos Fiolhais

país onde faltava a liberdade. Ele foi, no século das luzes, um dos sábios que mais contribuiu para a expansão das ideias, ao relacionar-se com Watt, Priestley, Lavoisier, Volta, Franklin, etc. Para Portugal enviou alguns instrumentos científicos de sua concepção que hoje pertencem às colecções do Museu de Ciência da Universidade de Coimbra e estão patentes nessa exposição. Mas foi para Filadélfia, confiando no seu amigo Franklin, que enviou os guinéus para instituir o Prémio Magellan, um dos prémios científico-tecnológicos mais antigos do mundo e que, entre outros, distinguiu pioneiros do GPS.

Magalhães (descendente do famoso navegador) não foi o único “estrangeirado” que se distinguiu no século XVIII em terras britânicas. O Padre Teodoro de Almeida, que pode ser considerado o primeiro físico experimental assim como o primeiro divulgador científico em Portugal, também se exilou, precavendo-se do despótico regime pombalino. E o mesmo aconteceu com outro padre oratoriano, João Chevalier, astrónomo que chegou a presidir à Real Academia de Bruxelas. Almeida voltou para Portugal, ajudando a fundar a Academia de Ciências de Lisboa, mas o mesmo não aconteceu com Chevalier que ficou “estrangeirado” toda a vida.

Outro “estrangeirado” ficou conhecido como o “Newton português”: Bento de Moura Portugal, nascido em Moimenta da Serra, calcorreou durante anos a Europa, onde aprendeu a criar engenhos e obras hidráulicas. Tendo-se atrevido a regressar não escapou a um fim trágico: morreu nas prisões da Junqueira, em Lisboa, onde estava encarcerado às ordens do Marquês. É uma ironia da história que o Marquês de Pombal, diplomata em Londres antes de ser primeiro-ministro, tenha sido admitido na Royal Society escassos meses antes de Moura Portugal. Na exposição da Biblioteca Joanina, a ordem inverteu-se pois o visitante encontra primeiro Moura Portugal no piso intermédio, junto ao desenho da sua “máquina de fogo” publicada nas “Philosophical Transactions”, e só depois o Marquês, junto com os seus famosos “Estatutos da Universidade”, no piso inferior, no espaço que foi outrora Prisão Académica...

# Aconteceu

## PARTICIPAÇÃO PORTUGUESA NA OITAVA EDIÇÃO DA OLIMPIADA DE CIÊNCIA DA UNIÃO EUROPEIA EUSO 2010 (EUROPEAN UNION SCIENCE OLYMPIAD)

**Célia Henriques**

(mentora da Física na EUSO 2010)

Departamento de Física da FCT/UNL

A oitava edição da Olimpíada de Ciência da União Europeia decorreu entre 11 e 17 de Abril em Góteborg, na Suécia [1, 2]. Nesta competição, vários países europeus fazem-se representar por duas equipas de três elementos com idades inferiores a 16 anos. A EUSO tem um carácter marcadamente experimental e interdisciplinar [3, 4]. Cada equipa participante realiza duas provas experimentais subordinadas a um tema e que englobam tarefas complementares das áreas da Física, da Química e da Biologia. As equipas são acompanhadas por três mentores (um por cada uma das áreas) que participam na discussão das provas propostas pela organização, asseguram a tradução das versões finais das provas para a sua língua e verificam a avaliação das provas corrigidas.

A organização da participação portuguesa na EUSO 2010 foi assegurada conjuntamente pela Direcção Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular do Ministério da Educação, pela Sociedade Portuguesa de Física, pela Sociedade Portuguesa de Química e pela Ordem dos Biólogos [5]. Portugal participou pela segunda vez com as equipas vencedoras nas edições de 2009 das Olimpíadas da Física Escalão A e da Química Júnior. A preparação destas equipas decorreu na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e foi organizada em sessões por área disciplinar. As quatro sessões de preparação da área da Física abordaram os seguintes problemas experimentais: caracterização de um painel fotovoltaico, determinação do módulo de Young de um elástico de borracha, identificação de um gás por análise espectral na zona do visível e estudo de uma célula de combustível (PEM) – caracterização e eficiência nos modos de carga e de descarga. Os guiões [6] foram elaborados tentando seguir uma abordagem semelhante à das provas da competição.

Os temas das provas que integraram a EUSO 2010 foram a água e a investigação criminal. O primeiro tinha como cenário uma missão intergaláctica em busca de água e a prova estava dividida em quatro tarefas, denominadas: humidade relativa do ar, viscosidade da água, tensão superficial e biomecânica e dureza da água. A segunda prova visava reunir elementos que permitissem descobrir “quem matou Erik Lundberg” e estava dividida nas três tarefas: determinação da curva de arrefecimento de um cadáver, química forense e biologia forense. Ambas as provas estão também disponíveis

em português [6].

As classificações das equipas no conjunto das duas provas determinou a atribuição das 7 medalhas de ouro, 16 de prata e 19 de bronze. As equipas portuguesas não foram para além das medalhas de bronze. A melhor classificação da nossa representação foi conseguida pela equipa A com 68 pontos em 83 (cerca de 82%) na “prova forense”, marca igual ou superior à de mais oito equipas que arrecadaram uma medalha de prata! Com a melhor pontuação na competição ficou uma equipa da República Checa, sendo de destacar o desempenho das equipas alemãs com duas medalhas de ouro (segunda e quarta melhores pontuações da competição) [1].

A EUSO 2010 decorreu num ambiente em que foram promovidos a confiança (não houve medidas extremas de segurança) e o convívio entre os participantes. Para além do programa social, foram organizados, entre os mentores, grupos de discussão sobre o ensino das ciências experimentais. Uma visita que não posso deixar de destacar foi a efectuada ao laboratório de Microtecnologia e Nanociência - MC2 [7].

1. <http://www.chemsoc.se/sidor/KK/EUSO2010/index.htm>
2. <http://www.euso.dcu.ie/euso/home/index.htm>
3. Paul van Kampen, Wesley R Browne, Maurice Burke, Michael A Cotter, Paraic James, Enda McGlynn, Richard O’Kennedy, Philip Smyth and Gillian Whelan, “A new science competition for secondary school students: the First European Union Science Olympiad”, Eur. J. Phys. 25, 23-29 (2004).
4. Richard O’Kennedy, Maurice Burke, Paul van Kampen, Paraic James, Michael Cotter, Wesley R. Browne, Ciarán Ó’Fágáin and Enda McGlynn, “The First EU Science Olympiad (EUSO): a model for science education”, Journal of Biological Education 39(2) (2005).
5. <http://sítio.dgicd.min-edu.pt/PressReleases/Paginas/olimpiadaEUSO.aspx>
6. Disponíveis em <http://moodle.fct.unl.pt/course/view.php?id=2537>
7. <http://www.chalmers.se/mc2/EN/>



Representação portuguesa na EUSO 2010. Da esquerda para a direita: Joana Capucho (mentora da Biologia), Miguel Ferreira\*, Maria Clara Magalhães (mentora da Química), Célia Henriques (mentora da Física), Pedro Pereira\*, Catarina Correia\*\*, Leonel Pereira\*, João Pereira\*\* e Bernardo Figueiredo\*. [\*Membro da equipa B e aluno da Escola Secundária Domingos Sequeira (Leiria). \*\*Membro da equipa A e aluno da Escola Secundária D. Inês de Castro (Alcobaça).]

## MEDINDO A TEMPERATURA EM ESCALAS NANOSCÓPICAS

A colaboração entre os investigadores da Universidade de Aveiro Carlos Brites, Patrícia Lima, Nuno Silva, Vítor Amaral e Luís Carlos (Departamento de Física e CICECO) e os investigadores Angel Millán e Fernando Palacio do Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (pertencente ao Consejo Superior de Investigaciones Científicas e à Universidade de Saragoça) resultou na publicação de um artigo científico na revista *Advanced Materials* (um dos mais prestigiados periódicos em Ciência de Materiais) onde se descreve um nanotermómetro luminescente que combina um número de propriedades que o torna ímpar, quando comparado com outros termómetros luminescentes propostos anteriormente<sup>1</sup>.

A medição da temperatura é crucial para inúmeras investigações científicas e desenvolvimentos tecnológicos, representando actualmente 75 a 80% do mercado mundial de sensores. Os termómetros tradicionais não são geralmente adequados para medir a temperatura a escalas abaixo de 10  $\mu\text{m}$  (cerca de 10 vezes menor que o diâmetro médio do cabelo humano). Esta limitação intrínseca tem encorajado o desenvolvimento de novos termómetros sem contacto e com precisão espacial da ordem dos micrómetros ou, mesmo, nanómetros (um milionésimo do milímetro). A dependência da luminescência com a temperatura é uma ferramenta não invasiva e precisa que permite medir temperatura a estas escalas. A técnica envolve geralmente iões lantanídeos trivalentes (como por exemplo o európio,  $\text{Eu}^{3+}$ , e o térbio,  $\text{Tb}^{3+}$ ) e funciona remotamente através de um sistema de detecção óptica, mesmo em fluidos biológicos, campos electromagnéticos intensos e objectos em movimento.

O novo termómetro é auto-referenciado (não necessita de uma referência externa para medir temperatura), permitindo medições absolutas entre 10 e 350 K. A sensibilidade térmica é de cerca de 4.9%/K, 1,5 vezes superior ao valor mais elevado reportado previamente para sensores de temperatura baseados em iões lantanídeo, e exibe elevada fotoestabilidade em uso prolongado.

O nanotermómetro consiste em complexos de  $\text{Eu}^{3+}$  e  $\text{Tb}^{3+}$  incorporado em nanoagregados híbridos (100-400 nm) formados por um núcleo magnético de óxido de ferro ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) recobertos por uma camada de sílica orgânica (tetraetilortossilicato/amino-propil trietoxissilano, TEOS/ATPES), como se ilustra na figura.

As nanopartículas alteram as suas propriedades de emissão (que os nossos olhos conseguem perceber como cor) de forma consistente com a tempera-

tura, tornando possível prever a temperatura pela “cor” do material (ver figura). Pode ainda ser ajustado a gama de funcionamento actuando no rácio  $\text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}$  ou alterando a matriz de suporte.

Os investigadores demonstraram que a escolha adequada da matriz de suporte permite o processamento do material termométrico como um filme, tendo em vista a obtenção de um mapa bidimensional de distribuição de temperatura de elevada resolução (a resolução espacial é limitada pelo tamanho dos detectores empregues,  $\sim 1\text{-}10\ \mu\text{m}$  para fibras ópticas comerciais e câmaras CCD), com potencial aplicação na microelectrónica, por exemplo.

A combinação do termómetro molecular luminescente com um núcleo magnético permite, além das propriedades descritas, adicionar multifuncionalidade ao dispositivo. Quando comparado com os termómetros propostos até hoje, o novo termómetro representa um passo em frente na termometria à escala nanométrica. Antecipamos que as sinergias que resultam da combinação da medição/mapeamento da temperatura e do superparamagnetismo abrem caminho para novas aplicações promissoras, especialmente no campo da biomedicina. Em particular, esta associação produzirá um instrumento ímpar para mapear, de uma forma não invasiva, distribuições de temperatura em tecidos biológicos (como tumores, por exemplo), durante a libertação de energia, durante a aplicação de um campo alternado às nanopartículas magnéticas (hipertermia magnética), sendo este, sem dúvida, uma ferramenta poderosa para estudar os processos bioquímicos à microescala que ocorrem no interior de uma célula.

