



## Edição especial: Lasers e aplicações

Os 50 anos do laser em Portugal  
O que sabemos sobre Fukushima

# Índice

artigo geral

- 2 **Lasers sintonizáveis em metrologia absoluta de distâncias para** Instrumentação espacial  
Alexandre Cabral, José Manuel Rebordão, Manuel Adler Abreu
- 8 **O laser na realização prática** da definição do metro  
Fernanda Saraiva, Liliana Eusébio, Sílvia Gentil, Eduarda Filipe
- 12 **O LASER na Defesa:** o seu futuro em Force Protection  
João M. P. Coelho, J. Cabrita Freitas
- 17 **Escrita de dispositivos ópticos** integrados com laser de femtosegundos  
Luís A. Fernandes, Jason R. Grenier, Peter R. Herman, J. Stewart Aitchison, Paulo V. S. Marques
- 22 **Lasers de Fibra Óptica de Alta Potência:** conceito, limitações e aplicações  
M. Melo, J. M. Sousa, M. O. Berendt, S. T. Hendow, J. R. Salcedo
- 29 **Novos avanços utilizando** random lasers em fibra óptica  
Orlando Frazão, Manuel B. Marques
- 33 **Laser sintonizável** de fibra óptica em anel  
Paulo Antunes, Paulo André
- física sem fronteiras
- 37 **LASERLAB Europe** o laser sem fronteiras  
Gonçalo Figueira

física e sociedade

- 40 **Os 50 anos do laser** em Portugal  
M. Ribau Teixeira, G. Figueira, J. Mendanha Dias, D. Liang, A. Pereira Leite, H. Crespo

crónica: pensamentos quânticos

- 46 **Aos ombros** de gigantes  
Jim Al-Khalili

crónica: física divertida

- 47 **A Europa** da Física  
Carlos Fiolhais

- 48 **Notícias**

Catarina Espírito Santo, Eduarda Filipe, Olivier Pellegrino, Laurinda Leite

gazeta ao laboratório

- 51 **Holografia:** um projecto para o ensino secundário  
Maria Cecília Silva

vamos experimentar

- 55 **Como funciona** uma balança?  
Constança Providência

onda e corpúsculo

- 57 **O acidente na** central nuclear de Fukushima-I: o que sabemos  
José Marques

Imagem da capa: <http://www.sxc.hu/photo/63588>

Publicação Trimestral Subsidiada



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



## Edição especial – Lasers e aplicações

Jornalistas de todo o mundo apinhavam-se numa sala do Hotel Delmonico, Nova Iorque, num dia quente de Julho de 1960. Estavam a aguardar uma conferência de imprensa convocada pelos Laboratórios Hughes, para anunciar uma nova e importante descoberta da ciência americana. A excitação na sala deu lugar ao silêncio quando o orador – um jovem desconhecido de 32 anos, de aspecto discreto – começou a sua apresentação com estas palavras: “Bom dia, senhoras e senhores. Estamos hoje aqui para vos anunciar que o Homem alcançou com sucesso um objectivo que os cientistas perseguiram há muitos anos. Pela primeira vez na História, conseguimos criar uma fonte de luz coerente.”

O jovem desconhecido, de seu nome Theodore Maiman, acabara de anunciar ao mundo a invenção do laser, que ele próprio demonstrara há pouco menos de dois meses atrás, a 16 de Maio, no culminar de um empreendimento solitário. Nesta conferência de imprensa, Maiman tinha dois objectivos principais: explicar ao mundo o que é que a tal “luz coerente” tinha de revolucionário, e convencer os outros cientistas que tinha sido ele – a trabalhar com financiamento relativamente reduzido num laboratório de investigação em aeronáutica, e não numa grande universidade – o primeiro a demonstrar acção laser de forma inequívoca.

Se o segundo objectivo ficou ligado a uma controvérsia e uma batalha legal cujos ecos ainda hoje perduram, o primeiro foi plenamente alcançado – se bem que, em alguns casos, não exactamente pelos motivos mais nobres. Depois de Maiman descrever em detalhe aos repórteres presentes em que consistia a luz coerente, o seu potencial para comunicações à distância, aplicações industriais, médicas e biológicas, detecção, medida, tratamento de materiais, entre outras – numa notável síntese visionária do que efectivamente viria a acontecer – foi abordado por um jornalista que lhe perguntou se esta nova fonte de luz também poderia ser usada como arma. Maiman respondeu que era uma possibilidade. No dia seguinte, o título preferido nos cabeçalhos dos jornais foi: “Homem inventa raio da morte”...

Passadas cinco décadas sobre este episódio, é impressionante constatar o vastíssimo número de aplicações em que o laser veio a ter um papel fundamental, da mesa do laboratório até às nossas casas. Desde o primeiro laser de rubi de Maiman, muitos outros tipos foram demonstrados,

e o número de patentes relacionadas alcança as largas dezenas de milhar.

Em comemoração desta data, no ano passado a Gazeta convidou os seus leitores a submeterem trabalhos sobre lasers e suas aplicações. Para nossa grande satisfação, a resposta foi significativa: tivemos submissões de norte a sul, a partir de grupos sediados em universidades, institutos e empresas. Os artigos principais que publicamos nesta edição especial são um testemunho importante daquilo que hoje se faz de melhor em Portugal nesta área, e quero aproveitar esta oportunidade para agradecer aos autores pela sua colaboração.

Talvez os nossos leitores mais jovens não saibam (e talvez alguns dos mais velhos não se recordem!) mas, há 25 anos atrás, já a Gazeta tinha dedicado um número especial aos lasers – nessa ocasião, naturalmente, em comemoração do 25º aniversário. Dava-se então uma perspectiva do que eram os lasers, e quais as aplicações dos mesmos em temas como a holografia, o processamento de materiais e a química. Travei conhecimento com um dos autores de então, o Prof. Manuel Ribau Teixeira, e lancei-lhe o desafio de fazer um levantamento da evolução do laser em Portugal, dada a sua perspectiva privilegiada de actor e testemunha deste processo. Muito gentilmente, ele concordou, e empreendeu um trabalho de pesquisa – diria quase, de detective – que o levou a viajar por vários locais, a recolher documentos e fotografias, e a conversar com alguns dos principais intervenientes. Muito lhe agradeço pela sua disponibilidade e pelo empenho com que aceitou este convite. Publicamos neste número a primeira parte do seu artigo, que será complementado na próxima edição.

No âmbito da minha profissão, contacto frequentemente com investigadores estrangeiros desta área, e não posso deixar de verificar com satisfação que ficam positivamente impressionados com a diversidade e a qualidade da investigação que se faz com lasers em Portugal. Isso é também atestado pelo crescente número de artigos científicos e de parcerias internacionais. Neste aspecto, permitam-me chamar a atenção para o texto em que apresento o consórcio Laserlab-Europe: em particular, a possibilidade de acesso sem custos a alguns dos mais avançados laboratórios laser europeus é uma oportunidade que merece ser aproveitada!

Faço votos de que esta edição da Gazeta possa ser inspiradora e elucidativa, e – porque não? – que haja jovens que se sintam motivados pelo que lerem aqui a juntarem-se ao crescente número de profissionais dos lasers, da óptica, e da fotónica, áreas cruciais para as tecnologias emergentes do presente século. Quem sabe, algum dia será um deles a dar uma conferência de imprensa – mas desta vez, a anunciar uma grande descoberta da ciência portuguesa.

Gonçalo Figueira

### 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)

#### Secretariado

Maria José Couceiro - mjose@spf.pt

#### Colunistas e Colaboradores regulares

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

#### Colaboraram também neste número

A. Pereira Leite, Alexandre Cabral, Catarina Espírito Santo, Dawei Liang, Eduarda Filipe, Eduarda Filipe, Fernanda Saraiva, Hélder Crespo, J. Cabrita Freitas, J. Mendanha Dias, J. Stewart Aitchison, Jason R. Grenier, João M. P. Coelho, João M. Sousa, José Manuel Rebordão, José Marques, José R. Salcedo, Laurinda Leite, Liliana Eusébio, Luís A. Fernandes, M. Cecília Silva, M. Ribau Teixeira, Manuel Adler Abreu, Manuel B. Marques, Martin O. Berendt, Miguel Melo, Olivier Pellegrino, Orlando Frazão, Paulo André, Paulo Antunes, Paulo V. S. Marques, Peter R. Herman, Sami T. Hendow, Sílvia Gentil

#### 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.

# Lasers sintonizáveis em metrologia absoluta de distâncias para Instrumentação espacial

Alexandre Cabral, José Manuel Rebordão, Manuel Adler Abreu

Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Física, Centro de Astronomia e Astrofísica (CAAUL),  
Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa

Alexandre.Cabral@fc.ul.pt

## Resumo

A Interferometria óptica é uma das mais interessantes técnicas para a metrologia absoluta de comprimento. Sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços do interferómetro, a medição da diferença de percurso óptico (DPO) entre esses mesmos braços é feita através da utilização de um comprimento de onda sintético resultante de um varrimento na frequência óptica de um laser sintonizável, implementando-se deste modo a técnica de medida absoluta de distâncias designada por Interferometria de Varrimento de Frequência (IVF). Sensores baseados nesta técnica podem desempenhar um papel importante na cadeia metrológica de instrumentos espaciais constituídos por vários satélites independentes a trabalhar cooperativamente, cadeia esta que permite levar a configuração desde o momento em que os diversos satélites são colocados no espaço até ao instante em que estão alinhados e prontos para iniciar a sua tarefa científica.

## Introdução

A metrologia de distâncias, baseada em interferometria óptica, é utilizada para um vasto conjunto de aplicações, com diferentes gamas de medição e resoluções. Em 1887, A. Michelson, em conjunto com o físico E. Morley, implementaram uma experiência com o objectivo de determinar se a velocidade da luz seria ou não independente da velocidade do observador. A experiência de Michelson-Morley e o impacto das suas conclusões, foi a semente da nova ciência da interferometria. Michelson rapidamente reconheceu o potencial da sua invenção, o interferómetro, para a instrumentação de elevada exactidão. Desde o seu início, o interferómetro tem sofrido uma série de modificações e especializações resultantes de novos desenvolvimentos, principalmente no que diz respeito à fonte de luz, como é o caso do desenvolvimento de lasers de frequência sintonizável.

A preparação de diversas missões espaciais baseadas em instrumentos constituídos por satélites independentes a trabalhar cooperativamente, nomeadamente os telescópios de abertura múltipla, fez aumentar significativamente a importância da metrologia óptica, por envolver incertezas da ordem das dezenas de micrómetro na medição de distâncias superiores à centena de metros. Nessas missões, a metrologia absoluta de comprimento é fundamental, e a IVF constitui uma das técnicas mais promissoras para desempenhar essa tarefa. A complexidade de um sensor baseado nesta técnica pode ser ajustada às especificações do sistema: quando os requisitos são modestos, a complexidade do sensor pode ser reduzida, aspecto relevante em aplicações espaciais.

A técnica existe, pelo menos, desde os anos 80 [1], mas não foi estudada extensivamente até ao recente desenvolvimento dos laser díodo de cavidade externa (LDCE) que permitem fazer uma variação controlada da frequência óptica da radiação por eles emitida sem alteração de modos.

## O laser sintonizável

Os lasers sintonizáveis são dispositivos que podem ser configurados para funcionar em vários comprimentos de onda. Apesar de parecer um contra-senso, uma vez que se associa ao laser a característica de monocromaticidade, a radiação emitida por estes dispositivos não deixa de ter as características da radiação laser, nomeadamente a coerência espacial e temporal, ligadas fortemente ao conceito de pureza espectral. O que os distingue dos outros lasers é o facto de poderem ser configurados de um modo expedito para funcionar noutros comprimentos de onda e, dentro de determinados limites, manter

todas as características que os definem como laser, designadamente em termos de coerência.

A modificação das características espectrais do laser pode ser obtida por diversos processos, em particular, alterando as especificações do bombeamento eléctrico (corrente de polarização), a temperatura e, talvez de um modo mais evidente, o comprimento da cavidade ressonante.

Uma vez que as cavidades de ressonância dos lasers permitem a oscilação de vários modos longitudinais, é possível seleccionar por filtragem dentro da cavidade o modo que deve prevalecer e, desta maneira, condicionar a resposta espectral do dispositivo [2].