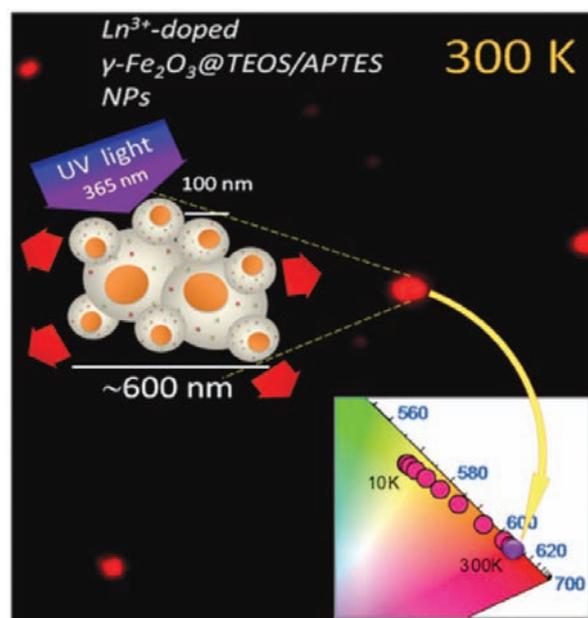


Imagem de microscopia óptica (excitação a 365 nm) e representação esquemática das nanopartículas híbridas multifuncionais

1 <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201001780>

## NICOLA CABIBBO (1935-2010)

### Gustavo Castelo-Branco

Centro de Física Teórica de Partículas,  
Instituto Superior Técnico

Foi com enorme tristeza que recebemos a notícia do falecimento de Nicola Cabibbo, a 16 de Agosto de 2010. Nicola Cabibbo foi um físico eminente com contributos fundamentais para a Física de Partículas. Na altura em que Cabibbo deu a sua mais importante contribuição, que envolveu a introdução do ângulo de Cabibbo, não havia nenhuma razão para se acreditar que os decaimentos do neutrão, das partículas estranhas e do muão fossem diferentes manifestações de uma interacção fraca universal. Podemos dizer que Cabibbo unificou as interacções fracas, numa altura em que os quarks ainda não tinham sido inventados! A generalização da mistura de Cabibbo para três gerações de fermiões foi feita cerca de uma década depois por Kobayashi e Maskawa que mostraram que para três gerações pode haver violação de CP. Foi este trabalho que levou a atribuição do Premio Nobel a estes dois físicos japoneses.

Muitos físicos de partículas (em que me incluo) acham que Cabibbo deveria ter recebido também o Prémio Nobel, uma vez que a ideia pioneira da mistura de fermiões veio de Cabibbo, conduzindo aquela que é hoje designada matriz CKM.

Para além de grande físico, Cabibbo era uma pessoa extraordinária. Lembro-me bem dum passeio que dei por com ele e com uma física americana (Glennys Farrar) por Alfama por ocasião da Conferência da Sociedade Europeia de Física (EPS) de 1981. O Cabibbo ficou encantado com Alfama porque lhe fazia lembrar a Roma da sua infância.



© Marcella Bon

## EQUIPA PORTUGUESA PUBLICA DOIS ARTIGOS NA REVISTA NATURE PHYSICS

### Gonçalo Figueira

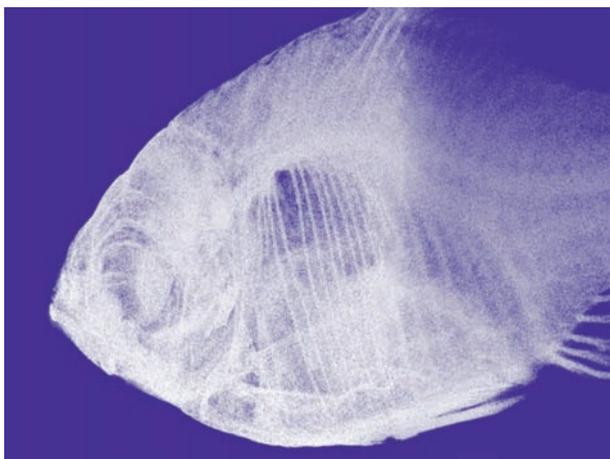
Uma equipa de investigação do Grupo de Lasers e Plasmas (GoLP) do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN), Instituto Superior Técnico, liderada por Luís Oliveira e Silva, colaborou em dois artigos recentemente publicados na prestigiada revista Nature Physics.

No primeiro caso, trata-se da demonstração experimental da fonte de raios-X com elevada coerência espacial, e baseada em aceleradores laser-plasma, mais brilhante conseguida até hoje [1]. Na experiência descrita no artigo, os raios-X são gerados por electrões criados e acelerados durante a interacção de um impulso laser muito intenso e curto com um gás, que é ionizado à passagem deste, transformando-se em plasma. Ao propagar-se pelo plasma, o impulso laser deixa atrás de si uma ondulação de forma semelhante à deixada por um barco que navega. Alguns dos electrões que são afastados à passagem do impulso laser conseguem “apanhar” a onda e “surfá-la”, ganhando energia enquanto o fazem. Estes electrões também oscilam transversalmente enquanto surfam a onda, o que faz com que radiem. Por serem acelerados até velocidades próximas da velocidade da luz a radiação que emitem chega aos raios-X.

A equipa do GoLP/IPFN modelizou computacionalmente a experiência realizada e utilizou os dados obtidos para determinar a radiação gerada numericamente, recorrendo a alguns dos mais potentes supercomputadores do Mundo. O método de geração de raios-X de elevado brilho agora demonstrado poderá ter grande impacto na imagiologia em medicina, biologia e ciência dos materiais, permitindo obter imagens de elevada resolução de fenómenos ultrarápidos e, no futuro, de sistemas biológicos *in vivo*.

O segundo artigo versa sobre um avançado mecanismo para a amplificação de luz laser a altas intensidades em plasmas de forma compacta. Este novo mecanismo baseia-se na possibilidade de transferir energia entre dois impulsos laser através de um plasma, num processo denominado de amplificação Raman. “Através deste processo podemos transferir energia de um impulso longo para um impulso curto, gerando um impulso de luz com uma potência várias ordens de grandeza superior à inicial,” explica Frederico Fiúza, um dos autores.

Simulações numéricas de larga escala – as maiores de sempre no estudo deste problema – realizadas em supercomputadores nos Estados Unidos, no Reino Unido e em Lisboa, permitiram simular, pela primeira vez a nível mundial, a possibilidade de usar este novo mecanismo para gerar os impulsos de luz mais intensos do Universo, com intensidades acima de  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> e durações de algumas dezenas de femtossegundo ( $10^{-15}$  s). O trabalho demonstra assim



Radiografia de um peixe tetra laranja obtida com a radiação produzida pela fonte de raios-X baseada num acelerador laser-plasma.

que será possível obter impulsos laser mais intensos do que os que são gerados actualmente nos sistemas laser convencionais mais avançados. De acordo com Luís O. Silva, “estas simulações permitem definir os parâmetros necessários para implementar experimentalmente este novo esquema de amplificação a intensidades ultra-elevadas”.

1. S. Kneip, C. McGuffey, J. L. Martins, S. F. Martins, C. Bellei, V. Chvykov, F. Dollar, R. Fonseca, C. Huntington, G. Kalin tchenko, A. Maksimchuk, S. P. D. Mangles, T. Matsuoka, S. R. Nagel, C. A. J. Palmer, J. Schreiber, K. Ta Phuoc, A. G. R. Thomas, V. Yanovsky, L. O. Silva, K. Krushelnick e Z. Najmudin, “Bright spatially coherent synchrotron X-rays from a table-top source”, *Nature Physics* 6 (12), 980–983 (2010)
2. R. M. G. M. Trines, F. Fiúza, R. Bingham, R. A. Fonseca, L. O. Silva, R. A. Cairns e P. A. Norreys, “Simulations of efficient Raman amplification into the multipetawatt regime”, *Nature Physics* (2010). doi:10.1038/nphys1793

## CONECTAR SALAS DE AULA AO UNIVERSO: AS ONDAS RÁDIO

### Rosa Doran

Coordenadora do NUCLIO

Decorreu em Paris, em Novembro, a primeira reunião de um novo projecto do consórcio European Hands-on Universe (EUHOU). O projecto “Connecting Classrooms to the Milky Way” (Conectando Salas de Aula à Via Láctea) pretende levar a radioastronomia às salas de aula de todos os países participantes. No âmbito deste projecto serão instalados cinco pequenos radiotelescópios, denominados *Small Radio Antenas* (SRT), um em cada um dos seguintes países: França, Portugal, Espanha, Polónia e Roménia. Com coordenação europeia a cargo da Universidade de Paris VI Pierre et Marie Curie, a coordenação desta iniciativa em Portugal é do NUCLIO (Núcleo Interactivo de Astronomia), representante português do projecto European Hands-on Universe. Participam no projecto os seguintes países: França, Polónia, Romé-

nia, Espanha, Grécia, Chipre, Bélgica, Portugal, Reino Unido, Suécia e Alemanha. O projecto é financiado pelo programa COMENIUS da Comissão Europeia.

A antena Portuguesa será recebida pelo concelho de Pampilhosa da Serra, no mesmo local onde está instalada a antena de 9 m do projecto internacional GEM-P (Galactic Emission Mapping), com coordenação pelo Grupo de Radioastronomia do Instituto de Telecomunicações, que irá cartografar a Via Láctea, juntando assim uma vertente educativa ao seu projecto. Os SRT são antenas de rádio de 3 metros de diâmetro, equipadas com um receptor com design do Haystack Observatory do MIT, recebendo a emissão da Via Láctea, na frequência de 1.4 GHz. Um SRT poderá ser operado remotamente pela comunidade escolar, através da internet, permitindo a introdução de diversas temáticas de forma inovadora, como por exemplo: o Sol, a Galáxia, a matéria escura, o papel das tecnologias de informação e electrónica, etc.

Este projecto europeu vai desenvolver a primeira rede europeia de radiotelescópios para educação. Serão desenvolvidos no âmbito deste projecto recursos pedagógicos para o estudo na nossa galáxia em sala de aula recorrendo a métodos interactivos baseados no Inquiry Based Science Education (IBSE) e usando as novas tecnologias de Informação e Computação.

A primeira sessão para professores da Europa, com o intuito de testar e adaptar os recursos às diferentes realidades dos países participantes terá lugar na Pampilhosa da Serra de 10 a 13 de Abril de 2011. Esta sessão conta com o apoio da Câmara Municipal da Pampilhosa da Serra que vê neste investimento um importante passo no sentido de atrair o interesse dos estudantes para as ciências espaciais e as ciências de Informação e computação.

Esta é uma de novas acções ao alcance das salas de aula que irão proporcionar a partir da Pampilhosa da Serra, no Pinhal Interior, um contacto directo inovador com as Ciências da Terra e Espaço e as Tecnologias de Informação. Integradas localmente pela Ludoteca Criativa da Pampilhosa da Serra no ESPAÇO JIRA - Juventude Inovação e Residência de Arte, estas acções contam também com a participação da Fábrica Centro Ciência Viva de Aveiro e da Universidade de Aveiro e do Centro de Estudos Geo-Espaciais da U. Porto (CICGE). Complementarmente, o CICGE promoverá novas iniciativas experimentais na área da climatologia espacial e Física Solar, enquanto a Fábrica CCV promoverá novas abordagens na divulgação da ciência e experimentação na educação não formal das ciências.