Estes lasers podem ser utilizados num vasto leque de aplicações, desde a espectroscopia, comunicações ópticas, a metrologia de frequências ou a metrologia de comprimentos, entre outros.

A técnica de IVF baseia-se precisamente neste tipo de lasers, em que é possível variar contínua e linearmente o comprimento de onda de emissão dentro de um intervalo de frequências ópticas que limita intrinsecamente a exactidão da medida da distância absoluta. Como será explicado mais adiante, quanto maior a gama de variação de frequência, menor será o comprimento de onda sintético que servirá para medir a distância, tendo-se deste modo uma maior resolução.

Os requisitos da técnica utilizada implicam que o laser tenha capacidade de cobrir um espectro de frequências ópticas da ordem das várias dezenas de GHz, e que permita o seu controlo a taxas da ordem das dezenas de Hertz. Para garantir que o sistema de medida não seja limitado pelo comprimento de coerência do laser, é necessário também garantir que a largura espectral seja pequena – basicamente, que a radiação tenha uma pureza espectral elevada.

A circunstância de o sistema metrológico dever ser dedicado a aplicações no espaço acrescenta mais alguns requisitos, uma vez que deverá ser necessário privilegiar configurações de pequenos volume e consumo, a par de grande flexibilidade de aplicação. Este conjunto de requisitos leva a optar por dispositivos como os lasers díodo, configurados em modo de cavidade externa.

Estes lasers de semicondutor são baseados num laser díodo em que apenas uma das faces é espelhada, sendo a cavidade completada com elementos ópticos exteriores ao dispositivo, em particular uma lente de acoplamento e um espelho parcialmente reflector. A sintonia espectral destes lasers é obtida, de um modo geral, através de um elemento dis-

persor variável na cavidade ressonante, utilizando redes de difracção, em configurações conhecidas como de Littrow ou Metcalf-Litmann [2]. É comum neste tipo de dispositivos conseguirem-se linhas espectrais com larguras da ordem do MHz, que correspondem a comprimentos de coerência da ordem de algumas centenas de metros.

## Interferência e interferometria óptica – Os interferómetros de Michelson e de Fabry-Perot

Quando dois ou mais feixes de luz se sobrepõem num determinado ponto do espaço, pode ocorrer um fenómeno que dificilmente será descrito por um processo linear [5]. De facto, a composição destes feixes pode conduzir a situações em que, na zona de sobreposição, a luminosidade é superior à dos dois feixes individuais ou, em outros casos, à ausência total de luz. Este fenómeno, designado por interferência, resulta então da soma dos campos electromagnéticos das duas fontes de radiação que, desde que sejam coerentes (em que a fase relativa entre os dois campos se mantém constante ao longo de determinado período de tempo), conduzem a um processo construtivo (se as fontes de radiação estão em fase) ou destrutivo (se estão em oposição de fase).

A diferença de fase entre as duas fontes de radiação produz assim efeitos diversos no processo de interferência, dando origem a diferentes intensidades luminosas na zona de sobreposição. Este é o fenómeno por trás de todas as técnicas baseadas em interferometria. O interferómetro de Michelson é a configuração mais comum em interferometria óptica e foi inventado por Albert Michelson com o objectivo de determinar se a velocidade da luz seria ou não independente da velocidade do observador. Neste caso, um padrão de interferência é produzido pela divisão de um feixe de luz em dois caminhos, nos quais os feixes são reflectidos e enviados de volta para serem recombinados num detector (tipicamente, o mesmo elemento que faz a divisão dos feixes volta a recombiná-los). Caminhos com comprimentos diferentes dão origem a diferentes intensidades no detector e, caso esta diferença varie no tempo, serão observadas franjas de interferência temporais: um ciclo por cada variação de  $\lambda/2$  na diferença entre percursos ópticos. A análise das variações desta intensidade permite assim a medida da diferença de fase e, no caso do interferómetro de Michelson, na medida da diferença do percurso óptico entre os dois feixes que estão a interferir. Como já se referiu, o processo de interferência construtiva ocorre quando os feixes que estão a interferir estão em fase. Isto acontece quando a diferença de percurso óptico entre eles seja de múltiplos inteiros do comprimento de onda  $\lambda$ .

No caso de um interferómetro de Fabry-Perot, a radiação oscila numa cavidade ressonante e produz franjas de interferência sempre que o comprimento de onda da radiação obedeça às condições de ressonância. No caso simples de dois espelhos planos separados de  $d$ , a condição de ressonância dá-se sempre que a frequência seja um múltiplo da Free Spectral Range que é igual a  $FSR=c/(2nd)$ .

Em Interferometria de Varrimento de Frequência (IVF) mede-se o valor absoluto da Diferença de Percurso Óptico (DPO) entre os dois braços de um interferómetro de Michelson [3-4]. Essa medição é realizada sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços desse interferómetro, através da geração de um comprimento de onda (CDO) sintético (muito maior que o CDO da radiação óptica portadora) resultante da variação da frequência do laser.

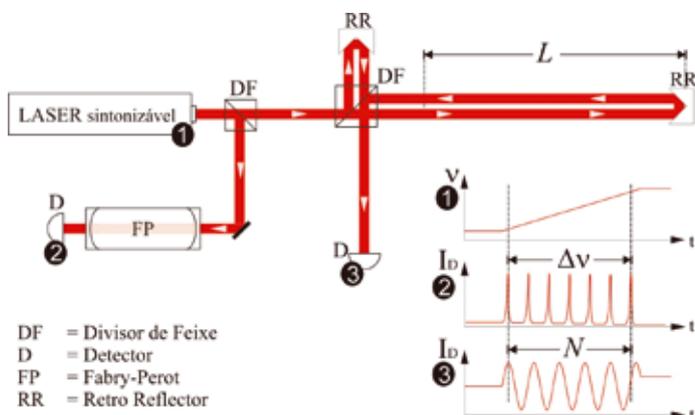


Fig. 1 - Configuração óptica de um sensor baseado em IVF e sequência temporal da frequência do laser e dos dois detectores.

À medida que se faz um varrimento na frequência do laser, um sistema de detecção conta o número de franjas sintéticas (temporais) sem ambiguidade. Ao contrário de outras técnicas, em IVF não é fundamental utilizar lasers estabilizados, sendo apenas necessário utilizar um laser sintonizável e um sistema capaz de medir a amplitude do varrimento de frequência (no nosso caso, baseado num interferómetro Fabry-Perot).

O CDO sintético  $\Lambda$ , obtido através da variação da frequência óptica de uma dada amplitude  $\Delta\nu$ , é dado por:

$$\Lambda = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz.

A amplitude da variação de frequência é medida através da contagem do número de ressonâncias num interferómetro de Fabry-Perot (FP). De modo a permitir o cálculo de  $\Lambda$ , o início e o fim da variação são determinados, respectivamente, pela primeira e última ressonância da cavidade do FP, sabendo-se que entre duas ressonâncias consecutivas a frequência variou de um *Free Spectral Range* (FSR – Banda Espectral Livre) do FP. Deste modo, a amplitude da variação é dada por:

$$\Delta\nu = r \cdot FSR \quad (2)$$

onde  $r$  é o número de FSR detectados (número de ressonâncias menos 1). A partir de (1) e (2) obtemos:

$$\Lambda = \frac{c}{r \cdot FSR} \quad (3)$$

À medida que a frequência vai variando, o sistema de de-

tecção conta o número total de períodos de franjas sintéticas ( $N$ ), não necessariamente inteiro, desde o início até ao fim do varrimento. A distância medida, metade da Diferença de Percurso Óptico (DPO) entre os braços do interferómetro, é dada por:

$$L = \frac{N}{2} \cdot \frac{\Lambda}{n} = \frac{N}{2} \cdot \frac{c}{r \cdot FSR \cdot n} \quad (4)$$

onde  $n$  é o índice de refração do meio de propagação.

A Fig. 1 mostra a configuração óptica de um sensor baseado em IVF e a evolução temporal da frequência do laser (1), das ressonâncias no detector do FP (2) e das franjas sintéticas no detector do interferómetro de Michelson (3).

### Aplicação de IVF à metrologia espacial

Como exemplo de aplicação de IVF à metrologia espacial, iremos descrever dois protótipos, distintos nas suas características, implementados à medida para as missões DARWIN (Fig. 2) e PROBA3 (Fig. 3) da Agência Espacial Europeia (ESA).



Fig. 2 - Concepção artística da missão Darwin na sua primeira configuração. (© ESA)



Fig. 3 - Concepção artística da missão PROBA3. (© ESA)

## Metrologia absoluta para a missão DARWIN

A missão DARWIN foi um estudo da ESA (terminado em 2007<sup>1</sup>) que tinha como objectivo a concepção de um instrumento baseado numa constelação de satélites para a procura de planetas idênticos à Terra. A configuração inicial (alterado durante o estudo) era constituída por um satélite central no meio de um hexágono cujos vértices continham seis telescópios com cerca de 1,5 m de diâmetro, todos voando em formação, distando do satélite central entre 50 m e 250 m. Deste modo, seria possível obter imagens de elevada resolução à custa da grande abertura sintética.

Um dos maiores desafios tecnológicos deste instrumento era o sistema de metrologia que garantia o controlo da constelação [6]. Os requisitos da metrologia absoluta exigiam um sistema capaz de medir a uma taxa de 10 Hz a diferença de distâncias entre pares de telescópios (diagonalmente opostos) e o satélite central, de forma a torná-la inferior a 10  $\mu\text{m}$ . No âmbito do projecto *High Precision Optical Metrology* (HPOM, Metrologia Óptica de Elevada Exactidão) da ESA, foi desenvolvido um protótipo de IVF como sensor de metrologia absoluta. Sendo o objectivo a equalização das distâncias entre os telescópios e o satélite central, como já foi referido, o importante é medir a diferença de distâncias. A Figura 4 mostra a configuração óptica do sensor para medir a diferença de distâncias entre um par de telescópios. O laser, o FP e todos os elementos ópticos estão localizados no satélite principal, e os espelhos retro-reflectores, que definem os braços do interferómetro, são colocados um em cada telescópio. Desta forma, a DPO deste interferómetro corresponde ao dobro da diferença entre telescópios. Note-se que, embora as distâncias entre telescópios e satélite central possam variar até 250 m, a diferença entre tais distâncias será sempre inferior a 1 m.

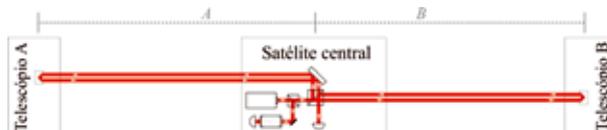


Fig. 4 - Configuração óptica para medição da diferença de distâncias entre os telescópios e o satélite central (A-B).

Neste protótipo (Figura 5) foi utilizado um laser LDCE a radiar nos 633 nm capaz de uma amplitude de variação de frequência de 150 GHz (variação de  $\lambda$  de 0,2 nm), correspondendo a um CDO sintético de aproximadamente 2 mm. A variação de frequência ocorre durante 50 ms, permitindo uma taxa de medição de 20 Hz. A cavidade do FP é estabilizada em temperatura e tem um FSR de 1 GHz. Os diversos sinais são totalmente adquiridos e posteriormente processados (Figura 6).

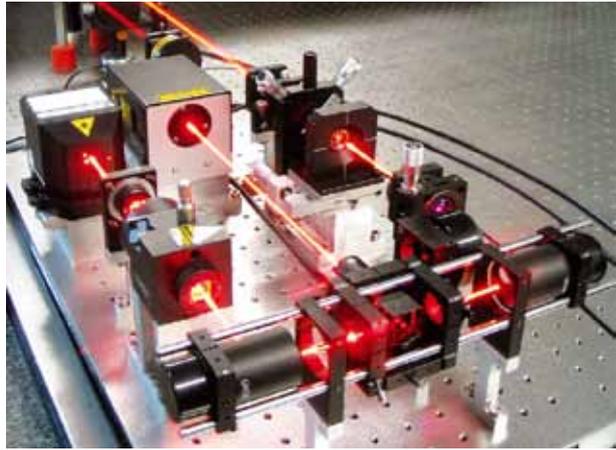


Fig. 5 - Protótipo implementado para a missão DARWIN. O feixe laser no topo esquerdo da imagem dirige-se para o divisor de feixe (não visível) que envia os dois feixes para os espelhos retro-reflectores situados nos telescópios.

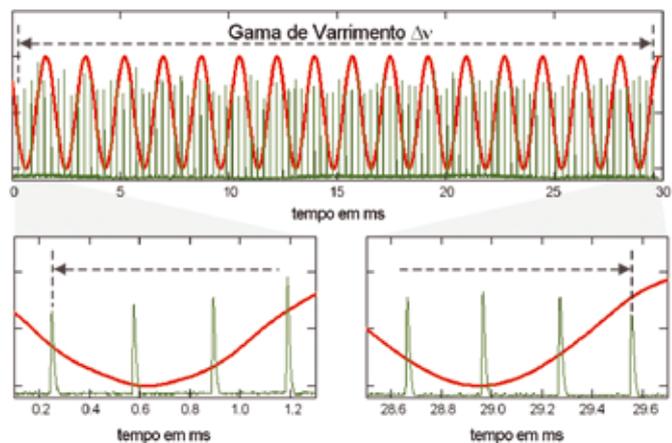


Fig. 6 - Sinais detectados em IVF: a vermelho as franjas sintéticas obtidas no interferómetro de Michelson e a verde as ressonâncias obtidas no interferómetro de FP, que vão surgindo no tempo à medida que a frequência do laser varia.

A Figura 7 mostra os resultados obtidos com este protótipo, verificando-se que para distâncias inferiores a 1 m a incerteza é sempre inferior a 10  $\mu\text{m}$ , sendo mesmo inferior a 3  $\mu\text{m}$  para distâncias inferiores a 100 mm [7].

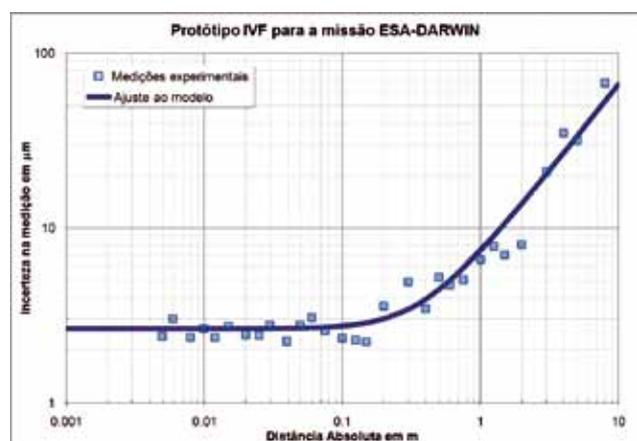


Fig. 7 - Incerteza na medição da diferença de distâncias entre telescópios para o protótipo da missão DARWIN.

<sup>1</sup> Na fase final do estudo, a configuração foi alterada para quatro satélites com telescópios em formação com cerca de 4 m de diâmetro cada. A ESA e a NASA chegaram a considerar uma possível colaboração em torno deste projecto que, no entanto, após a conclusão do estudo em 2007, não foi considerada para as fases seguintes.

## Metrologia absoluta para a missão PROBA3

PROBA3 é a terceira de uma série de missões da ESA para a validação de novos desenvolvimentos tecnológicos para o espaço. Planeada para ser lançada em 2016, a missão PROBA3 é constituída por dois satélites e irá demonstrar algumas das tecnologias necessárias para a formação em voo de satélites, nomeadamente a metrologia absoluta de distâncias. Paralelamente, será também incluído um instrumento para observar a coroa solar - um satélite vai voar na frente do Sol de forma a eclipsar o outro, revelando desta forma a coroa solar.

Os dois satélites (durante a fase de demonstração da metrologia) estarão separados de 150 m, e os requisitos sobre a medida desta distância é ter uma incerteza inferior a  $64 \mu\text{m}$  para uma taxa de medição de 10 Hz. Para o protótipo de demonstração definiu-se que a medida deveria ser realizada em torno dos 50 m, extrapolando depois os resultados para a distância final.

Como é facilmente observável nos resultados obtidos com o protótipo desenvolvido para a missão DARWIN, à medida que aumentamos a distância a medir, a incerteza também aumenta, consequência da propagação da incerteza no valor do CDO sintético (quanto maior a distância maior será o número de franjas sintéticas detectadas). Para ultrapassar esta limitação, introduziu-se uma fibra óptica longa no braço de referência do interferómetro de forma a reduzir a DPO medida, usando um interferómetro adicional para calibrar o percurso óptico correspondente à fibra (e que é subtraído na DPO da distância). Neste caso, o sensor passa a medir o equivalente a uma distância pequena ( $<10 \text{ m}$ ) e, simultaneamente, o percurso da fibra que (tendo um comprimento considerado constante), é medido várias vezes, permitindo deste modo reduzir o valor da incerteza do mesmo. Neste caso, a incerteza final é determinada por duas componentes: a incerteza na medição do valor residual da distância (após subtracção do comprimento da fibra) e a incerteza resultante da calibração da fibra. Neste protótipo foi utilizado um laser LDCE a radiar nos 1064 nm (para garantir a compatibilidade com outros sensores do satélite) capaz de uma amplitude de variação de frequência de 80GHz (variação de  $\lambda$  de 0,1 nm), correspondendo a um CDO sintético de aproximadamente 3,7 mm.

A Figura 8 mostra a implementação deste sensor em que os dois interferómetros (de medição da distância e do percurso óptico da fibra) usam o mesmo laser e FP.

Na implementação experimental do protótipo, a calibração da fibra é efectuada a cada 120 s, permitindo mais de 1000 medições do seu comprimento. A Figura 9 mostra o resultado obtido com a introdução da fibra e o que seria esperado com a configuração anteriormente implementada. A melhoria é quase de uma ordem de grandeza e a extrapolação para os 150 m permite mostrar que será possível cumprir os requisitos. Note-se que, comparativamente com a implementação anterior, a melhoria foi obtida apenas à custa da

introdução de alguns elementos ópticos adicionais e de uma fibra longa, mantendo-se deste modo a baixa complexidade do sensor [8].

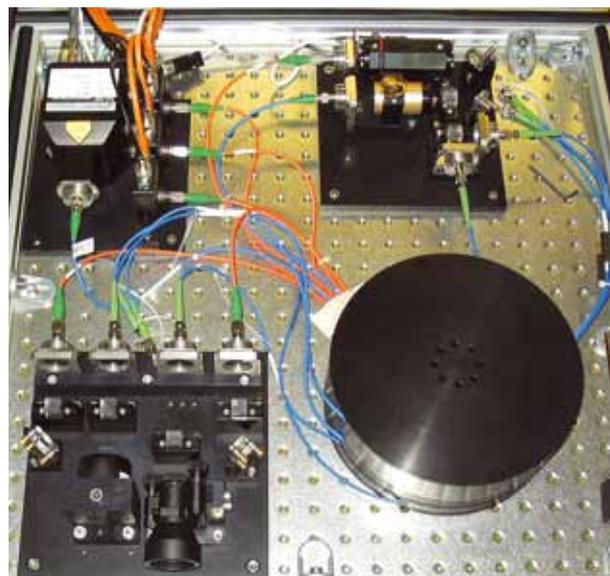


Fig. 8 - Protótipo implementado para a missão PROBA3. O sensor é constituído por 4 sub-unidades: o laser e os detectores (cima-esquerda), o interferómetro de FP (cima-direita), as ópticas que constituem os interferómetros (baixo-esquerda) e a fibra longa de referência (baixo-direita).

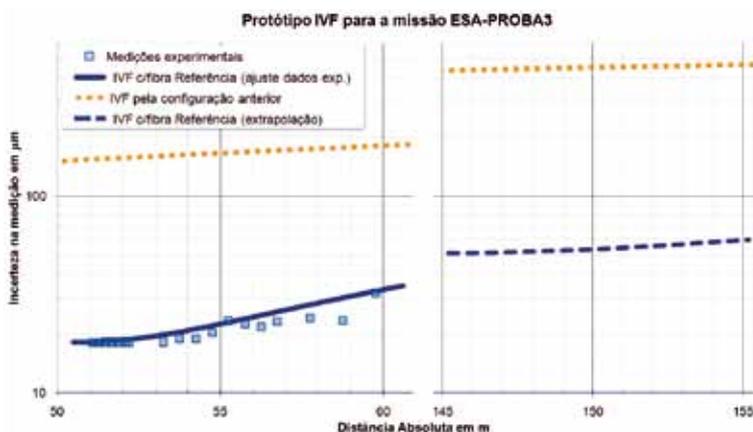


Fig. 9 - Incerteza na medição da distância absoluta entre satélites para o protótipo da missão PROBA3. Do lado esquerdo temos os resultados obtidos experimentalmente a cerca de 50 m e do lado direito e extrapolação para os 150 m.

Como conclusão, podemos constatar que foi possível construir um sensor interferométrico de elevada exactidão para uma aplicação tão exigente como é o caso da instrumentação espacial, em grande medida devido à versatilidade proporcionada pelos lasers sintonizáveis. Após 50 anos de vida, o laser tornou-se uma ferramenta que se generalizou para infinitas aplicações nas áreas científicas mais diversas. O espaço é uma das áreas onde o laser está a ser alvo de grandes desenvolvimentos, nomeadamente na sua qualificação para utilização neste ambiente específico, em vácuo e a temperaturas criogénicas.

1. H. Kikuta, K. Iwata, R. Nagata, "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light", *Applied Optics*, 25, 2976-2980 (1986).
2. Markus-Christian Amann, Jens Buus, "Tunable Laser Diodes" Artech House (1998).
3. A. Cabral, J. Rebordão, "Absolute distance metrology with frequency sweeping interferometry", *Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements III*; Jennifer E. Decker, Gwo-Sheng Peng; Eds., 195-204, Proc. SPIE 5879 (2005).
4. A. Cabral, J.M. Rebordão, "Metrologia Absoluta de Comprimento por Interferometria de Varrimento de Frequência", 2º Encontro Nacional SPMET, A Metrologia e o Crescimento Sustentado (2006).
5. Eugene Hecht, "Óptica", (tradução portuguesa de J. M. Rebordão) 2ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian (2002).
6. B. Calvel, I. Cabeza, A. Cabral, J. Rebordão, E. Manske, R. Sesselmann, Z. Sodnik, A. Verlaan, "High Precision Optical Metrology for DARWIN: Design and Performances", *Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics*, SP-554, ESA (2004).
7. A. Cabral, J. Rebordão, "Accuracy of frequency sweeping interferometry for absolute distance metrology", *Optical Engineering* 46(07), 073602 (2007).
8. A. Cabral, M. Abreu, J. Rebordão, "Dual-frequency sweeping interferometry for absolute metrology of long distances", *Optical Engineering* 49, Issue 8, 085601-085601-14 (2010).

### Alexandre Cabral

Nascido em 1968, licenciou-se em Física e obteve os graus de Mestre em Engenharia Física e o Doutoramento em Física respectivamente em 1993, 2000 e 2007, todos pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

De 1991 a 2008 foi investigador do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), trabalhando nas áreas da instrumentação óptica para a astronomia, em metrologia óptica para o espaço e em holografia e óptica difractiva em aplicações de segurança. Em 2009 foi transferido (juntamente com o Laboratório de Óptica Lasers e Sistemas) para a FCUL onde tem dado continuidade às actividades de I&D referidas.

É membro da Sociedade Portuguesa de Física, da Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE), da Sociedade Portuguesa do Laser Médico e da Sociedade Portuguesa de Metrologia.



### José M. Rebordão

Nascido em 1956, doutorou-se em 1983 em Estrasburgo e realizou a Agregação em 1992 em Física (Óptica). É Investigador Coordenador da FCUL, coordena o Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas e é, actualmente, sub-director da Faculdade.

Para além da docência, desde 1985, tem realizado investigação e desenvolvimento de tecnologia em óptica e nas aplicações astrofísicas e espaciais, em particular em ópticas difractivas para segurança, navegação óptica, instrumentação óptica para o espaço, telescópios de abertura múltipla, metrologia óptica e processamento de imagens. A actividade de I&D tem sido financiado essencialmente por empresas nacionais e por organizações científicas internacionais, tais como a ESA, ESO, FP7, EUMETSAT e as agências europeias ligadas às tecnologias de defesa. É membro da Sociedade Portuguesa de Física, da Optical Society of America (OSA), da Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE), da Sociedade Portuguesa do Laser Médico e da Sociedade Portuguesa de Metrologia.