### Contactos:

NUCLIO/HOU – Rosa Doran – [rosa.doran@nuclio.pt](mailto:rosa.doran@nuclio.pt)  
IT – Domingos Barbosa – [dbarbosa@av.it.pt](mailto:dbarbosa@av.it.pt)  
C.M. Pampilhosa da Serra – Alexandra Tomé – [alexandra.tome@cm-pampilhosadaserra.pt](mailto:alexandra.tome@cm-pampilhosadaserra.pt)  
CICGE – Dalmiro Maia – [dmaia@fc.up.pt](mailto:dmaia@fc.up.pt)  
Fabrica CCV – Pedro Pombo – [ppombo@ua.pt](mailto:ppombo@ua.pt)

### Para saber mais:

European Hands-on Universe – [www.euhou.net](http://www.euhou.net)  
NUCLIO – [www.nuclio.pt](http://www.nuclio.pt)  
Município de Pampilhosa da Serra – [www.cm-pampilhosadaserra.pt](http://www.cm-pampilhosadaserra.pt)  
Instituto de Telecomunicações – [www.it.pt](http://www.it.pt)  
Fábrica CCV – [www.fabrica.cienciaviva.ua.pt](http://www.fabrica.cienciaviva.ua.pt)  
CICGE – <http://www.fc.up.pt/cicge/>

## FÍSICA 2010

### José Marques

Decorreu entre 1 e 3 de Setembro de 2010 na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), em Vila Real, a “Física 2010” englobando a 17ª Conferência Nacional de Física e o 20º Encontro Ibérico para o Ensino da Física. A SPF contou com a colaboração da UTAD e da Real Sociedad Española de Física na organização das diferentes componentes da Física 2010.

Com o objectivo de promover o contacto e discussão entre os participantes, foram organizadas seis sessões para apresentações orais e duas sessões para apresentações em poster na Conferência Nacional de Física, e três sessões para apresentações orais e uma sessão de posters para o Encontro Ibérico para o Ensino da Física. Os intervalos para café foram realizados nos espaços das sessões de posters para promover a divulgação e discussão dos trabalhos apresentados.

O programa incluiu um conjunto diversificado de sessões plenárias com diversos oradores convidados: Steve Cowley e Robert Bingham (Física dos Plasmas), Jean-Marie Gregoire (Geofísica e Climatologia), Graça Rocha, Ulrich Sperhake e Orfeu Bertolami (Gravitação e Cosmologia), Michael Thoennessen e Ruprecht Machleidt (Física Nuclear), Peter Watkins (Física de Partículas), Francisco Sanchez-Doblado (Física Médica), Jocelyn Bell Burnell, Anton Ellermeyer e Wolfgang Christian (Ensino da Física).

A Física 2010 contou com 250 participantes inscritos, dos quais 120 participaram em minicursos em temas diversos de física. A participação no Encontro Ibérico para o Ensino da Física e num dos mini-cursos foi acreditada como acção de formação pelo Conselho Científico-Pedagógico da Formação Contínua, destinada aos Professores do Grupo 510.



Da esquerda para a direita: Maria José Couceiro (SPF/Lisboa, Secretariado); Alunas da UTAD participantes na Conferência: Eugénia Teixeira, Sílvia Loureiro, Nádia Ferraz, Beatriz Almeida, Catarina Machado, Paulo Fortuna; Isabel Alves (SPF/Porto, Secretariado); António Fortuna.

O programa social incluiu, entre outros, o Jantar da Conferência no Restaurante Panorâmico da UTAD, um Passeio no Douro e visita à cidade do Peso da Régua e Museu do Douro, bem como uma representação exclusiva no Teatro de Vila Real da peça “Ibéria - Louca História de uma Península”, pelo Grupo Peripécia.

A Direcção da SPF agradece aos membros da Comissão Organizadora, Carlos Herdeiro (FCUP), Joana Almeida e Silva (EB2,3 Monsenhor Jerónimo do Amaral, Vila Real), António Joaquim Fortuna (ES/3 Camilo Castelo Branco, Vila Real), José Manuel Almeida, Marco Duarte Naia e Mário Gonzalez Pereira (UTAD) o excelente trabalho desenvolvido, que muito contribuiu para o sucesso da Física 2010.

### PRIMENET LISBON WORKSHOP

Realizou-se de 16 a 18 de Setembro no Instituto Superior Técnico, a terceira e penúltima grande workshop da Rede Europeia PrimeNet, uma das redes que fazem parte do Consórcio Hadron Physics I3 financiado pelo 7º Programa Quadro. A workshop foi organizada por Teresa Peña (Centro de Física Teórica de Partículas) e Bo Hoistad (Universidade de Uppsala).

Os resumos das palestras apresentadas podem ser encontrados em [PrimeNet\\_Workshop\\_Lisbon.htm](http://www.tsl.uu.se/~hoistad/PrimeNet_Workshop_Lisbon.htm) e [www.tsl.uu.se/~hoistad/PrimeNet\\_Workshop\\_Lisbon.htm](http://www.tsl.uu.se/~hoistad/PrimeNet_Workshop_Lisbon.htm).

A rede PrimeNet envolve 27 universidades e laboratórios na Europa, Estados Unidos, Japão e Rússia. O seu objectivo é coordenar as actividades de diferentes infraestruturas e centros universitários onde se faz investigação experimental e teórica em física hadrónica e de mesões, para otimizar recursos como sistemas de detecção, e desenvolver modelos teóricos para extrair informação sobre propriedades de ressonâncias, manifestações de simetria quiral e a natureza de mesões.

A próxima workshop da PrimeNet vai realizar-se no Forschungszentrum Jülich (Jülich Research Centre), um dos maiores laboratórios de investigação interdisciplinar da Europa.

## UMA PARTICIPAÇÃO (QUASE) BRILHANTE NA XV OIBF

Fernando Nogueira

A XV Olimpíada Ibero-americana de Física decorreu na cidade do Panamá, de 26 de Setembro a 2 de Outubro de 2010. Participaram na competição 71 estudantes de 19 países do espaço ibero-americano. A liderança da delegação portuguesa, de quatro estudantes, esteve a cargo de Fernando Nogueira e José António Paixão, da Universidade de Coimbra.

Tal como na IPhO, o (mau) desempenho na prova experimental afectou seriamente os concorrentes portugueses, que não obtiveram classificações finais consentâneas com o seu brilhante desempenho na prova teórica. Apenas o aluno João Carlos Peralta Moreira (E.S. Domingos Sequeira, Leiria) conseguiu obter um bom resultado na prova experimental, sendo por isso premiado com uma medalha de ouro (obteve uma notável classificação global de 44,88/50). Os restantes alunos, Francisco Xavier Moreira Huhn (E.S. Sá da Bandeira, Santarém), Joaquim Miguel Correia Salgueiro (E.S. Alves Martins, Viseu) e Pedro José Justo Pereira (E.S. João Gonçalves Zarco, Matosinhos), foram premiados com uma medalha de bronze. A participação portuguesa deve por isso ser considerada muito positiva, visto toda a delegação ter sido premiada, tendo aliás obtido o segundo melhor resultado de sempre na OIBF. O vencedor absoluto desta olimpíada foi um estudante brasileiro, Matheus Barros de Paula. Estes resultados merecem-nos a seguinte reflexão. Há dez anos atrás, os estudantes da equipa portuguesa tinham, tipicamente, um desempenho na prova experimental superior ao da prova teórica. Por mais de uma vez, os estudantes portugueses regressaram a Portugal sem qualquer prémio, embora o seu desempenho na prova experimental superasse o de alguns medalhados. O mau desempenho na prova teórica podia ser explicado pelo grande desnível das questões face ao currículo português do ensino secundário. O syllabus da competição internacional sempre englobou vários temas que não constam ou não são tão desenvolvidos nos programas vigentes em Portugal. Esta deficiência foi, em parte, colmatada pelos novos programas (com a introdução de Física Moderna) e com a preparação específica dos alunos pré-seleccionados na escola Quark! da universidade de Coimbra.

O bom desempenho que então havia na prova experimental parecia ser devido a uma atitude positiva dos estudantes face ao desafio das provas. Os estudantes tinham alguma prática de laboratório, adquirida nas disciplinas de Técnicas Laboratoriais então vigentes. Os estudantes portugueses eram “desenrascados”, e não se atemorizavam com uma longa prova experimental, de cinco horas, com um enunciado complexo que podia ter uma trintena de páginas! Ao contrário de estudantes de outras equipas com bom desempenho na prova teórica,

os portugueses não mostravam inibição em manipular os instrumentos, e tinham alguma habilidade na montagem experimental e na recolha e tratamento dos dados.

Hoje em dia a situação é distinta. Se o desempenho global das equipas olímpicas tem vindo a melhorar, contando já com várias medalhas e menções honrosas no seu palmarés, isto tem sido conseguido à custa de uma notória melhoria na prova teórica, sem paralelo na prova experimental. Nas últimas competições, e ao contrário do que acontecia no passado, é agora frequente estudantes portugueses terem um desempenho abaixo da média na prova prática.

Parece ter havido uma mudança de atitude dos alunos face à experimentação (não são “desenrascados” e “bloqueiam” face a provas experimentais mais complexas), mas também parece faltar prática de laboratório. Estas falhas são notórias na dificuldade em efectuar algumas operações básicas como a montagem de um circuito eléctrico, a manipulação de aparelhos de medida como multímetros, a elaboração de gráficos em papel milimétrico (a calculadora gráfica não é permitida nas provas!), etc. Inquiridos os estudantes, chegamos à conclusão que a sua exposição à experimentação em Física no ensino secundário é muito fraca.

Esta constatação é surpreendente, atendendo a que os programas contemplam um número razoável de experiências obrigatórias que, ao contrário do que acontecia no passado, envolvem todos os alunos das disciplinas de “Física e Química” dos 10º e 11º anos e de “Física” do 12º ano. A realidade porém parece ser distinta. Embora as experiências obrigatórias sejam quase sempre “abordadas”, muitas vezes os alunos não chegam a realizá-las. Por vezes elas são realizadas pelo professor ou por um reduzido número de alunos da turma, à laia de demonstração. Noutros casos, por falta de material ou de outras condições, nem isso. Mesmo quando os alunos realmente efectuem as experiências, a recente tendência de preparação das experiências com base em questões pré-laboratoriais, pode pré-condicioná-los a esperar experiências “guiadas” e desloca a ênfase da experimentação para a explicação teórica, tornando quase desnecessária a realização da experiência. Acresce que o enfoque dado à experimentação é também fortemente condicionado pela preocupação de obtenção de bons resultados nos exames nacionais, provas que, embora apresentem questões relativas a actividades experimentais, não podem avaliar as competências do trabalho experimental, mas apenas a interpretação de situações mais ou menos cristalizadas.