### Manuel Abreu

Nascido em 1964, é licenciado em Engenharia Física pela Universidade Nova de Lisboa (1989) e é doutorado em Engenharia Física pela Universidade Técnica de Lisboa (1996).

Trabalhou no Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) desde

1987, como estagiário de investigação e posteriormente como investigador convidado, em áreas como óptica, optoelectrónica, metrologia óptica e lasers. É actualmente Investigador Convidado do Departamento de Física – Laboratório de Óptica Lasers e Sistemas e do Centro de Astronomia da Universidade de Lisboa.

Tem estado envolvido em actividades relacionadas com o desenvolvimento de sistemas de instrumentação óptica e fotónica para aplicações de metrologia, radar e lasers, no contexto de projectos financiados pela ESA, ESO, EDA e indústria.

É actualmente responsável por um projecto financiado pela ESA, relacionado com a utilização de lasers com bloqueamento de modo e pentes de frequência para aplicações de metrologia no espaço.



# O laser na realização prática da definição do metro

Fernanda Saraiva, Liliana Eusébio, Sílvia Gentil, Eduarda Filipe

Unidade de Metrologia Científica e Aplicada - Laboratório Central de Metrologia, Instituto Português da Qualidade (IPQ)

fsaraiva@mail.ipq.pt

## Resumo

O papel fundamental dos lasers no estado actual de desenvolvimento da realização prática da definição do metro, unidade de base da grandeza comprimento, do Sistema Internacional de Unidades (SI), os métodos de medição de frequências ópticas (e/ou comprimento de onda) e uma breve descrição da evolução histórica da definição e realização prática do metro, são os temas de fundo deste artigo.

## Introdução histórica

Desde o início do século XX – pouco após Albert Michelson, em 1887, propor o uso de interferómetros para a medição da grandeza comprimento – que a interferometria é utilizada como técnica para medição de distâncias. O interferómetro de Michelson (interferómetro de espelhos) baseia-se na interferência de dois feixes de luz provenientes da mesma fonte. Esta emite um feixe de luz que, ao atravessar um divisor de feixe, é separado em dois, sendo cada um enviado por um trajecto diferente. Após a sua reflexão em espelhos colocados a meio dos trajectos, os feixes são recombinados no divisor, gerando-se um padrão de interferência composto por franjas regularmente espaçadas. Se a distância de um dos trajectos for mantida fixa, quando o outro espelho se afasta de metade do valor do comprimento de onda do feixe, cada franja desloca-se de uma inter-franja e ocupa o lugar da franja adjacente. Contando o número de franjas numa dada posição de referência, é possível determinar a distância percorrida pelo espelho móvel. O comprimento de onda (ou frequência) do feixe de luz constitui o valor de referência da distância percorrida, pelo que o seu valor tem de ser conhecido com a exactidão máxima permitida pela evolução da tecnologia.

Como consequência destes trabalhos, em 1960 o metro passou a ser definido em função de um número de comprimentos de onda da luz. Esta redefinição (ver caixa) a partir de um comprimento de onda ia ao encontro das aspirações da metrologia no sentido de definir uma grandeza que pudesse ser realizada em qualquer local sem alteração da incerteza associada. Com a utilização da lâmpada de cripton na realização prática desta definição, apenas se conseguiu uma redução de aproximadamente dez vezes o valor da incerteza relativa quando comparada com a realização feita com recurso ao protótipo internacional do metro. As limita-

ções das lâmpadas de cripton (alcance de medição limitado, baixo contraste e dificuldades de utilização prática) e o avanço da tecnologia laser deixavam antever uma nova definição do metro.

Na década de 60 surge o laser que, pelas suas propriedades, despertou o interesse dos metrologistas. De imediato iniciaram-se estudos de investigação e desenvolvimento de técnicas de estabilização de frequência, de modo a permitir que o laser fosse utilizado como sistema para a realização prática da definição do metro. Contudo, nos primeiros lasers gasosos a frequência emitida podia variar de algumas centenas de megahertz, a que correspondia uma incerteza relativa que inviabilizava a sua utilização para este fim. De forma a resolver este problema, foram desenvolvidas pesquisas no melhoramento das técnicas de estabilização da frequência emitida pelos lasers, tendo surgido uma grande variedade de lasers estabilizados com capacidade de produzir uma frequência com incerteza relativa abaixo dos  $10^{-10}$ , muito além do valor obtido com a lâmpada de cripton. Uma das técnicas de estabilização consiste na introdução de uma célula de absorção no interior da cavidade de ressonância, associada a um circuito de estabilização, na unidade de controlo do laser. Esta evolução tecnológica levou à actual definição do metro.

## O metro

Em 1983, no Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) durante a 17ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) foi estabelecida (Resolução nº1), a definição actual do metro [1]:

*“O metro é o comprimento do trajecto percorrido pela luz, no vazio, durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  do segundo.”*

Esta definição encontra-se ligada a uma constante fundamental e exacta da física, a velocidade da luz no vácuo  $c_0$  (CODATA<sup>1</sup>), tornando a sua realização prática universal. Na sequência da 17ª CGPM, o

Comité Internacional de Pesos e Medidas estabeleceu as recomendações para a realização prática da definição do metro [2,3].

A radiação do laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo é actualmente o sistema mais utilizado internacionalmente para a realização prática desta definição. A utilização deste sistema, com uma incerteza relativa baixa, ou de outro sistema laser calibrado por comparação com este, permitem a medição de comprimento,  $l$ , em função de um número  $b$  de comprimentos de onda,  $l = \lambda \times b$ , por interferometria.

### O laser He-Ne na realização prática da definição do metro

A Figura 1 representa o esquema típico de um laser He-Ne estabilizado com uma célula de absorção de iodo utilizado na realização prática da definição do metro. A cabeça do laser consiste num tubo de plasma de He-Ne e numa célula de absorção de iodo montada no interior da cavidade de ressonância formada por dois espelhos acoplados em actuadores piezoeléctricos (PZT).

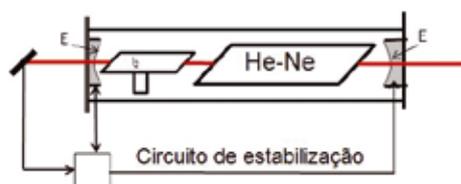


Fig. 1 - Esquema de um laser He-Ne estabilizado. No interior da cavidade de ressonância formada pelos dois espelhos de topo (E) encontra-se o tubo de plasma de He-Ne e a célula de iodo  $I_2$ . O circuito de estabilização permite o controlo da frequência emitida pelo laser, ao regular os actuadores piezoeléctricos solidários com os espelhos, fixando o comprimento da cavidade de ressonância.

Num sistema laser deste tipo, a radiação quase monocromática interage com um conjunto de átomos, iões ou moléculas (meio absorvente) fornecendo riscas de absorção que são utilizadas como referência para a estabilização de frequência (Figura2). A frequência do laser é ajustada em função do comprimento da cavidade de ressonância, transferindo parte da energia da radiação laser para o meio absorvente, sendo detectada uma curva de absorção característica que é função da frequência do laser.

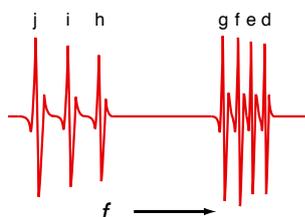


Figura 2 - Curva de emissão característica do laser He-Ne estabilizado por absorção molecular. Os picos do gráfico correspondem às riscas das componentes hiperfinas da transição R(127) do  $I_2$ . A separação entre as componentes d, e, f, g, é de aproximadamente 13 MHz e a largura a meia altura do valor máximo de cada risca é de 5 MHz.

O circuito de estabilização converte o sinal de absorção num sinal de erro que é usado para controlo dos PZT permitindo a estabilização da frequência do laser, conseguindo-se uma incerteza relativa padrão para o valor da frequência emitida da ordem de  $2,1 \times 10^{-11}$ , ao fixar o comprimento da cavidade de ressonância [4]. A reprodutibilidade destes sistemas laser é avaliada pela medição da frequência emitida em função dos parâmetros de funcionamento dos mesmos e através de comparações de lasers de diferentes Laboratórios Nacionais de Metrologia [5]. As comparações entre lasers estabilizados têm mostrado que a frequência da maioria dos lasers He-Ne coincide em aproximadamente 12 kHz, para os parâmetros de funcionamento definidos nas especificações da 17ª CGPM [6].

Dadas as características de estabilidade e reprodutibilidade destes sistemas laser, a radiação (frequência) correspondente à transição R(127) 11-5 componente  $a_{16}(f)$  da molécula  $^{127}I_2$ , ( $f = 473\,612\,353\,604$  kHz;  $\lambda = 632\,991\,212,58$  fm), é uma das radiações recomendadas pelo BIPM para a realização prática da definição do metro.

O laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo,  $^{127}I_2$ , é usado em muitos laboratórios como padrão de referência para medições interferométricas de comprimento e calibrações de outros lasers por comparação, utilizando o método de batimento de frequência.

### Lasers femtosegundo, um novo impulso na realização prática da definição do metro

O desenvolvimento conjugado da tecnologia de estabilização de lasers, de lasers ultra-rápidos e da técnica do bloqueamento dos modos de funcionamento, conduziu ao controlo do espectro óptico. Os trabalhos nesta área foram levados a cabo pela equipa de John Hall e Theodor Hänsch, tendo-lhes sido atribuído o prémio Nobel da Física em 2005 [7]. O sistema, denominado Sintetizador de Frequências Ópticas (SFO), é o resultado deste trabalho, permitindo a geração de qualquer frequência do espectro óptico (em vez de apenas uma, como a emitida por um laser He-Ne), com uma incerteza relativa próxima da do oscilador de céσιο, com que se realiza a unidade de base do SI da grandeza tempo, o segundo. O SFO faz assim a conexão de uma frequência óptica a uma microonda (10 MHz) emitida pelo oscilador de céσιο [8].

Os componentes principais do SFO são: um laser femtosegundo, uma fibra óptica não linear microestruturada, um oscilador de céσιο, conjuntos ópticos e componentes electrónicos.

O laser femtosegundo gera impulsos ultra-rápidos (alguns fs), regularmente espaçados (também designados de pente de frequências), ao estabelecer uma relação de fase fixa ao longo do espectro de frequência [9,10]. Para que o laser femtosegundo tenha aplicabilidade metrológica é necessário conhecer o espaçamento das riscas do pente de frequências  $f_{rep}$  (frequência de repetição) e a sua posição  $f_0$  (frequência de offset) (Figuras 3 e 4).

<sup>1</sup> CODATA (Committee on Data for Science and Technology): Valores internacionalmente recomendados para as Constantes Fundamentais da Física e da Química, disponível em: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/international.html>

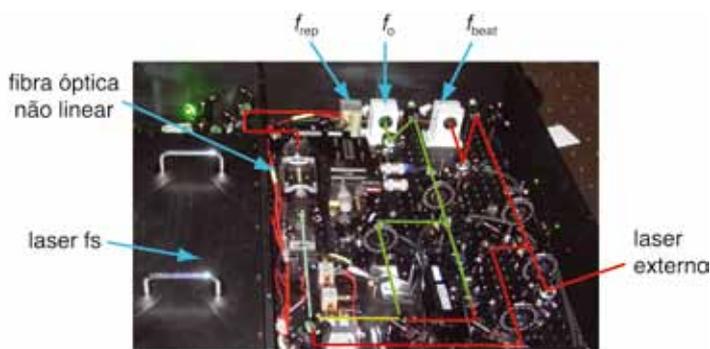


Fig. 3 - Componentes do SFO (Laboratório de Comprimento, IPQ). As frequências  $f_{rep}$  e  $f_0$  são grandezas a medir e controlar e a frequência  $f_{beat}$  é a mensuranda em avaliação no processo de calibração de lasers e disseminação da unidade

A medição de  $f_{rep}$  é directa, através de um fotodíodo. Já a de  $f_0$  requer uma abordagem interferométrica, pois envolve medição de diferenças de fase das ondas de pulso para impulso. O laser femtosegundo, ao atravessar a fibra óptica não linear microestruturada, dá origem a novas frequências ópticas. A duplicação do valor da frequência (isto é, de  $f$  para  $2f$ ) de uma risca com um dado índice  $n$  (sendo  $f_n = f_{rep} + f_0$ ), da parte inferior do espectro óptico, correspondente à região do infravermelho próximo, produz uma frequência  $2fn = 2nf_{rep} + 2f_0$  próxima da risca do pente de frequências situada na parte mais elevada do espectro óptico de índice  $2n$ , dada por  $f_{2n} = 2nf_{rep} + f_0$ . A frequência de batimento entre  $2f_n$  e  $f_{2n}$  permite a medição da frequência de offset  $f_0$  (Figura 4):  $2f_n - f_{2n} = 2(nf_{rep} + f_0) - (2nf_{rep} + f_0) = f_0$ .

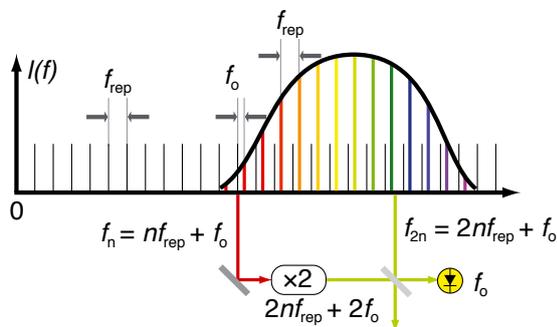


Fig. 4 - Esquema de determinação da frequência de offset.

Para a estabilização do pente de frequências do laser femtosegundo,  $f_{rep}$  e  $f_0$  são controladas e fixas na frequência de 10 MHz, proveniente do oscilador de céσιο, o que permite a calibração absoluta de frequências ópticas com incertezas relativas inferiores a  $10^{-13}$ , ou seja, com elevada exactidão, colocando o SFO no topo da cadeia hierárquica de padrões de comprimento [11].

O batimento de frequências  $f_{beat}$  entre uma frequência do espectro óptico do SFO, e a frequência de um laser externo, por exemplo de um laser He-Ne estabilizado por absorção molecular no iodo, permite a determinação da frequência do laser externo e a disseminação da unidade SI de comprimento [12].

Em conclusão o SFO, para além permitir a realização prática da definição do metro, garante a disseminação da unidade SI de comprimento.

## Breve evolução histórica da definição e realização prática da definição do metro

Em 1792, em plena Revolução Francesa, foi adoptado o Sistema Métrico Decimal. Neste sistema, o metro é definido como sendo “igual à décima milionésima parte de um quarto do meridiano terrestre”. De Junho de 1792 até final de 1798, os astrónomos Delambre e Méchain efectuaram as medições do arco de meridiano entre Dunquerque e Barcelona, que conduziram à determinação de um comprimento geodésico de 1 metro. Em 1799, este comprimento é transferido para um protótipo, o “Mètre des Archives” e a realização prática desta definição é a de que o “metro é igual à distância entre topos da barra de secção rectangular de platina”.

A difusão internacional do sistema métrico decimal avança e em 20 de Maio de 1875 é assinada a “Convenção do Metro” – tratado diplomático assinado por 17 países, entre os quais Portugal, com a intenção de internacionalmente criar as unidades e os padrões e divulgar o Sistema Métrico Decimal. Como consequência, é formado o Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), sob a autoridade da CGPM e é criado o BIPM, entidade científica com o objectivo de estabelecer e manter o Sistema Métrico Decimal e realizar investigação científica aplicada à metrologia. Esta entidade é instalada no Pavillon de Breteuil, em Sèvres (Paris) em 1875 [13]. De 1878 a 1889 foram fabricados protótipos, com secção em X, sendo um seleccionado como Protótipo Internacional M do metro e depositado no BIPM, representando tanto a definição como a realização prática do metro. Os restantes protótipos foram sorteados, na 1ª CGPM, pelos países signatários da Convenção do Metro tendo cabido a Portugal a cópia nº 10 (Figuras 5 e 6) [14].

Em 1889, o metro passa a ser definido pela “distância, a 0°, entre dois traços médios marcados na régua de secção em X de platina iridiada”. Michelson trabalhou no BIPM entre 1892 e 1893, onde construiu um dos seus interferómetros e realizou medições do Protótipo Internacional M utilizando a luz de uma lâmpada de cádmio. A partir deste ponto são realizadas investigações com vista a identificar uma fonte óptica que permita a introdução de uma nova definição do metro baseada numa constante fundamental, que possa ser realizada universalmente, seja reproduzível, estável ao longo do tempo e com a máxima exactidão. Em 1952 o CIPM decide investigar a possibilidade de redefinir o metro em função do comprimento de onda da luz, e cria para esse fim o *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*. Em 1960, na 11ª CGPM, é aprovada a redefinição do metro e este passa a ser definido como “o comprimento igual a 1 650 763,73 comprimentos de onda no vazio da radiação correspondente à transição entre os níveis  $2p_{10}$  e  $5d_5$ , do isótopo de cripton Kr-86”. Esta definição não incluía recomendações sobre como realizar este comprimento de onda, pelo que sistemas como lâmpadas espectrais ou feixes atómicos podiam ser usados para gerar esta radiação.

A dificuldade de manuseamento das lâmpadas de cripton, o aparecimento dos lasers, e o rápido desenvolvimento de técnicas de estabilização da

frequência laser e da metrologia óptica, abriram as portas para a evolução da definição e realização prática da actual definição do metro.

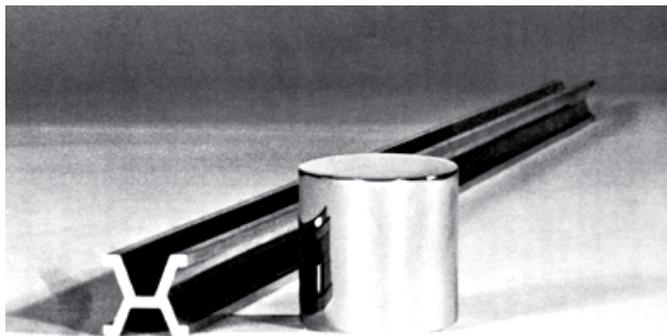


Fig. 5 - Padrões protótipos internacionais do metro e do quilograma de 1889 [13].



Fig. 6 - Topos da cópia nº 10 (Museu de Metrologia; IPQ)

- 1 BIPM Comptes Rendus 17 Conf. Gén. Poids et Mesures, 1983, 45-49 e 97-98.
- 2 BIPM Proc. Verb. Com. Int. Poids et Mesures (1983) 51, 25-28, Recommendation 1, CI-1983; Documents Concerning the New Definition of the Metre, Metrologia 19, 163-177 (1984).
- 3 T. J. Quinn, "Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of optical frequency standards (2001)", Metrologia 40, 103-133 (2003).
- 4 J. Helmcke, "Realization of the metre by frequency-stabilized lasers", Meas. Sci. Technol. 14, 1187-1199 (2003).
- 5 E. Prieto, F. Saraiva, J.-M. Chartier, "International comparison of stabilized He-Ne lasers by the saturated absorption of  $^{127}\text{I}_2$  at  $\lambda \approx 633$  nm involving the CEM (Spain), the IPQ (Portugal) and BIPM", Metrologia 32, 379-384 (1995).
- 6 "Key and supplementary comparisons - Results-BIPM.L-K11 and APMP.L-K11", [http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbi-mages/bipm.l-k11/1-k11\\_big\\_graph\\_aug07.gif](http://kcdb.bipm.org/AppendixB/appbi-mages/bipm.l-k11/1-k11_big_graph_aug07.gif)
- 7 "Laser-based precision spectroscopy and optical frequency comb techniques", [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2005/phyadv05.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/phyadv05.pdf)
- 8 S. T. Cundiff, Jun Ye, J. L. Hall, "Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers", Review of Scientific Instruments 72(10), 3749-3771 (2001).
- 9 F. Saraiva *et al.*, "Transverse disciplines in metrology", French College of Metrology, 183-191 (2009); ISBN 978-184-821-048-6.
- 10 S. A. Diddams *et al.*, "Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb", Physical Review Letters 84, 5102-5105 (2000).
- 11 D. J. Jones *et al.*, "Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked laser and direct optical frequency synthesis", Science 288 (5466), 635 (2000).
- 12 T. H. Yoon, J. Ye, J.L. Hall, J.-M. Chartier, "Absolute frequency measurement of the iodine-stabilized He-Ne laser at 633 nm", Appl. Phys. B 72, 221-226 (2001).
- 13 "L'Aventure du Mètre", Catálogo da exposição, CNAM-Musée National des Techniques, Paris (1989); ISBN 290-820-701-X.
- 14 António Cruz, "Pesos e Medidas em Portugal", Instituto Português da Qualidade, 2007, ISBN 978-972-763-098-1.



**Fernanda Saraiva** é licenciada em Física Tecnológica pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Desde 1992 desenvolve a sua actividade no Departamento de Metrologia do IPQ, sendo actualmente responsável pelos Domínios de Comprimento e Rugosidade.



**Eduarda Filipe** é licenciada em Engenharia Electrotécnica - Ramo Telecomunicações e Electrónica pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, e Mestre em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Desde 1984 desenvolve a sua actividade no Departamento Metrologia do IPQ, sendo actualmente Directora deste Departamento.



**Sílvia Gentil** é licenciada em Ciências da Engenharia - Engenharia Mecânica, pelo Instituto Superior Técnico. Actualmente desenvolve a sua actividade no Departamento de Metrologia do IPQ, nos Domínios Metrológicos Comprimento, Rugosidade e Ângulo, sendo responsável por este último.



**Liliana Eusébio** é licenciada em Engenharia Física (licenciatura pré-Bolonha) pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Desde 2008 desenvolve a sua actividade no Domínio Metrológico de Comprimento no Departamento de Metrologia do IPQ.

# O LASER na Defesa: o seu futuro em Force Protection

João M. P. Coelho, J. Cabrita Freitas

Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Dep. Física, Lab. de Óptica, Lasers e Sistemas,  
Campus do Lumiar, Estrada do Paço do Lumiar, Edifício D, 1649-038 Lisboa

joao.coelho@fc.ul.pt

## Resumo

À medida que as ameaças a infra-estruturas estratégicas se tornaram mais comuns e a identificação e discriminação entre “amigo” e “inimigo” tomou relevância estratégica, o laser emergiu como uma nova e importante solução. A sua capacidade para atingir, de forma rápida e precisa, alvos em cenários onde este tipo de intervenção cirúrgica é necessária e onde existe pouca margem para danos colaterais, tornou a tecnologia laser uma ferramenta para o combate ao terrorismo, em geral, e para a denominada *Force Protection*, em particular. Este artigo descreve a evolução do laser como ferramenta de protecção nos cenários actuais de envolvimento militar e de luta contra o terrorismo.

## Introdução

*Force Protection* (FP) pode ser entendido como o conjunto de medidas tendentes a prevenir ou diminuir o sucesso de acções hostis contra pessoas ou instalações na retaguarda de uma frente de combate [1].

A luz foi uma das primeiras medidas contra ameaças às bases da humanidade, sendo a ideia de “controlar” o fogo um dos principais pontos de viragem na nossa evolução. Isto permitiu aos primeiros humanos protegerem-se dos predadores nocturnos e terá igualmente permitido “prolongar” o dia e usar a noite no desenvolvimento da sociedade. Neste último caso, os efeitos só se fizeram sentir a longo prazo: a protecção imediata ao grupo, e àqueles que providenciavam comida e protecção, foi certamente o seu primeiro objectivo.

Com a evolução da civilização, o uso da luz na defesa foi-se instalando no imaginário humano. Segundo a lenda (Luciano de Samósata, 2 d.C.), em 212 a.C., durante o cerco romano a Siracusa, Arquimedes usou grandes espelhos côncavos para focar a luz do Sol nas velas dos navios que ameaçavam a cidade e assim pegar-lhes fogo. No campo da ficção, H.G. Wells na sua obra “A guerra dos mundos” (1898) fez uma descrição bastante detalhada de raios usados por invasores marcianos, a qual pode ser facilmente entendida como o relato da acção de um (muito potente) feixe de luz. Isto cerca de 60 anos antes do primeiro laser!

Este interesse numa arma que utilizasse o poder da luz

apenas se materializou quando o laser apareceu como equipamento operacional em 1960. Durante essa década foram desenvolvidos os principais tipos de laser e a procura de aplicações militares ganhou maior relevo.