Ora, para o desenvolvimento de competências instrumentais como a correcta manipulação de um multímetro, é preciso pôr as “mãos na massa”. O exemplo da prova experimental da OIBF de 2010 é paradigmático. A prova consistia no estudo de uma célula fotovoltaica e na determinação do seu ponto de desempenho óptimo – precisamente uma das experiências obrigatórias dos programas em vigor em Portugal. Esperava-se, por isso, um melhor desempenho dos estudantes portugueses. Mas alguns tiveram dificuldade em montar correctamente o circuito eléctrico, outros queimaram os fusíveis do multímetro porque não se aperceberam que



Equipa portuguesa na XV OIBF, da esquerda para a direita: Fernando Nogueira (team-leader), Joaquim Salgueiro (E.S. Alves Martins, Viseu, medalha de bronze), João Moreira (E.S. Domingos Sequeira, Leiria, medalha de ouro), Francisco Huhn (E.S. Sá da Bandeira, Santarém, medalha de bronze), Pedro Pereira (E.S. João Gonçalves Zarco, Matosinhos, medalha de bronze) e José António Paixão (team-leader).

não podiam testar as pilhas com o aparelho em modo de “amperímetro”...

Com os seus inúmeros defeitos (a descontextualização face aos programas de Física e Química e a não universalidade da oferta), as extintas Técnicas Laboratoriais de Física tinham a vantagem de oferecer aos alunos um espaço (o laboratório) e um tempo próprios para a experimentação realizada, efectivamente, pelos alunos, e permitia o desenvolvimento das atitudes e competências experimentais básicas, incluindo a manipulação de instrumentos simples. Para ajudar a colmatar esta situação, a SPF propõe-se realizar em 2011, em colaboração com a escola Quark! da Universidade de Coimbra, um curso de formação de professores da pré-selecção olímpica para os ajudar a fornecer aos seus alunos uma melhor preparação prática, tendo em vista as exigências dos programas olímpicos.

## PROJECTO MEDEA PREMEIA VENCEDORES

A atribuição dos prémios aos participantes no Projecto MEDEA decorreu no dia 27 de Outubro pelas 14h30 no Museu de Ciência da Universidade de Lisboa. Neste projecto participaram 110 alunos de 20 escolas secundárias do Continente e das Regiões Autónomas.

O primeiro prémio foi atribuído a:

### **Escola Secundária com 3º Ciclo do Ensino Básico de José Estevão, Aveiro**

(<http://ciencia.esec-jose-estevao.rcts.pt/medea/default.htm>)

Alunos: Simão Pedro Lopes, Carla Cristina Sousa Gouveia Pereira

Dias, Daniela Casal Sousa e Cátia Alexandra Sousa.

Professores: Guida Bastos e José Alberto Costa

### **Agrupamento de Escolas José Sanches de Alcains,**

Alcains: *Os Radiantes*

(<http://rmedea.alcains.com/>)

Alunos: Bruno Lopes, João Costa, João Silva e Rafael Mendes.

Professor: Jorge Manuel Lopes Sousa Barata

### **Escola Secundária com 3º ciclo D. Manuel I,**

Beja: *Os Hertzianos*

(<http://sites.google.com/site/medea2010esdmibeja/home>)

Alunos: Gonçalo Silva, Jorge Rodeia, Pedro Silva, Joana Silva e

Duarte Calado.

Professor: António Manuel Bule Malveiro.

Foram ainda atribuídas as seguintes menções honrosas:

### **Escola Secundária de Lousada, Lousada: Os LSD**

(<http://www.lsdprojectomedeia.blogspot.com/>)

Alunos: André Brandão, Daniela Correia, Hugo Neto, Luís Ribeiro e Tiago Madureira.

Professor: Aníbal Pires

Escola Secundária de Lousada, Lousada: *Os Volt-pormetro*

(<http://voltpormetro.blogspot.com/>)

Alunos: Catarina Martins, Ricardo Coelho e Nelson Martins

Professor: Aníbal Pires

### **Escola 2,3/S Pe. Maurício de Freitas, EBS das Flores,**

Açores: *Onda Ocidental*

(<http://www.ondaocidental.pt.vu/>)

Alunos: Délcio Lopes, Dércio Ribeiro, Gustavo Alves, Nânci Ramos e Sara Furtado.

Professora: Ana Cristina Salvador

Na sessão de entrega de prémios estiveram presentes a Doutora Rosália Vargas do Programa Ciência Viva (em representação do Ministro da Ciência e Tecnologia) e Engenheiro José Peralta, pela REN.

# Vai acontecer

## INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF OPTICS AND PHOTONICS – AOP2011)

De 3 a 7 de Maio de 2011 decorrerá na Universidade do Minho uma conferência internacional sobre aplicações da óptica e da fotónica (International Conference on Applications of Optics and Photonics – AOP2011). A conferência é organizada pela SPOF, Sociedade Portuguesa de Investigação e Desenvolvimento em Óptica e Fotónica, e conta com o apoio das principais organizações científicas internacionais neste domínio: ICO, SPIE, OSA, EOS, RIAO, SE-DOPTICA, AMO, OPSS, CVO, STO, entre outras. Comunicações em todos os domínios de aplicação da óptica e da fotónica poderão ser submetidas até 28 de Janeiro de 2011 através do sistema MySPIE. O livro de proceedings da conferência será publicado em Setembro de 2011 pela SPIE (indexado no ISI).

Para saber mais: [www.spidof.pt/aop2011](http://www.spidof.pt/aop2011)

# e-lab: o laboratório *online*

Horácio Fernandes<sup>1</sup>  
Sérgio Leal<sup>2</sup>  
João Paulo Leal<sup>3</sup>

1. IPFN, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa
2. Departamento de Química e Bioquímica, FCUL, Campo Grande, 1749-016 Lisboa e Escola Secundária com 3.º ciclo Padre António Vieira, R. Marquês de Soveral, 1749-063 Lisboa
3. Unidade de Ciências Químicas e Radiofarmacêuticas, ITN, 2686-953 Sacavém e Departamento de Química e Bioquímica, FCUL, Campo Grande, 1749-016 Lisboa

hf@ipfn.ist.utl.pt  
sergioleal20@gmail.com  
jpleal@itn.pt

**Nos últimos anos tem-se verificado que cada vez menos alunos optam por seguir uma carreira científica, pois alegam “ser difícil” estudar as disciplinas respectivas.**

**Urge ter alunos motivados e interessados pela aprendizagem das ciências, para bem da cultura científica e do nosso próprio futuro. Estudos indicam que para inverter a situação anterior, as práticas lectivas devem apostar na experimentação e nas novas tecnologias.**

**Após realização de um estudo preliminar o e-lab já provou ser um excelente recurso gratuito que possui ambas as valências anteriores.**

## Introdução

Estudos recentes [1-2,8] confirmam que os alunos se encontram desmotivados para a aprendizagem de disciplinas científicas e, segundo Leal [2], o aspecto anterior deve-se ao ensino tradicional e à descontextualização curricular que tem vindo a ser praticada.

A mudança de práticas lectivas bem como a contextualização curricular são, portanto, importantes para motivar e aumentar o interesse dos alunos nas áreas científicas, pois só alunos que entendam a im-

portância da Física e da Química nas suas vidas se tornarão interessados nos seus conteúdos.

Para a necessária mudança de práticas lectivas deve ter-se em conta a utilização de novas tecnologias e a realização de trabalho experimental [2], valências proporcionadas pela plataforma e-lab.

O e-lab é uma plataforma de ensino das ciências disponível gratuitamente e que se encontra actualmente no endereço <http://www.e-escola.pt/elab.asp>. Fisicamente, o e-lab está situado nas instalações do Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL) tendo sido desenvolvido sobre o REC, um produto duma empresa portuguesa, a Linkare TI Lda.

O e-lab é um laboratório real controlado remotamente e acessível 24 horas por dia. Com um computador com acesso à Internet é possível ter acesso, em qualquer lugar, a um conjunto de mais de dez experiências científicas, maioritariamente de Física. Dado que a plataforma assenta em *Java*, é possível utilizar o e-lab em qualquer sistema operativo, bastando ter instalados um *browser*, o *Java Web Start* e um leitor multimédia como o *VLC media player* ou o *QuickTime media player* para conseguir visualizar o decorrer da experiência em tempo real.

O e-lab não pretende substituir a realização, o fazer com as próprias mãos mas complementar as actividades experimentais executadas pelos alunos.

Através da plataforma e-lab é possível proporcionar às escolas básicas e secundárias um recurso de ensino de ciências que permite a realização de experiências que por razões económicas e/ou de segurança não seriam possíveis de realizar.

## Objectivo

A plataforma e-lab é uma ferramenta de ensino *e-learning* que permite aos alunos de vários níveis de ensino consolidarem os seus conhecimentos no domínio científico e, conseqüentemente, desenvolverem as suas competências científicas [3].

O objectivo fundamental do e-lab é contribuir para inverter a desmotivação dos alunos para o ensino das ciências, em particular da Física e da Química. Para alcançá-lo serão utilizadas duas vias simultaneamente: as tecnologias de informação e o trabalho laboratorial.

## Descrição

O uso generalizado dos computadores e também da Internet nestes últimos anos tem mudado a nossa sociedade a todos os níveis e a educação não é excepção. Como tal, os professores devem estar preparados para abraçar as novas tecnologias e usá-las em seu proveito na sala de aula, uma vez que constituem um excelente recurso para diversificar as aulas e que, regra geral, captam a atenção e a curiosidade dos alunos, para além de poderem despertar a criatividade e participação dos mesmos [2].

No entanto, é importante ter presente que o recurso às novas tecnologias não é a solução mágica para inverter o momento delicado que a educação em ciências atravessa presentemente mas é, sem dúvida, um forte aliado. Para isso será também importante que os professores estejam actualizados e frequentem acções de formação contínua para se encontrarem actualizados no que toca a novas práticas lectivas.

A plataforma e-lab facilita aos docentes o acesso dos seus alunos a laboratórios, nos quais aquisição de dados de forma electrónica permite expandir a actual formação experimental nas ciências básicas. Por um lado, podem ser realizadas actividades laboratoriais inacessíveis nos laboratórios tradicionais, devido ao elevado tempo da sua montagem ou segurança envolvidos, e, por outro, é possível utilizar equipamento caro, normalmente não disponível nas escolas. Por último, o e-lab permite compilar um elevado número de dados experimentais, aumentando as potencialidades numa análise numérica e estatística do problema em questão.

O IST com o apoio do Ministério da Educação (ME), através da Direcção-Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular (DGIDC), preparou materiais de apoio à utilização do e-lab no 3.º ciclo do ensino básico e no ensino secundário, tendo em conta o papel das ciências experimentais no ensino científico. Os guias experimentais incluídos no e-lab enquadram-se nas competências essenciais definidas pelo Currículo Nacional do Ensino Básico [9] e nas orientações expressas nos currículos das disciplinas de "Física e Química A" do 10º e 11º anos e "Física" e "Química" do 12º ano de escolaridade [10-13]. Estes materiais resultaram de uma formação contínua creditada realizada no IST entre Setembro e Novembro de 2009, onde participaram quinze professores de Física e Química do ensino básico e/ou secundário que leccionavam no ano lectivo 2008/2009 na região de

Lisboa, tendo sido testados os materiais criados pelos quinze formandos nas turmas que leccionavam na altura.

Os materiais resultantes da formação anterior foram aperfeiçoados e validados, tendo os mesmos já sido testados em sala de aula (Figura 1).



Fig. 1 - Alunos a utilizar o e-lab.

Na plataforma Moodle da DGIDC (<http://modle.crie.min-edu.pt>) está disponível uma disciplina relativa ao e-lab, onde são disponibilizados os materiais referidos anteriormente e outros documentos de apoio, para suportar e orientar a utilização da plataforma por professores e alunos, com acesso restrito aos professores registados.

A interface actual do e-lab encontra-se remodelada (Figura 2) sendo muito mais intuitiva do ponto de vista do utilizador que a sua antecessora (Figura 3).

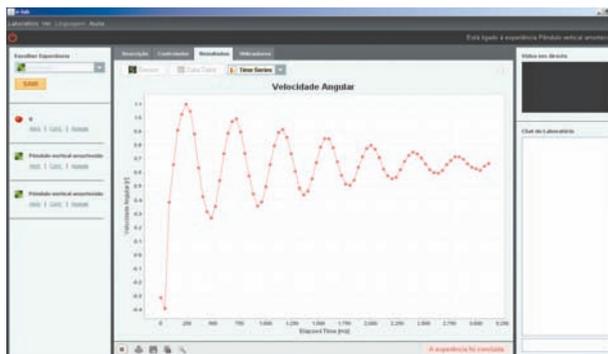


Fig. 2 - Interface remodelada.

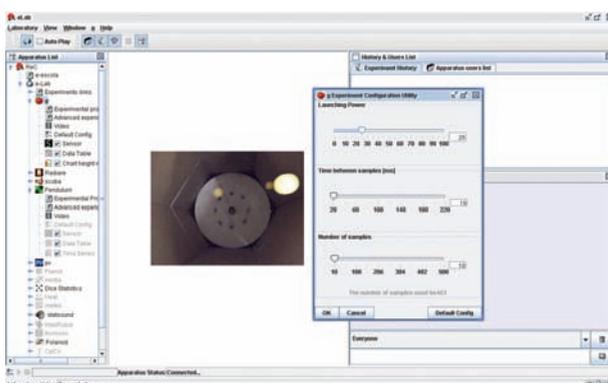


Fig. 3 - Interface antecessora.

Das experiências disponíveis na plataforma e-lab, quatro já foram alvo de um estudo preliminar para aferir a sua potencialidade no ensino básico e secundário numa acção de formação contínua creditada, a saber: (i) determinação da aceleração da gravidade da Terra ( $g$ ) (Figura 4); (ii) variação da pressão em função do volume – Lei de Boyle-Mariotte ( $PV = k$ ) (Figura 5); (iii) variação da pressão em função da profundidade – Lei da hidrostática ( $P$  Vs  $h$ ) (Figura 6); e (iv) tratamento estatístico de dados através do lançamento de dados (*Dados*) (Figura 7).

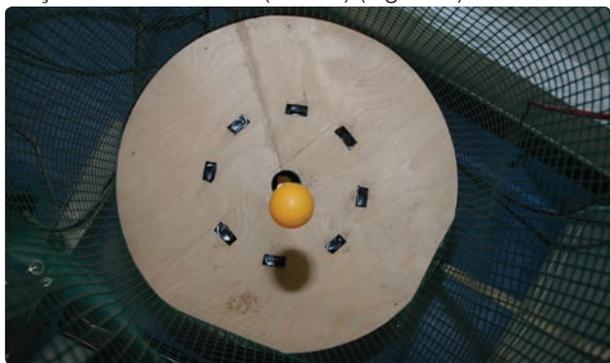


Fig. 4 - Aparato experimental para a determinação de  $g$ .

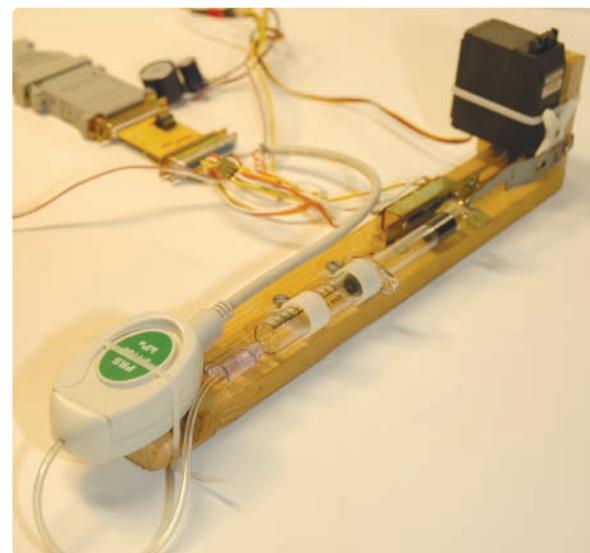


Fig. 5 - Aparato experimental para a Lei de Boyle-Mariotte.

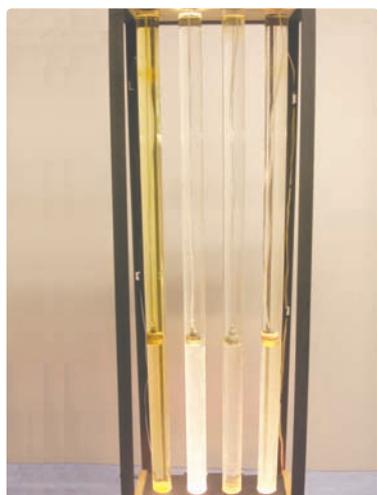


Fig. 6 - Aparato experimental para a Lei da Hidrostática.



Fig. 7 - Aparato experimental para o Lançamento de Dados.

## Conclusão

Constatou-se dos resultados obtidos do estudo preliminar realizado, que a plataforma e-lab é um recurso *e-learning* de grande valor didáctico/pedagógico que possibilita a aquisição de conhecimentos científicos, bem como o desenvolvimento de competências científicas de alunos do ensino básico e secundário, facto corroborado pela totalidade dos professores inquiridos [3].

O facto da própria plataforma possuir os recursos necessários à preparação, exploração e execução das várias experiências é uma mais-valia para que os professores possam trabalhar com os alunos competências científicas tais como a utilização de vocabulário científico adequado, a análise e/ou construção de gráficos de acordo com os resultados obtidos pela realização das experiências e-lab, bem como a utilização de outras linguagens simbólicas (gráficos, expressões matemáticas, ...), entre outras.

Tendo em conta a sociedade tecnológica em que actualmente nos encontramos, urge a necessidade dos currículos destes e outros níveis de ensino se actualizarem, para que os alunos se mostrem continuamente interessados e motivados para a aprendizagem de disciplinas científicas [2]. É, pois, necessária, uma geração de alunos que assegure o futuro da investigação científica, da qual dependemos, impreterivelmente. A plataforma e-lab é um recurso tecnológico/experimental importante para alcançar o objectivo anterior.

Por melhor que seja uma ferramenta é sempre necessário que haja uma preparação e um conhecimento prévio da mesma para que dela se tire o maior partido. A plataforma e-lab também disponibiliza a formação/orientação necessária para os professores e alunos que a utilizem, encontrando-se em permanente actualização de conteúdos e de experiências disponíveis.

No corrente ano lectivo 2010/2011 espera-se alargar o estudo da utilização da plataforma e-lab nas escolas básicas e secundárias portuguesas, onde se pretende continuar a demonstrar a potencialidade da plataforma e-lab que alia a tecnologia e o trabalho laboratorial, recursos que vários estudos [2-7] referem serem essenciais nas práticas lectivas para incrementar o interesse e a motivação dos alunos para as áreas científicas.

A nossa meta é tornar o e-lab acessível a todas as escolas portuguesas de uma forma simples e prática.

## Convite

O IST proporciona a marcação de visitas de estudo para alunos e professores terem contacto com o e-lab. Caso esteja interessado poderá expressar o seu interesse para o endereço [elab@e-escola.pt](mailto:elab@e-escola.pt). Neste mesmo endereço poderá solicitar o seu registo na disciplina Moodle em epígrafe.



**Horácio Fernandes** é professor do Departamento de Física do Instituto Superior Técnico onde lecciona cadeiras de Instrumentação Electrónica, Física Básica e Microprocessadores e é Investigador no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear onde desenvolve trabalho científico em Fusão Nuclear nas suas áreas mais tecnológicas.

Mantém igualmente uma regular participação em divulgação científica. É actualmente membro do "Technical Advisor Panel" da agência europeia para o ITER (F4E) e investigador coordenador numa actividade da IAEA.



**Sérgio Leal** é professor de Física e Química do ensino básico e secundário na Escola Secundária com 3.º ciclo Padre António Vieira e aluno de Doutoramento do Departamento de Química e Bioquímica da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. A sua actividade científica centra-se na utilização das tecnologias de informação e comunicação e de trabalho laboratorial no ensino das ciências



**João Paulo Leal** é investigador auxiliar no Instituto Tecnológico e Nuclear, em Sacavém, e professor convidado da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Os seus interesses científicos centram-se na Energética Molecular e os interesses pedagógicos no uso da Novas Tecnologias no ensino das Ciências, nomeadamente da Química.

1. J. Paiva, "O fascínio de ser professor", Texto Editores, Lisboa (2007) S. C. Leal, "A química orgânica no ensino secundário: percepções e propostas", Dissertação de Mestrado inédita, Universidade de Aveiro, Aveiro (2006).
2. S. C. Leal, J. P. Leal, e H. Fernandes, "e-lab platform: promoting students interest in science", INTED2010 Proceedings, ISBN 978-84-613-5538-9, L. Gómez Chova, D. Martí Belenguer, I. Candel Torres (Eds.), 8-10 Março, International Association of Technology, Education and Development IATED, Valencia. p. 2810-2819 (2010).
3. S. C. Leal, H. Fernandes, e J. P. Leal, "Laboratório virtual e-lab: uma plataforma de ensino das ciências", XIII Encontro Nacional de Educação em Ciências Proceedings, ISBN 978-989-95831-2-2, Escola Superior de Educação, Instituto Politécnico de Castelo Branco (Eds.), 24-26 Setembro, Escola Superior de Educação, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, p. 1557-1560 (2009).
4. S. C. Leal, e J. P. Leal, "Pedagogical material that promotes students interest in science", 6th International Conference on Hands-on Science Proceedings, ISBN 978-989-95095-5-9, Costa MF, Darrío BV, Patariya MK (Eds.), 27-31 Outubro, Science City, Ahmedabad - Índia, p. 161-164 (2009).
5. S. C. Leal, e J. P. Leal, "Why are students not attracted by physics and chemistry?", EduLearn09 Proceedings, ISBN 978-84-612-9802-0, L. Gómez Chova, D. Martí Belenguer, I. Candel Torres (Eds.), 6-8 Julho, International Association of Technology, Education and Development IATED, Valencia, p. 4019-4022 (2009).
6. S. C. Leal, J. P. Leal e H. Fernandes, "e-lab: a valuable tool for teaching", 7th International Conference on Hands-on Science Proceedings, ISBN 978-989-95095-6-6, M. Kalogiannakis, D. Stavrou, P. G. Michaelides (Eds.), 25-31 Julho, University of Crete, Rethymno (Crete) - Grécia, p. 89-93 (2010).
7. A. Martins, I. Malaquias, D. R. Martins, A. C. Campos, J. M. Lopes, E. M. Fiúza, M. M. F. da Silva, M. Neves, e R. Soares, "Livro branco da física e da química (1.ª ed.)", Minerva Central, Aveiro (2002).
8. Ministério da Educação, Departamento do Ensino Básico "Programa de ciências físicas e naturais: Orientações curriculares para o 3.º ciclo", Autor, Lisboa (2001).
9. H. Caldeira, I. P. Martins, M. C. Magalhães, M. O. Simões, T. S. Simões, J. M. G. Lopes, J. A. L. Costa, P. Pinto, A. Bello, C. San-Bento, & E. P. Pina, "Programa de física e química A - 10.º ano", Ministério da Educação, Departamento do Ensino Secundário, Lisboa (2001).
10. I. P. Martins, J. A. Costa, J. M. Lopes, M. O. Simões, & T. S. Simões, "Programa de física e química A - Componente de química - 11.º ano", Ministério da Educação, Departamento do Ensino Secundário, Lisboa (2003).
11. M. Fiolhais, E. Cardoso, J. A. Paixão, M. C. A. Sousa, & R. Nogueira, "Programa de física - 12.º ano", Ministério da Educação, Direcção-Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular, Lisboa (2004).
12. I. P. Martins, J. A. Costa, J. M. Lopes, M. O. Simões, P. R. Claro, & T. S. Simões, "Programa de química - 12.º ano", Ministério da Educação, Direcção-Geral de Inovação e Desenvolvimento Curricular, Lisboa (2004).