Em FP, o laser apresenta a vantagem de funcionar à velocidade da luz para contrariar ataques directos, ganhando relevância com o advento do terrorismo e de um número crescente de acções de manutenção de paz, que têm como consequência aproximar ameaças da retaguarda onde se encontra o pessoal (militar ou civil) não envolvido em combates. A redução no tempo de resposta, em conjunto com a crescente preocupação pública com baixas civis, coloca um problema real às estratégias de FP.

Neste cenário, dois tipos de sistemas com tecnologia laser são considerados: *Laser Dazzlers* (LD, encandeadores laser) e *Laser Effectors* (LE, dispositivos de elevada potência utilizados para afectar, por acção directa, os alvos e levar à sua destruição). Analisaremos neste artigo questões relacionadas com estas tecnologias, o seu estado da arte e o seu futuro.

## A tecnologia

Inicialmente, o estudo de armas de energia dirigida teve por base principalmente o laser gasoso de  $\text{CO}_2$ . Na actualidade, são considerados quatro tipos de lasers: químicos, semicondutores, estado sólido e electrões livres. Destes, os químicos têm sido aplicados com sucesso na demonstração da aplicação de radiação laser de elevada potência, em particular o laser de fluoreto de deutério, DF (*deuterium fluoride*) e o *chemical oxygen iodine laser* (COIL, laser químico de iodo e oxigénio). Este último emite no infravermelho próximo ( $1,3 \mu\text{m}$ ) enquanto o de DF emite no infravermelho médio ( $3,7 \mu\text{m}$  e  $4,2 \mu\text{m}$ ), ambos em janelas atmosféricas, onde a radiação é menos absorvida na sua propagação.

Os lasers de semicondutores (ou de díodo) usam o fluxo de corrente através de uma junção eléctrica para excitar os electrões do meio. Estes lasers existem num largo espectro de comprimentos de onda, mas a sua relativa baixa potência limita a sua aplicação a LD ou como fonte de bombeamento de outros lasers. Exemplos desta última aplicação são os lasers de estado sólido, os quais dependem de um meio sólido, geralmente bombeado por lâmpadas ou lasers de díodo, sendo os de Nd:YAG (*neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) os mais comuns. Embora a potência obtida com a tecnologia actual (dados públicos) ainda seja inferior à que se consegue obter com os COIL, e insuficiente para os efeitos pretendidos, o desenvolvimento da tecnologia tem dado avanços promissores, indicando que eles podem ser o futuro dos LE. Vantagens: reduzido (comparativamente) tamanho, portabilidade e menor custo operacional devido a apenas consumirem electricidade (sem produtos químicos ou gases).

O *Free Electron Laser* (FEL, laser de electrões livres) difere dos lasers convencionais no princípio de geração do feixe. Enquanto nestes os electrões são excitados em estados atómicos ou moleculares, os FEL utilizam um feixe relativista de electrões como meio activo que se movimenta livremente através de uma estrutura magnética (daí o termo “electrões livres”). Apesar de a tecnologia estar ainda em estudo, o estado da arte parece indicar serem mais úteis na produção de microondas de elevada potência do que na de luz.

### Encandear para proteger

Os lasers utilizados para encandear enquadram-se na categoria das armas não-letais. O seu principal objectivo é o de causar cegueira temporária ou desorientação sobre um potencial atacante.

Uma forma simples de encandear é provocar a reflexão da luz do Sol para fazer um atirador perder a precisão. No entanto, o uso de simples óculos escuros é suficiente para evitar ou minimizar este efeito. Para além do Sol, alguns holofotes são suficientemente intensos para causar cegueira temporária ou permanente, e terão sido utilizados na Segunda Guerra Mundial sobre as tripulações de bombardeiros. Algumas fontes de luz montadas em armas pessoais também podem ser utilizadas para cegar temporariamente opositores. Em ambos os casos, o objectivo principal é iluminar o alvo e o seu uso para desorientar, secundário.

Uma alternativa é o uso de feixes laser, rentabilizando as suas características: direcionalidade, coerência e monocromatismo. Estas permitem que a energia depositada numa determinada área seja várias ordens de grandeza superior quando se utiliza um laser em vez de uma fonte de luz convencional (para uma mesma potência óptica).

O primeiro uso documentado dos LD em combate foi pela Marinha Real Britânica durante a Guerra das Malvinas, em 1982, instalados em navios de guerra com o fim de impedir ataques aéreos de proximidade. Apesar de em 1995 as Nações Unidas terem proibido toda e qualquer arma dedicada a provocar cegueira através do seu *United Nations Protocol on Blinding Laser Weapons*, os LD não têm por intenção causar cegueira permanente, podendo assim ser capazes de contornar esta regulamentação. A proibição é feita sobre “armas dedicadas à finalidade de encandear” (“*dedicated-purpose dazzler weapons*”), o que representa uma importante lacuna na legislação uma vez que estes dispositivos podem ser facilmente configurados para outras aplicações – por exemplo, como sistemas de pontaria laser.

Mas o que torna o laser uma ameaça tão grande para a visão? Uma forma de ilustrar o impacto de um feixe laser no olho humano é comparar com o olhar para o Sol. Assim, façamos a equivalência do olho com uma lente de distância focal  $f=25$  mm e uma abertura de 2 mm de diâmetro, equivalente a uma pupila ocular constricta por um forte estímulo luminoso [2]. Se olharmos directamente para o Sol, num dia sem nuvens nem nevoeiro, podemos considerar que a sua irradiância (potência por unidade de área) será cerca de  $1 \text{ kW/m}^2$  (ou seja, uma potência de cerca de 3 mW na pupila) num ângulo de cerca de 10 mrad. A imagem do Sol formada na retina terá um diâmetro de  $10 \text{ mrad} \times 25 \text{ mm} = 0,25 \text{ mm}$ , e uma irradiância de

$$\frac{3 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi \left( \frac{0,25 \times 10^{-3} \text{ m}}{2} \right)^2} \approx 6 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

Por outro lado, quando se considera um feixe de luz colimado, como o laser, o sistema óptico cria um foco limitado por difracção cujo diâmetro,  $d_{\text{foco}}$ , é dado por

$$d_{\text{foco}} = \frac{\lambda f}{\pi d_{\text{feixe}}} \quad (1)$$

Tomando por exemplo um díodo laser de 1 mW de potência emitindo um feixe de diâmetro  $d_{\text{feixe}}$ , equivalente ao da pupila ocular nas condições anteriormente descritas, e num comprimento de onda  $\lambda=635$  nm, o diâmetro do feixe sobre a retina é  $d_{\text{foco}} \approx 10 \mu\text{m}$ . Neste caso a irradiância será dada por

$$\frac{1 \times 10^{-3} \text{ W}}{\pi \left( 5 \times 10^{-6} \text{ m} \right)^2} \approx 1,25 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

Ou seja, olhar para um apontador laser expõe o olho a uma irradiância quase 200 vezes superior a olhar directamente o Sol!

Porém, avaliar o verdadeiro impacto de um feixe laser no olho humano depende também de factores relacionados com a interacção com os tecidos: absorção, transmissão, degradação (danos) e reacção. A transmissão e a absorção estão relacionadas e dependem do comprimento de onda, determinando a profundidade de penetração da radiação nos olhos (Figura 1).

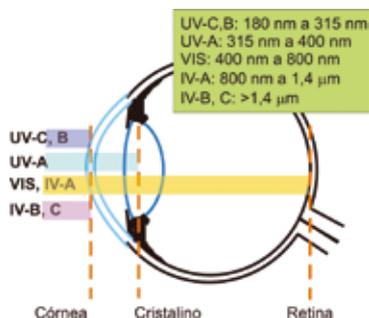


Fig. 1 - Representação do grau de penetração da luz num olho humano.

Uma vez atingidos, são três os principais mecanismos de interacção responsáveis por danos nos tecidos oculares: interacção fotoquímica, térmica e ionização. A energia absorvida no tecido ocular aumenta a sua temperatura, dependendo dos fluxos de calor, e o seu grau de absorção nos tecidos do olho é crítico pois quanto maior, mais energia é convertida em calor. É este aumento de temperatura e sua duração que determinam a extensão dos danos.

Como as células têm processos próprios de regeneração, as proteínas danificadas podem ser restauradas. Mas se a elevação da temperatura as danifica excedendo a sua taxa de regeneração, a célula morre. Pode-se portanto definir um limiar inferior de energia incidente para o qual o processo de dano térmico acontece. Um limite superior pode por sua vez ser atribuído quando a energia é tão elevada e fornecida de forma tão rápida que a temperatura sobe, sem dissipação para os meios circundantes, e ultrapassa o ponto de ebulição da água. Esta é a forma mais comum de dano óptico devido aos LD, ocorrendo em alguns microsegundos.

Contrariamente aos danos térmicos, os fotoquímicos geralmente ocorrem com a exposição prolongada a luz de intensidade relativamente fraca. Como são necessárias dezenas de segundos, ou mais, este mecanismo não é esperado no campo operacional.

Por seu lado, a ionização ocorre para impulsos ultra-curtos (nanosegundos, ou menos). Nesta situação, os átomos do “alvo” são destruídos, o que pode causar bolhas de cavitação, ou hemorragia, e danificar uma área ainda maior da retina. Naturalmente, o olho tem o seu próprio sistema de defesa: o mecanismo de cerrar as pálpebras, que leva cerca de 0,25 ms para permitir a resposta total do olho [3], mas só é sensível à luz visível.

Apesar de todas as questões éticas, desde 1995 que a China é mencionada como estando a desenvolver e vender armas laser capazes de cegar como a ZM-87, baseada num laser de Nd:YAG de 15 mW, podendo estas armas já ter atingido desenvolvimentos de segunda ou terceira geração [4].

Nos Estados Unidos, um LD emitindo no verde e com 300 mW de potência foi desenvolvido em 1996. Tratava-se de um dispositivo semelhante em tamanho e peso a uma lanterna [5]. Actualmente é possível encontrar no mercado diversos sistemas [6-11].

Tanto o SaberShot como o TALIS (da XADS) são dispositivos portáteis baseados num laser de 532 nm com potência até 250 mW. Quando direccionados para um alvo, a óptica associada permite expandir o feixe emitido e gerar uma luz

que penetra fumo, neblina, e apresenta o dobro do alcance da luz branca. A modulação deste feixe de elevada intensidade, causa encandeamento, desorientação e piscar de olhos, o que reduz a actividade do alvo.

Outros sistemas estão em desenvolvimento como a espingarda PHaSR (*Personnel Halting and Stimulation Response rifle*) a qual utiliza dois lasers de baixa potência (um emitindo no visível e o outro no infravermelho médio) [8]. O Saber 203 (da ARL) tem um alcance efectivo de 300 m e utiliza um laser de semiconductor de 220 mW, que emite no vermelho (650 nm) e é carregado num lançador de granadas como um projectil, accionado através de um interruptor instalado no lançador [9]. Em 1995, o sistema foi utilizado com sucesso pelos fuzileiros dos EUA na Somália.

A LE Systems produz o LD compacto CHP, que emite 500 mW no verde. Da sua publicidade consta que “os exames oftalmológicos em curso continuam a demonstrar a ausência de lesões oculares em repetidas exposições directas ao CHP a uma distância mínima de 20 m” [10]. De facto, uma vez que a segurança do olho face aos LD está relacionada com a distância, algumas soluções estão a ser testadas pela aplicação de distanciómetros (tecnologia igualmente baseada em lasers) para aferir da distância ao alvo e garantir a segurança do olho atingido.

Os LD têm a vantagem adicional de poder cegar sensores ópticos, como os utilizados em veículos de combate, artilharia e mísseis [11]. O exército dos EUA tem em desenvolvimento dois protótipos de LD anti-sensores: o Dazer e o Cobra. Ambos são lasers estáticos destinados a detectar e neutralizar os sensores ópticos e electro-ópticos.

### O poder destrutivo da luz

Outra área de crescente investigação é a da utilização de feixes laser de elevada potência para destruir projecteis, ou seja, como LE. As principais vantagens dessa tecnologia como um sistema de defesa contra mísseis, foguetes e morteiros (que têm sido considerados como os principais alvos) são:

- Operação à velocidade da luz;
- Cálculos balísticos desnecessários;
- Aquisição dos alvos precisa e ajustável;
- Baixo custo operacional (o sistema só consome energia);

Uma vez que estes dispositivos são em regra do tipo terra-ar e utilizados contra dispositivos e não pessoas, os problemas éticos não se colocam. A principal questão é como colocar energia suficiente no alvo para que o seu invólucro seja danificado e ocorra uma avaria mecânica ou eléctrica, com a sua consequente destruição. A irradiância necessária

depende das propriedades físicas e espessura dos materiais.