# Físicos portugueses premiados pelo Conselho Europeu de Investigação

Gonçalo Figueira

**Fixem estes nomes: Vítor Cardoso e Luís Oliveira e Silva. São jovens (35 e 40 anos, respectivamente), e ambos professores no Dep. Física do Instituto Superior Técnico (IST), em Lisboa, onde também se licenciaram e doutoraram. Trabalham em áreas de vanguarda – a dinâmica de buracos negros e a aceleração de partículas baseada em plasmas – para as quais fazem uso intenso de computadores avançados. E este ano foram ambos recompensados com avultados prémios do Conselho Europeu de Investigação (European Research Council, ERC), para o desenvolvimento dos seus projectos durante os próximos anos.**

Os altamente competitivos prémios do ERC visam fornecer apoio financeiro a jovens investigadores de forma a incentivar a criação de novas equipas de investigação pautadas pela excelência. Existem duas modalidades: “Starting Independent Researcher Grant” (o caso do Vítor) e “Advanced Investigator Grant” (o caso do Luís), dependendo do tempo que decorreu desde o doutoramento do candidato. Em qualquer dos casos, o prémio é reconhecimento de uma carreira com um potencial excepcional, e visa consolidar a formação de futuros líderes científicos, ajudando-os a desenvolver projectos ambiciosos e de carácter pioneiro.

A Gazeta falou com os dois premiados para descobrir mais sobre estes projectos e sobre o que os leva a trabalhar nas suas áreas de eleição. E temos a certeza de que iremos ouvir falar deles nos próximos anos. Por isso, repito: fixem estes nomes. Garanto-vos que o futuro da física portuguesa passa por eles.

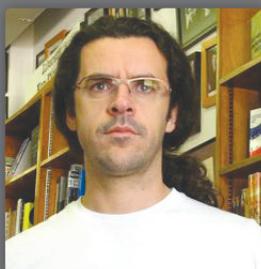
Para saber mais:

Ver artigos publicados em edições anteriores da Gazeta

V. Cardoso e C. Herdeiro, “Colidindo buracos negros”, *Gazeta de Física* 32(1), 2 (2009)

S. Martins, R. Fonseca, L. Silva, “Aceleradores laser-plasma aos ombros de Einstein”, *Gazeta de Física* 33(1), 2 (2010)

## Vítor Cardoso



**Idade:** 35 anos

**Formação:**

Doutoramento em Física, IST (2003)

**Página web:**

<http://gamow.ist.utl.pt/~vitor/>

**Título do projecto:**

“The dynamics of black holes: testing the limits of Einstein’s theory (DyBHo)”

**Área científica:**

Física de altas energias, Astrofísica, Relatividade Geral, Física de buracos negros

**Duração:**

Dezembro 2010 a Dezembro 2015

**Financiamento:**

918 mil euros

**Tamanho da equipa:**

cerca de 6-9 pessoas

## Em que consiste o projecto?

O projecto pretende entender a fundo as equações de Einstein, e o que elas nos dizem sobre a forma como os buracos negros interagem, e como os poderemos observar. Este conhecimento é muito importante por várias razões. Em primeiro lugar, quando dois buracos negros colidem – e isto acontece frequentemente no universo – emitem uma quantidade impressionante de ondas gravitacionais. Estas

ondas são uma consequência da teoria de Einstein mas ainda não foram detectadas experimentalmente, porque quando chegam à Terra são muito fracas. Temos actualmente vários detectores a tentar “apanhá-las”. Quando o fizerem, vamos perceber muito melhor o nosso universo. Ora, para percebermos a informação que elas transportam, temos de perceber exactamente como é que estas ondas são produzidas e que informação transportam, e é aí que o meu projecto entra.

Esta é a componente astrofísica. Mas o projecto tem também uma importante componente de altas energias, já que a interacção de buracos negros é fundamental em várias teorias de unificação. Uma destas, que creio que muitos de nós já ouvimos falar (talvez de uma forma mais bombástica que o desejável), prevê a formação de buracos negros e outros objectos mais exóticos em aceleradores de partículas como o LHC no CERN. Mais uma vez, a identificação destes objectos não é fácil, e requer que percebamos muito precisamente como é que eles se formam. Uma componente importante do meu projecto, que aliás já deu frutos, é perceber como é que se formam buracos negros quando duas partículas colidem a grandes velocidades. Existem alguns argumentos que indicam que para se perceber isto basta colidir dois buracos negros a grandes energias, e é precisamente isso que estamos agora a fazer (com papel e lápis, ou no computador!).

### **Por que acha que esta área da física é interessante?**

Porque estamos a ir ao âmago de questões essenciais: como é que a teoria de Einstein se comporta em situações de curvatura forte e colisões com extrema violência? Será que conseguimos medir estas ondas gravitacionais e, em caso afirmativo, elas concordam com a previsão da teoria, ou teremos de melhorar as equações de Einstein? O que acontece ao certo quando colidimos duas partículas a velocidades próximas da luz? Até recentemente, pensávamos que simplesmente partiríamos as partículas em várias (afinal, estamos a chocar objectos a altas velocidades!), mas é possível, aliás, é provável, que elas simplesmente se agreguem num buraco negro. As consequências para a física de partículas são muito interessantes: a partir de uma certa energia, não adianta aumentar a potência dos aceleradores pois não vamos conseguir perscrutar mais o interior das partículas, simplesmente produzimos um buraco negro.

### **Qual a composição da equipa do projecto e que tarefas vai realizar?**

Este projecto requer conhecimentos em várias áreas e acho que todos nós estamos ainda a tentar perceber algumas delas! Em linhas gerais, temos o Andrea Nerozzi, o Tércence Delsate, o Ulrich Sperhake e a Helvi Witek, que estão encarregues da parte computacional, isto é, de resolver as equações de Einstein no computador. Esta parte é fundamental, e estou muito feliz por termos colegas tão competentes e motivados na equipa em Lisboa. O Andrea esteve em Austin (EUA) e em Jena (Alemanha) antes de vir para cá.

O Ulrich já esteve em Caltech (EUA) e agora está em Barcelona e Lisboa, com a minha equipa. A Helvi esteve em Jena a fazer licenciatura e está agora a acabar o doutoramento comigo. Todos nós estamos encarregues de entender as equações que o computador tem de resolver, mas um foco especial vai para o Carlos Herdeiro (Aveiro), o Leonardo Gualtieri, o Paolo Pani, o Jorge Rocha e o Miguel Zilhão. Eles tem sido instrumentais na parte teórica e são brilhantes no que fazem... tenho toda a sorte do mundo! Finalmente, gostava de mencionar o grande Sérgio Almeida que vai estar encarregue do nosso *cluster* no IST, e que como tal é mais uma peça imprescindível.

### **Quais as principais aplicações do financiamento recebido?**

O grosso do financiamento vai para pagar um *cluster*, uma vez que precisamos de computação intensiva, e para salários para alguns de nós. Depois temos ainda computadores para vários membros da equipa, conferências, fundos para convidar colegas de fora, etc.

### **Qual o grau de internacionalização do projecto?**

O grau de internacionalização é alto. A equipa inclui pessoas da Alemanha, Itália, Portugal, Bélgica, etc. Temos colaborações e interacção permanente com instituições como as Universidade de Aveiro, Barcelona, Roma “La Sapienza”, Mississippi, Princeton, Caltech, etc. Aliás, devo dizer que a colaboração com colegas noutras instituições é quase pré-requisito para excelência em qualquer sítio do Mundo. O conhecimento é algo muito dinâmico e que não se concentra apenas num punhado de instituições. É norma os investigadores colaborarem com colegas noutras partes do Mundo, visitarem outras instituições, etc.

### **Qual o impacto na sociedade das descobertas que se vierem a realizar?**

Creio que responder a questões fundamentais como as que descrevi é uma recompensa muito grande para todos nós. São questões que fascinam a humanidade há séculos... não houve nenhuma civilização que não tentasse compreender o universo. Creio que mais do que as coisas palpáveis, que as há sempre (progressos computacionais ou tecnológicos que necessariamente ocorrem quando tentamos ir para além do estado da arte), é importante perceber como o universo funciona e o nosso lugar nele. Como é óbvio, gostaria que o nosso trabalho tivesse impacto na sociedade, mas não é a razão principal para fazer o que faço. Faço-o sobretudo pela curiosidade.

## Luis Oliveira e Silva



**Idade:** 40 anos

**Formação:**

Doutoramento em Física, IST (1997)

**Página web:**

<http://web.ist.utl.pt/luis.silva/>

**Título do projecto:**

ACCELERATES - Acceleration in Extreme Shocks: from the microphysics to laboratory and astrophysics scenarios

**Área científica:**

Física dos plasmas

**Duração:**

Janeiro de 2011 a Janeiro de 2016

**Financiamento:**

1 588 800 euros

**Tamanho da equipa:**

7 doutorados, 6 estudantes de doutoramento, 2 estudantes de mestrado, 1 técnico de *High Performance Computing*

rar áreas muito diversas de forma multidisciplinar, podendo assim ter um impacto mais abrangente.

### Qual a composição da equipa do projecto e que tarefas vai realizar?

A equipa de investigação do projecto é a equipa de teoria e simulação do Grupo de Lasers e Plasmas que, neste momento, é composta por Luís Silva, Ricardo Fonseca (membros permanentes), Anne Stockem, Xavier Davoine, Bandhu Pathak, Jorge Vieira, e Paulo Abreu (pós-docs), Joana Martins, Frederico Fiúza, Marija Vranic, Paulo Alves, Elisabetta Boletta, Nitin Shukla (estudantes de doutoramento), Paulo Ratinho (staff técnico), e Diana Amorim (estudante de mestrado). O trabalho tem componentes teóricas e computacionais, envolvendo toda esta equipa. Contamos ainda com a colaboração dos nossos outros colegas do GoLP, nomeadamente João Mendanha Dias, para alguns dos aspectos técnicos e científicos do projecto.

### Quais as principais aplicações do financiamento recebido?

O financiamento recebido destina-se a suportar financeiramente as pessoas da minha equipa e a sua actividade. Para além disso pretendemos expandir o cluster do IST para assim aumentar a capacidade computacional ao dispor da nossa equipa.

### Qual o grau de internacionalização do projecto?

Este trabalho é realizado por uma equipa do IST num contexto fortemente internacionalizado. A nossa equipa é muito cosmopolita (mais de 6 nacionalidades distintas), e irá integrar fortemente com os nossos colaboradores nos Estados Unidos (UCLA, USC e Princeton) e na Europa (Rutherford Appleton Laboratory e École Polytechnique).

### Qual o impacto na sociedade das descobertas que se vierem a realizar?

Esta investigação pretende contribuir para esclarecer um dos mistérios da Física Moderna: como são acelerados os raios cósmicos? À partida poderíamos pensar que resolver esta questão não teria impacto no nosso dia-a-dia, para além conhecermos melhor a Natureza. No entanto, se percebermos a forma como os raios cósmicos são acelerados e se o conseguirmos recriar em laboratório com recurso a lasers ultra-intensos poderemos também otimizar os aceleradores de partículas que estão presentes em muitos aspectos da vida moderna e à nossa volta como, por exemplo, os aceleradores utilizados para produzir isótopos radioactivos, críticos para a terapia do cancro, ou para produzir raios-x, fundamentais para fazermos imagens de sistemas biológicos ou para fazer a análise estrutural de estruturas metálicas, como pontes ou aviões.

### Em que consiste o projecto?

Com este projecto pretendemos estudar e identificar os processos de aceleração de partículas em ondas de choques relativistas com recurso a simulações numéricas nos maiores supercomputadores do mundo. Supõe-se que a aceleração em ondas de choques é o principal mecanismo responsável pelos raios cósmicos, as partículas mais energéticas do Universo, mas até agora os mecanismos de aceleração responsáveis pela aceleração dos raios cósmicos continuam por identificar inequivocamente. O trabalho a desenvolver na ERC Advanced Grant "Accelerates" explorará a física responsável pela formação dos choques e pela aceleração das partículas nestas ondas de choque. A equipa do IST analisará ainda a possibilidade de reproduzir em laboratório estas ondas fortemente não lineares e assim aproveitar estes mecanismos para gerar fontes de partículas energéticas relevantes para a biologia, medicina e ciência dos materiais.

### Por que acha que esta área da física é interessante?

Os raios cósmicos são as partículas mais energéticas que observamos na Terra e estão na origem de várias questões centrais para a Física Moderna. Tentar responder a estas questões, a sua ligação com as ondas de choque e a possibilidade de as explorar em laboratório, implica ligar metodologias e técnicas de muitas áreas da física, desde a astrofísica à física estatística, da física dos plasmas à computação paralela e aos lasers. Representa assim não só um enorme desafio intelectual como nos permite explo-

# Porque que é que os fios eléctricos são cobertos de plástico?

Constança Providência



Lanterna e lanterna aberta

## Material

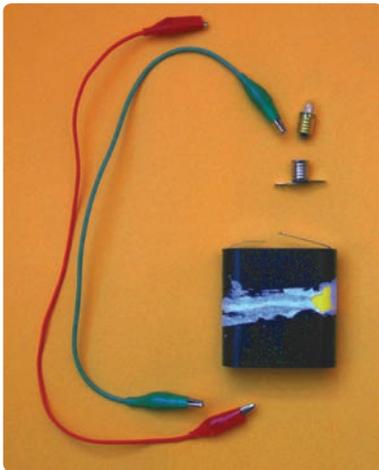
lâmpada  
casquilhos  
pilha de 4,5 V  
vários fios com crocodilos ou cliques  
materiais diversos

## Como funciona uma lanterna?

Sabes como funciona uma lanterna? O que é que existe no seu interior que permite acender a lâmpada quando o desejas? É fácil ver o interior das lanternas que têm a forma de um paralelepípedo achatado. Abre uma destas pilhas e desloca o interruptor para cima e para baixo. Observa o que acontece.

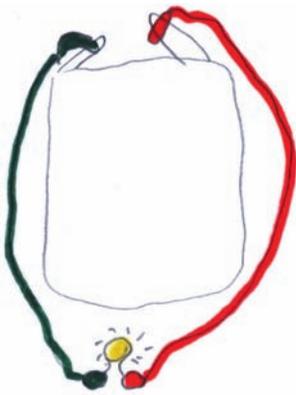
## Lanterna e lanterna aberta

Para entenderes bem como funciona uma lanterna, constrói a tua própria lanterna. Vais precisar de uma pilha de 4,5 V, uma lâmpada pequena, um casquilho e dois fios, tal como vês na figura.



Material para montar uma lanterna

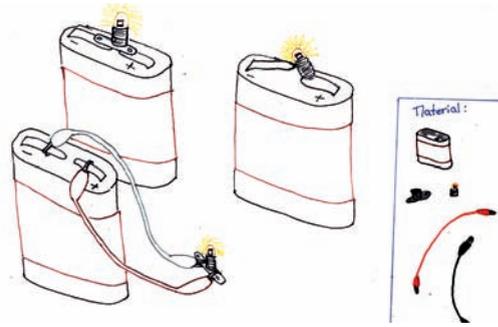
Os dois fios têm na extremidade dois crocodilos que permitem prender os fios a onde quiseres sem que eles se soltem. Já deves ter percebido de onde vem o nome: não achas que são parecidos com a cabeça de um crocodilo? Agora atarraxa a lâmpada no casquilho e descobre como deves ligar os fios ao casquilho e à pilha de modo a acender a lâmpada. Conseguiste? Basta ligar um dos fios a um dos pólos da pilha e a uma das extremidades do casquilho, e o outro fio ao outro pólo da pilha e à outra extremidade do casquilho. Os pólos da pilha são as duas fitas metálicas de saem da pilha. Faz um desenho da tua lanterna!



Montagem de um circuito com lâmpada ligada

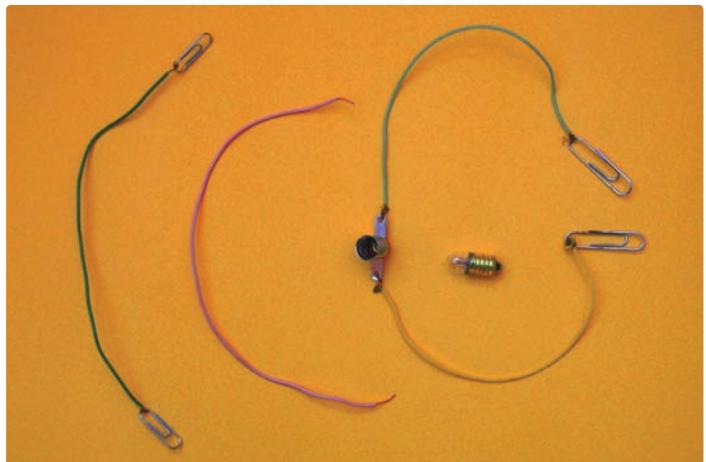
Na verdade os fios não são essenciais. Podes acender a lâmpada apenas tocando com o casquilho directamente nos pólos da pilha. Consegues acender? Os fios só são precisos para fazermos a montagem sem precisarmos de segurar a pilha e o casquilho com a lâmpada.

Mas será que o casquilho também é essencial, ou só o usamos para tornar a montagem mais fácil? Retira o casquilho e tenta acender a lâmpada aproximando-a da pilha. Repara que só na posição correcta a lâmpada se acende. Consegues? A rosca da lâmpada deve tocar num dos pólos da pilha e a ponta inferior da lâmpada no outro pólo.



Como acender a lâmpada usando fios e casquilho com lâmpada, casquilho com lâmpada ou apenas lâmpada (desenho de Rita Wolters).

Em vez de fios com crocodilos podes usar fios simples que compras numa loja de electrónica. Corta o fio em bocados com cerca de 20 cm de comprimento. Descasca as extremidades de ambos os lados de modo a ficares com o metal à vista e prende a cada extremidade um clipe. Os cliques fazem as vezes dos crocodilos. Numa loja de material eléctrico também compras as lâmpadas, casquilhos e pilhas. Para descascar as extremidades dos fios terás de usar um alicate especial.



Prepara os teus próprios fios com cliques e o auxílio de um alicate especial.

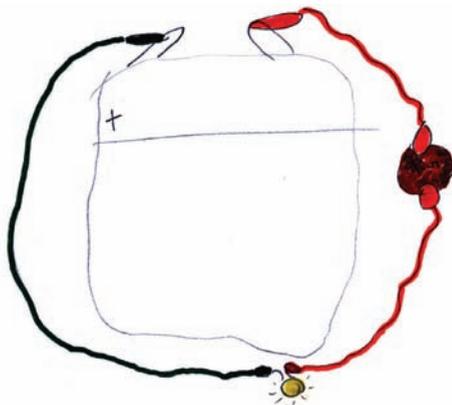
### Materiais condutores e materiais isoladores

Mas afinal porque é que os fios eléctricos têm metal no interior e plástico à volta? Faz a seguinte experiência. Monta o circuito novamente, de modo a acender a lâmpada, mas usa três fios: fazes o mesmo que fizeste anteriormente mas

agora ligas dois dos fios um ao outro usando os crocodilos. Se separares os fios ligados entre si o que acontece à lâmpada? Não acende porque o circuito está aberto e não se forma uma corrente eléctrica que atravessa a lâmpada. Experimenta colocar diferentes materiais entre os dois fios: um bocado de papel, um prego, um bocado de papel de alumínio, uma moeda, um bocado de plástico, um bocado de fio de cobre, um lápis (a madeira e a mina do lápis) e outros materiais que queiras testar. Anota as tuas observações numa tabela com três colunas: no topo da primeira coluna escreve **Material**, no topo da segunda escreve **Acende** e no topo da terceira escreve **Não Acende**. Usa uma linha nova para cada material.

Material	acende	não acende
papelão		X
esferovite		X
pano		X
prata	X	
moeda	X	
carica	X	
elástico		X
prego	X	
lápis madeira		X
lápis grafite	X	
plástico		X
fio de cobre	X	

Materiais condutores e não condutores.



Circuito para testar se um material é condutor.

Chamamos condutores aos materiais que conduzem a electricidade, formando-se uma corrente eléctrica (a lâmpada acende), e isoladores aos materiais que não conduzem a electricidade (a lâmpada não acende). Dos materiais que testaste quais são isoladores? E quais são condutores?

### Fios eléctricos cobertos de plástico

Agora já sabes porque é que os fios eléctricos têm um metal dentro, geralmente cobre, e porque é que são forrados

a plástico por fora. Precisas do metal para conduzir a electricidade. O plástico protege-te e não te deixa apanhar um choque se tocares num fio.



Fio eléctrico usado nas instalações eléctricas das nossas casas.

Observa um bocado de fio eléctrico dos que são usados na instalação eléctrica das nossas casas: são grossos e constituídos por três fios mais finos. Dois dos fios são como os dois fios de que precisaste para acender a lâmpada. O terceiro fio protege-te e, no caso de algo correr mal, a electricidade é conduzida directamente para a Terra através deste fio em vez de atravessar o teu corpo. A corrente eléctrica nos fios da nossa casa não é como a corrente que se forma no teu circuito com uma pilha: é tão forte que nos pode matar se tocarmos directamente na parte metálica dum fio ligado. Toma sempre muito cuidado com tomadas e aparelhos eléctricos.