Como exemplo, Leonard [12] apresenta cálculos simples para os níveis de densidade de energia necessária para destruir um míssil norte-coreano Taepo Dong 2 (considerado como tendo um invólucro de aço de 3 mm). De acordo com a sua análise, são necessárias densidades entre 2,4 kJ/cm<sup>2</sup> (falha por sobrecarga do revestimento do propulsor) e 22 kJ/cm<sup>2</sup> (vaporização de um orifício no invólucro). A densidade de potência mínima do alvo, assumindo 4 s para acção do laser sobre o alvo, é de 600 W/cm<sup>2</sup>. Se, para destruir um alvo, é necessário um orifício de 5 cm de diâmetro tal implica um laser de 20 kW. Estes cálculos são teóricos e bastante específicos, mas são um ponto de partida. Testes com diferentes sistemas e alvos são actualmente realizados em diversas partes do mundo e são necessários para uma melhor compreensão da interacção da radiação laser com os alvos.

Porém, o grande problema para os LE é o facto do feixe de laser ser afectado na sua propagação através da atmosfera por três diferentes tipos de fenómenos: transmissão, turbulência e *blooming* [13]. A transmissão atmosférica é regida pelo comprimento de onda do laser e é maximizada escolhendo um laser que emita numa das janelas atmosféricas. Problemas maiores advêm da turbulência e do *blooming*.

A turbulência atmosférica ocorre devido a variações de temperatura, pressão e humidade, as quais levam a variações aleatórias no índice de refração. Sem correcção, a turbulência pode fazer o feixe desviar-se e divergir, aumentando a sua dimensão sobre o alvo e assim diminuindo a densidade de energia. O *blooming* ocorre quando a energia do laser é absorvida por elementos existentes na atmosfera, provocando aquecimento localizado. O ar aquecido expande-se radialmente e, em conjunto com o efeito de vento lateral, faz com que o índice de refração do ar varie transversalmente à direcção de propagação, alterando localmente a distribuição de energia no feixe. Ambos os fenómenos (ilustrados na Figura 2), podem reduzir substancialmente a eficácia do sistema, implicando a sua correcção, normalmente através de ópticas adaptativas (AO, *Adaptive Optics*). Este sistema usa informações em tempo real sobre as distorções induzidas pela atmosfera para accionar actuadores que deformam um espelho, permitindo mudar continuamente a forma do feixe laser e assim cancelar os erros na frente de onda.

Como mencionado anteriormente, os dois principais sistemas laser que têm sido testados como LE usam lasers de CO<sub>2</sub> e químicos. Vários programas têm sido desenvolvidos, embora, talvez o mais conhecido (e um dos primeiros) tenha

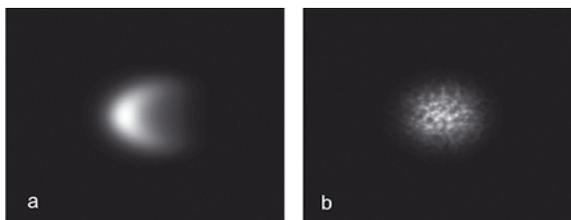


Fig. 2 - Ilustração do (a) efeito de blooming e (b) da turbulência atmosférica na propagação de um feixe circular de luz.

lado o do laser aerotransportado: em 1983, a Força Aérea dos EUA anunciou o sucesso do ALL (*Airborne Laser Laboratory*), um laser de CO<sub>2</sub> instalado num *Boeing 747* modificado. A Tabela 1 resume alguns dos principais projectos conhecidos e as informações disponíveis sobre eles [12, 14-18].

A potência necessária para interacções, com alvos a vários quilómetros, tem limitado a escolha do laser, e levado a que a tecnologia de lasers químicos, em particular a tecnologia COIL, tenha sido a escolhida até há poucos anos. Estes lasers emitem no infravermelho próximo e podem fornecer até centenas de kW. Os principais inconvenientes: o tamanho e os procedimentos de segurança necessários face a produtos químicos. A sua utilização em FP implica a construção de infra-estruturas específicas (por exemplo, um edifício) para cada local a ser protegido. Naturalmente, a sua aplicação é muito limitada quando a mobilidade é um requisito.

Na Tabela 1 observa-se que os actuais projectos de investigação se centram na tecnologia de estado sólido [14-18], sinónimo de maior portabilidade e ausência de manipulações perigosas ou sensíveis. Existem duas abordagens: a utilização de lasers em fibra e lasers de disco [14].

Laser Effectors: projectos

Projecto	Tipo de Laser	Estado
HELEX	CO <sub>2</sub> (200 kW)	1970 - ...
MTU	CO <sub>2</sub> (30 kW)	1975 - ...
ALL	CO <sub>2</sub> (400 kW)	1976 - 1984
UNFT	CO <sub>2</sub> (400 kW)	1978 - ...
MIRACL	DF (MW)	1980 - ...
MAD	DF (400 kW)	1981 - ...
LATEX	CO <sub>2</sub> (10 MW)	... - 1989

Projecto	Tipo de Laser	Estado
THEL	DF (MW)	1996 - 2006
ABL	COIL (MW)	1996 - ...
ATL	COIL (100-300 kW)	2002 - ...
SSL	Estado sólido	2003 - ...
MEL - COIL	COIL (MW)	2003 - ...
JHPSSL - 1/2	Estado sólido (100 kW)	2003 - ...
HELLADS	Líquido (150 kW)	2005 - ...

No âmbito do desenvolvimento de um sistema LE para FP, Portugal – através do Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – participa no projecto HELW (*High Energy Laser Weapon*) financiado pela EDA (European Defence Agency). Este projecto Europeu, iniciado

em 2008, tem por objectivo definir as linhas directoras para um sistema capaz de ser aplicado em diferentes cenários e capaz de proteger instalações críticas de ataques com morteiros e outros dispositivos terra-terra de curto alcance.

## O futuro

Os LD são uma ferramenta simples e de custo reduzido, de interesse para uma FP primária. Como encandeadores, os lasers são actualmente utilizados no Iraque e Afeganistão, principalmente para distrair e desorientar possíveis oponentes a partir de uma distância segura e assim reduzir perdas humanas nos pontos de controlo. No entanto, a fronteira entre encandear e cegar é ténue e, actualmente, ninguém pode assegurar que um LD é 100% seguro para a visão: qualquer laser que é capaz de temporariamente cegar (i.e. encandear) um alvo numa dada situação pode facilmente tornar este efeito permanente noutra, dependendo de vários factores como a distância ao alvo, tempo de exposição, condições atmosféricas, dispositivos ópticos eventualmente existentes de permeio, entre outros. Embora os fabricantes tentem exaustivamente testar e provar que os seus produtos são seguros, a sensibilidade do público – em particular o Ocidental – para dispositivos militares que (potencialmente) provoquem cegueira continuará a ser uma limitação importante à aplicação dos LD à FP. Um futuro mais promissor para estes dispositivos será a sua aplicação na neutralização de sensores... sendo a neutralização de alvos humanos um eventual (e não assumido) uso secundário.

Como dispositivos defensivos contra mísseis, morteiros e foguetes, os lasers têm demonstrado o seu potencial em diversos programas de investigação. No entanto, a sua aplicação e implementação como um sistema efectivo na FP ainda apresenta alguns problemas para ultrapassar. A principal questão é a relação entre a dimensão do sistema e a potência emitida: a tecnologia testada até ao fim do século XX baseia-se em instalações complexas, caras e de grandes dimensões, dificilmente multiplicáveis por muitos locais estratégicos ou transportáveis. A vanguarda em termos de LE assenta no desenvolvimento de uma nova geração de lasers de elevada potência baseados na tecnologia de estado sólido. Actualmente, lasers em fibra e lasers de disco competem na demonstração do seu potencial e certamente num futuro próximo darão lugar a dispositivos de defesa eficazes face às novas ameaças e nos cenários diversificados em que a FP tem de operar.

- 1 T. A. Kinnan, "Force Protection", Air Force Doctrine Document 2-4.1, United States Air Force (1999).
- 2 D. A. Atchison, G. Smith, "Optics of the human eye", Butterworth-Heinemann, Edinburg, (2003).
- 3 ANSI Z136.1-2007, American National Standard for Safe Use of Lasers (2007).
- 4 L. A. Small, "Blinding Laser Weapons: It is Time for the International Community to Take off its Blinders" (1996); [http://www.icltd.org/laser\\_weapons.htm](http://www.icltd.org/laser_weapons.htm)
- 5 F. Smith, "Laser Dazzlers - Non Lethal Laser Weapons Used by Military and Law Enforcement Personnel", Ezine@rticles (2009); <http://ezinearticles.com/?Laser-Dazzlers---Non-Lethal-Laser-Weapons-Used-by-Military-and-Law-Enforcement-Personnel&id=1533562>
- 6 "No Longer Science Fiction Less Than Lethal & Directed Energy Weapons", Defence Update, International Online Defence Magazine, Issue 1, 5 (2005); <http://www.defense-update.com/features/du-1-05/NLW-DEW.htm>
- 7 "ForcePro Lasers", XADS (2009); <http://www.xtremeads.com/forceprolasers.htm>
- 8 W. Knight, "US military sets laser PHASRs to stun", New Scientist (Nov. 2005); <http://www.newscientist.com/article/dn8275>
- 9 "Saber 203", Defence Update, International Online Defence Magazine, Issue 1 (2005); <http://defense-update.com/products/s/saber-203.htm>
- 10 "Laser Dazzler", LE Systems Inc. (2009); <http://laserdazzler.net/>
- 11 "Laser Dazzlers", Orbital Vector (2006); <http://www.orbitalvector.com/Firearms/Laser%20Dazzlers/LASER%20DAZZLERS.htm>
- 12 S. G. Leonard, "Laser Options for National Missile Defense", A Research Report Submitted to the Faculty in Partial Fulfilment of the Graduation Requirements, Maxwell Air Force Base, Alabama (Abr. 1998).
- 13 R. J. Dunn III, "Operational Implications of Laser Weapons", Analysis Center Papers, Northrop Grumman, (Set. 2005).
- 14 R. Beach, L. Zapata, "Tactical laser Weapons for Defense", LDRD final report, U.S. Department of Energy (30 Jan. 2002).
- 15 T. J. Lincoln, "Directed Energy Weapons: Do We Have a Game Plan?", School of Advanced Military Studies, United States Army Command and General Staff College, Fort Leavenworth, Kansas (2004).
- 16 J. Stupl, G. Neuneck, "High Energy Lasers: A Sensible Choice for Future Weapon Systems?", Security Challenges 1(1), 135-153 (2005).
- 17 R. Laurenzo, "Company Proposes Ground Laser to Protect Jetliners", Global Security.org (2004); <http://www.globalsecurity.org/org/news/2004/040120-laser-jetliners.htm>
- 18 "All U.S. laser weapons project Resolution: Tips for pre-research is a leading" (2010); <http://www.comhaha.com/blog/518503-all-us-laser-weapons-project-resolution-tips-for-pre-research-is-a-leading/>



### João M. P. Coelho

Recebeu o seu diploma em Engenharia Física e de Materiais, em 1992, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e o doutoramento em Engenharia Física pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, em 2003. Foi Investigador no INETI (1991-2009) e desde 2009 pertence ao Departamento de Física da Faculdade de

Ciências da Universidade de Lisboa. Realiza as suas actividades de Investigação no Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas, sendo igualmente membro do Instituto de Biofísica e Engenharia Biomédica. Os seus interesses de investigação incluem o processamento de materiais por laser, a propagação da luz nos meios, biofísica, projecto óptico e metrologia óptica. Nestas áreas, orienta estágios, mestrados e doutoramentos e é autor em mais de 60 artigos em publicações científicas.



### J. Cabrita Freitas

licenciado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Superior Técnico em 1979, Investigador no INETI (1979-2009), pertence desde 2009 ao Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa desenvolvendo aí actividades de IDT no Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas. Coordenador das actividades de Segurança e Defesa no INETI, 2006-2008.