### Agradecimentos

Esta actividade foi realizada na turma do 2A da Escola EB1 da Solum em Coimbra no âmbito da disciplina Estudo do Meio. Agradeço a toda a turma e à Professora Conceição Nave o entusiasmo com que descobriram como funciona uma lanterna. Agradeço à Rita o desenho.

Material	acende	não acende
papelão		X
esferovite		X
pano		X
prata	X	
moeda	X	
carica	X	
elástico		X
prego	X	
lápis (madeira)		X
lápis (grafite)	X	
plástico		X
fio de cobre	X	

# Físicos hospitalares: uma reflexão

M.<sup>a</sup> da Conceição Abreu<sup>1</sup>  
Luís Peralta<sup>2</sup>

1. Dep. Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve  
2. Dep. Física, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

**Em 1895 Roentgen descobriu os raios x, que começaram logo a ter aplicações médicas. No ano a seguir, Becquerel descobre a radioactividade. Os estudos que se seguiram feitos pelos Curie - Maria e Pierre - e muitos outros físicos, proporcionaram também aplicações médicas quase imediatas.**

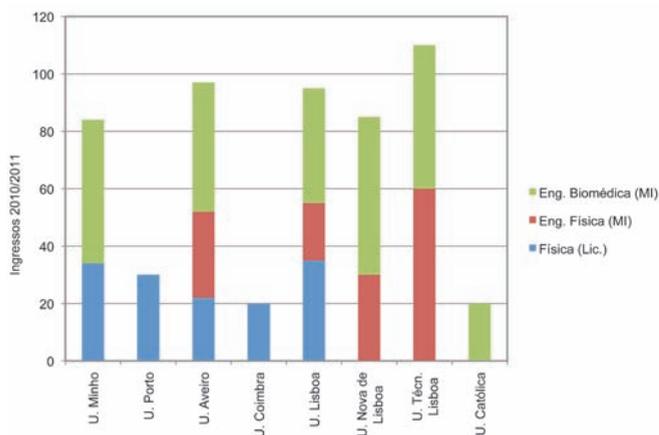
Em 6 de Agosto de 1945 é lançada a bomba atómica sobre Hiroshima e na sua fabricação participaram, como sabemos, físicos. Neste acto de loucos morre muita população por ter estado exposta a doses muito elevadas de radiação ionizante. Coincidência ou não, na década de 1950 já temos físicos a trabalharem nos hospitais em quase toda a Europa incluindo Portugal! E ontem como hoje as especialidades previstas para físicos hospitalares são as mesmas: Radiologia, Medicina Nuclear e Radioterapia, isto é, na área do uso da radiação ionizante. Contudo, nestas três especialidades só há um número relevante de físicos em Medicina Nuclear e Radioterapia.

Posteriormente, assistimos a que nos países onde a oncologia tem maior desenvolvimento e, mais ainda, naqueles onde existem reactores nucleares industriais, começaram a existir programas de formação de físicos com ênfase nas radiações ionizantes

ou mesmo quase exclusivamente a elas dedicados. Para exemplificar esta correlação entre a formação e carreira de físico hospitalar e a indústria nuclear basta recordar a excelente formação e carreira destes profissionais na vizinha Espanha. Este país tem no momento sete reactores em funcionamento e um a ser desmontado. Em Espanha dois dos reactores situam-se em Almaraz à beira Tejo a 100 km da fronteira portuguesa. Mas esta proximidade teve até hoje pouca influência na formação e carreira dos físicos hospitalares portugueses, que estão especialmente confinados aos serviços oncológicos.

É óbvio que, no século XXI, o contributo de quem sabe Física nos hospitais ou nas unidades de saúde seria extraordinariamente valioso, para os doentes e para os cofres do Estado, em áreas que vão para além da oncologia. Um uso com mais qualidade e eficácia dos múltiplos equipamentos modernos seria desejável para todos, em virtude de estarmos a falar de equipamentos de grande complexidade e elevado custo inicial e manutenção (por exemplo, um acelerador de Radioterapia tem um custo da ordem de dois milhões de euros, e uma unidade de ressonância magnética custa cerca de um milhão).

Quando falamos em alguém que saiba Física, referimo-nos não só a graduados em Física, mas a Engenheiros Físicos e Engenheiros Biomédicos, desde que nestes cursos exista um número razoável de créditos em Física e Matemática. O país conta no presente com cerca de 16 cursos nestas áreas, distribuídos essencialmente a Norte do Tejo como se pode ver no gráfico.



Ingressos em Eng. Biomédica, Eng. Física e Física, por universidade (ano 2010/11)

Actualmente existe entre uma a duas centenas de físicos e afins a trabalhar em hospitais públicos e privados, mas todos lastimamos a ausência de uma formação específica, reconhecida e funcional. Seria muito vantajoso que os diplomados acima referidos dispusessem de formação hospitalar de dois anos, com uma parte curricular e estágio em hospital. A complexidade do que estamos a falar implica que o estágio deveria ter pelo menos 12 a 15 meses de duração efectiva.

Após esta formação teríamos não só recursos humanos competentes para serviço nos hospitais ou unidades de saúde, como também aptos a migrarem para empresas de equipamentos hospitalares, laboratórios vários, grupos de investigação e ensino superior.

Hoje já temos muitos dos nossos diplomados a trabalhar nestas empresas nas área de manutenção, controlo de qualidade, certificação, assessoria etc. mas se pudessem contar com uma formação do tipo da descrita estariam muito mais bem preparados para o desempenho das suas funções, inclusive os que pretendessem seguir uma carreira mais académica.

Voltando à reflexão feita no início, a análise fria dos processos humanos e sociais leva-nos a concluir que o ditado “casa roubada, trancas à porta” é o nosso modo de vida. Estaremos ainda à espera do ladrão?

## Correio dos leitores

### Doutoramentos em Física

Em relação a informação publicada na Gazeta de Física Vol. 33, No 2, pág. 43, no artigo “Doutoramentos em Física”, da autoria de Augusto Barroso, relativo ao número de doutoramentos em Física em diversos períodos para diversas instituições universitárias em Portugal, o Centro de Física da Universidade do Minho informa que os números referentes à Universidade do Minho não reflectem a realidade deste Centro de Investigação, pois no período de 2000–2008 foram publicadas 41 teses de doutoramento orientadas ou co-orientadas por membros do Centro de Física da Universidade do Minho, e não 10, como indicado no artigo.

### Senentxu Lanceros-Mendez

Director, Centro de Física da Universidade do Minho

### Resposta de Augusto Barroso:

O meu critério está claramente indicado no artigo: são doutoramentos em Física os que estão classificados como tal na base de dados do Ministério da Ciência. Foi aliás com este critério que o júri atribuiu o prémio Bragança Gil de 2010 a uma tese co-orientada por um professor da sua universidade. Quando se consulta a base de dados do MCTES verifica-se que muitas das teses que considera como sendo de Física são consideradas como Ciência dos Materiais, Química, Engenharia, etc.

Estas definições não são verdades universais e têm algum grau de arbitrariedade, como aliás todas as classificações. O artigo chama a atenção para este ponto, em especial no caso de dissertações em áreas interdisciplinares de fronteira. A Ciência dos materiais, em que o Centro de Física da Universidade do Minho desenvolve grande actividade é um exemplo deste caso. Conheço muito bem a sua Universidade, onde hoje são professores alguns dos meus ex-alunos, e nunca cometeria a indelicadeza de a desconsiderar.

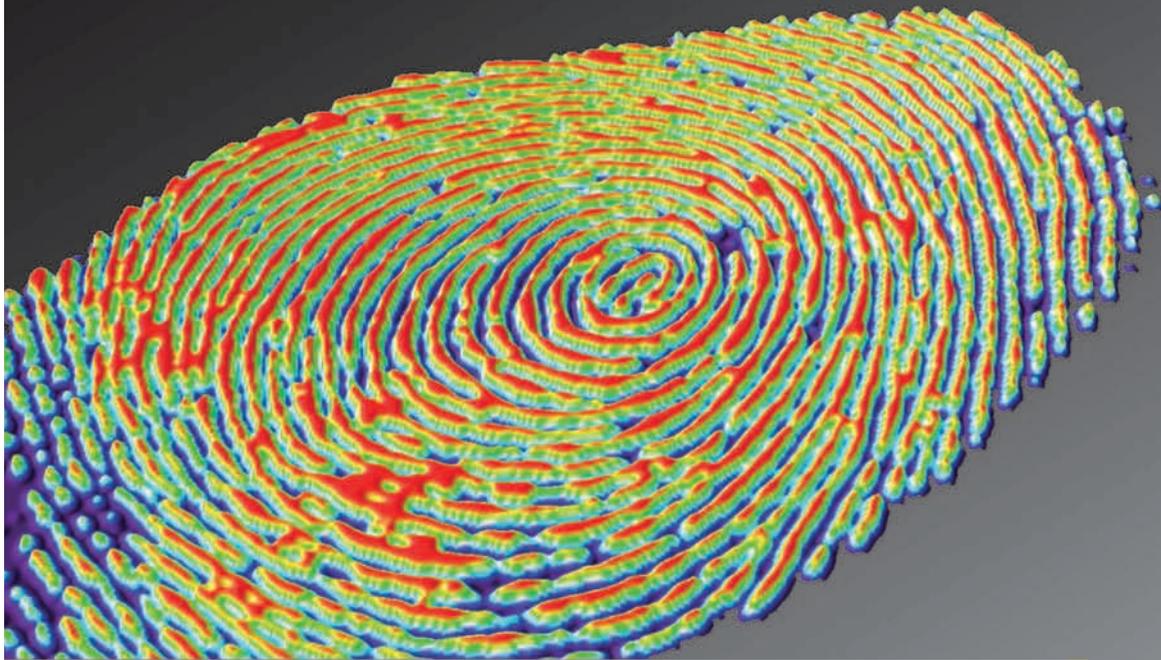
# A energia do país passa por nós.

Fazer chegar a energia onde ela é necessária é uma das nossas missões. Sempre com consciência e preocupação a nível social e ambiental e com altos critérios de qualidade e segurança. Por isso, a REN – Redes Energéticas Nacionais – assegura um canal de transporte eficaz de toda a energia do país, seja ela de muito alta tensão ou de alta pressão tendo em conta os elevados padrões de exigência do mercado. Porque é no futuro de todos nós que dedicamos toda a nossa energia – Electricidade ou Gás - onde é preciso. Em todo o país.



Redes de confiança





## call for papers

A Gazeta de Física convida os seus leitores a submeterem propostas (abstracts) de artigos nos seguintes temas:

Física aplicada à biologia e medicina

encerrado a 18 de Junho

Lasers e aplicações: em comemoração do 50<sup>o</sup> aniversário da invenção do laser

encerrado a 17 de Setembro

História e protagonistas da física em Portugal no séc. XX

Prolongado até 28 de Fevereiro de 2011

A Gazeta de Física publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física.

Mais informações em [www.gazetadefisica.spf.pt](http://www.gazetadefisica.spf.pt)