Representante nacional junto da Comissão Europeia para a publicação do Green Paper on Defence Procurement, 2004-2006. Director do Departamento de Optoelectrónica do INETI, 1998-2007. Coordenador do Grupo de Marketing e Engenharia do Departamento de Optoelectrónica do INETI, 1994-1998. Autor de inúmeras comunicações e publicações científicas, recebeu o prémio de Inovação atribuído pela ANIMEE por três vezes, 1989, 1993 e 1995. Os seus interesses de investigação incluem a utilização das tecnologias ópticas e laser para aplicações industriais e de segurança e defesa.

# Escrita de dispositivos ópticos integrados com laser de femtosegundos

Luís A. Fernandes<sup>1,2</sup>, Jason R. Grenier<sup>2</sup>, Peter R. Herman<sup>2</sup>, J. Stewart Aitchison<sup>2</sup>, Paulo V. S. Marques<sup>1</sup>

1. INESC Porto, Dep. Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto

2. Institute for Optical Sciences, and the Dep. of Electrical and Computer Eng. University of Toronto, 10 King's College Rd., Toronto, Ontario, M5S 3G4, Canadá

lfernandes@fc.up.pt

## Resumo

O incessante desenvolvimento nos processos de fabrico conducente a um elevado grau de miniaturização tem sido perseguido ao longo das décadas com grande persistência e para aplicação nas mais diversas áreas do conhecimento. Desde o aparecimento dos lasers, a utilização destas fontes de radiação em processos de micromaquinação e escrita directa tem evoluído de forma substancial; mais recentemente, o desenvolvimento de osciladores e lasers amplificados pulsados a emitir num regime femtosegundo tem sido responsável pelo aparecimento de um vasto conjunto de aplicações que requerem a utilização de processos de escrita com resolução submicrométrica e possibilidade de escrita tridimensional. Este artigo descreve sumariamente as características gerais do processo, bem como algumas das aplicações desenvolvidas em óptica.

## Introdução

O processamento com lasers tem sido um campo bastante explorado desde os anos 60 com resultados bastante positivos na modificação e estruturação de diversos tipos de materiais. Estes processos foram introduzidos logo após o aparecimento de lasers fiáveis e baseavam-se em processos de absorção linear, onde o comprimento de onda de emissão laser utilizado se situa sobre uma banda de absorção do material exposto.

A absorção não linear em materiais dieléctricos permite a definição de circuitos ópticos integrados em três dimensões.

O desenvolvimento de lasers pulsados ultracurtos (sub-picosegundo) foi determinante para a introdução dos processos de micromaquinação tridimensional de alta resolução, através de interacções não-lineares entre a radiação e a matéria. Para

despoletar estas interacções são requeridas intensidades elevadas, que podem ser criadas utilizando lasers de impulsos ultracurtos focados num volume de dimensões reduzidas [1]. Geralmente são utilizados lasers a emitir comprimentos de onda aos quais os materiais são transparentes para permitir alterações localizadas em profundidade e possibilitando assim a criação de estruturas tridimensionais (Figura 1). Este processo representa um avanço importante na fabricação de estruturas tridimensionais, uma vez que os processos convencionais baseiam-se essencialmente na aplicação sucessiva de etapas de deposição, processos fotolitográficos, seguida de processos de erosão selectiva e eliminação de camadas sacrificiais [2].

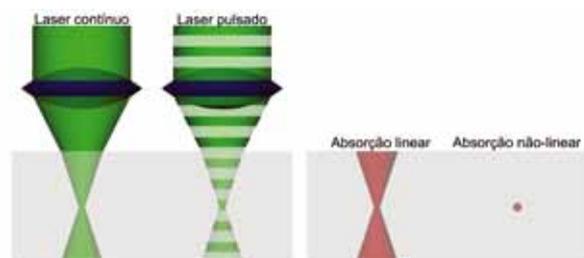


Fig. 1 - Comparação do processo de absorção linear produzido por um laser contínuo com o processo de absorção não-linear produzido por um laser pulsado.

A alta resolução geralmente inerente aos processos de absorção não-linear resulta do facto de que apenas a parte central do volume focal tem intensidade suficiente para ultrapassar o limiar do efeito pretendido. A focagem é fundamental para aumentar a densidade de energia, dependendo, naturalmente, do tipo de laser (duração dos impulsos, taxa de repetição, comprimento de onda, etc) [3].

O processo de modificação de materiais utiliza lasers de dois tipos; num primeiro grupo, osciladores laser que tipicamente emitem impulsos com taxas de repetição em torno dos 80 MHz e energia (por impulso) da ordem de alguns nanojoules até dezenas de nanojoules. No segundo grupo podem encontrar-se os sistemas amplificados, que utilizam energias por impulso da ordem dos milijoules e taxas de

repetição das ordens das centenas de quilohertz, sendo estes os sistemas mais utilizados. A principal diferença entre ambos resulta do facto de que nos sistemas com alta taxa de repetição, o período de tempo entre impulsos é inferior ao tempo de dissipação térmica, pelo que existe um efeito cumulativo não desprezável que determina, na forma e volume, a região afectada pela exposição ao laser.

Os lasers mais comuns são os de titânio:safira (laser de estado sólido) que emitem no infravermelho próximo (~ 0.80 a 1.0  $\mu\text{m}$ ). No entanto, na última década surgiram sistemas laser baseados em fibra óptica dopada com itérbio a emitir impulsos com duração da ordem das centenas de femto-segundos a 1.044  $\mu\text{m}$  e que são sistemas bastante mais simples de utilizar, uma vez que não necessitam de alinhamentos constantes, como geralmente acontece no caso dos sistemas mais tradicionais.

Os materiais fotopolimerizáveis são um dos tipos de materiais mais estudados. A fotopolimerização de uma solução monomérica em profundidade utiliza a absorção de vários fótons para induzir a alteração química necessária. Concluído o processo, o material não exposto é simplesmente removido por dissolução, revelando assim a estrutura que se pretende, como exemplificado na Figura 2.

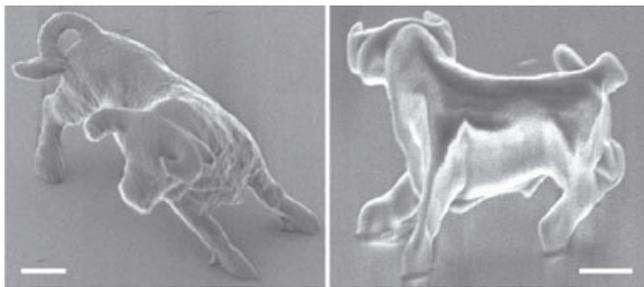


Figura 2 - Estruturas tridimensionais complexas formadas por fotopolimerização selectiva [4]. A escala na imagem é equivalente a 2  $\mu\text{m}$ . (© Nature Publishing Group)

A dimensão mínima das estruturas reportadas é de cerca de algumas dezenas de nanómetros, e depende essencialmente das características do feixe laser utilizado bem como do material exposto. Este valor é muito inferior ao “limite de difracção” em processos similares baseados num regime de absorção linear, já que o processo de fotopolimerização é induzido selectivamente e confinado à zona central do volume focal onde o limiar de intensidade é ultrapassado.

O trabalho reportado nos últimos anos também incidiu sobre materiais amorfos e cristalinos, como sílica e niobato de lítio, respectivamente. Nestes materiais, as modificações induzidas são bastante diferentes: a exposição ao laser provoca a foto-ionização do material, promovendo a passagens de electrões da banda de valência para a banda de condução, sendo que a exposição de materiais transparentes requer a absorção de múltiplos fótons que permitam ultrapassar a energia da banda proibida. Deste processo resulta a transferência de energia para a matriz por processos que ainda não se compreendem completamente; contudo, é claro que existem vários regimes de exposição. A baixa energia ocorre uma fusão localizada do material, responsável por uma alteração do índice de refracção isotrópica no volume de interacção; no outro extremo, onde são utiliza-

das intensidades bastante mais elevadas, podem ocorrer micro-explosões dentro do material, o que pode originar o aparecimento de pequenos volumes ócos no interior na região de forte interacção. Estes aspectos podem ser utilizados para gravação de dados em volume com enormes ganhos em densidade de dados [5]. De salientar que as alterações de índice de refracção podem resultar quer de alterações físico-químicas do material, após a formação do plasma, quer de alterações dos estados de tensão dentro do material. Na Figura 3 foram desenhados os logótipos do INESC-Porto e da Universidade de Toronto dentro de uma amostra de sílica.



Fig. 3 - Logótipos escritos por ablação com laser pulsado, 20  $\mu\text{m}$  abaixo da superfície de uma lâmina de sílica.

A aplicação mais comum desta tecnologia é a micromaquinação em alta resolução de um grande conjunto de estruturas que podem ser utilizadas nos mais diversos domínios. No caso dos materiais poliméricos e aplicações em óptica, existe um grande interesse na fabricação de nano-estruturas que exibam uma banda óptica proibida, à semelhança do que acontece com o caso das bandas de energia electrónicas proibidas para os electrões em materiais semicondutores. Contudo, os materiais poliméricos têm um índice de refracção relativamente baixo, pelo que a estrutura polimérica serve, na maior parte das situações, apenas como molde para a replicação da mesma estrutura (ou do seu negativo) em materiais com índice de refracção mais elevado, como é o caso do silício. Neste caso a estrutura é replicada utilizando métodos de dupla inversão (ou o seu negativo por inversão simples) [6].

Outro exemplo bastante explorado na microfabricação em materiais amorfos relaciona-se com a alteração localizada do índice de refracção de lâminas de sílica pura para o desenvolvimento de dispositivos em óptica integrada. Neste caso, o aumento do índice de refracção localizado ao longo de um determinado caminho permite a fabricação de guias de onda que guiam a radiação por um processo semelhante ao da propagação em fibras ópticas. Os processos convencionais utilizam a modificação do índice de refracção pela deposição de diversas camadas, e a sua estruturação lateral utilizando processos fotolitográficos, seguidos, tipicamente, de processos de difusão ou erosão em plasmas reactivos, um processo bastante moroso! No caso da exposição com lasers de femtosegundos, o aumento localizado do índice de refracção é induzido directamente, permitindo as condições de guiagem necessárias à fabricação de dispositivos ópticos integrados, sem necessitar de etapas adicionais. A fabricação de dispositivos em sílica pura pode ir um pouco mais longe; a exposição do material a radiação femtosegundo induz anisotropia na taxa de

erosão quando exposto à acção do ácido fluorídrico, fazendo com que surjam cavidades ou relevos nos substratos utilizados, o que pode ser utilizado para o desenvolvimento de componentes essenciais em microfluídica [7]. Deste modo podem ser criadas estruturas para manipulação de fluidos integradas com circuitos ópticos.

### Aplicações em óptica integrada

De uma forma geral, a maioria dos dispositivos ópticos integrados fabricados por processos fotolitográficos, podem ser microfabricados por escrita directa com laser femtosegundos, e com a vantagem de se poder obter dispositivos tridimensionais. Por outro lado, a escrita directa permite a integração de diversos componentes a partir de um único processo e tipo de material, o que traz também vantagens em termos de estabilidade e reprodutibilidade dos dispositivos. Dada a característica não linear destes processos, torna-se fundamental estudar e controlar criteriosamente os parâmetros da escrita que determinam a qualidade final dos dispositivos. Nomeadamente, determina-se a intensidade necessária para atingir o limiar do efeito e qual a intensidade máxima antes que ocorra a destruição do material. Dentro desta gama é possível encontrar um conjunto de parâmetros óptimos para a produção de guias com poucas perdas, dependendo destes parâmetros das características e funcionalidades do dispositivo, como sejam o comprimento de onda de operação e características modais.

O sistema utilizado para a obtenção dos resultados apresentados nesta secção foi um laser em fibra dopada com itérbio (IMRA) a emitir impulsos de 300 fs a 1044 nm, com 1  $\mu$ J de energia por impulso. Contudo, para aumentar a eficiência do processo utilizou-se um cristal duplicador de frequência para obtenção de impulsos a 522 nm. As perdas registadas devido à geração de segundo harmónico ter uma eficiência de 55% são compensadas pelo aumento de energia por fóton e pela redução da dimensão do volume focal [8]. Os impulsos são então focados 75  $\mu$ m abaixo da superfície de uma lâmina de sílica pura através de uma lente esférica com abertura numérica de 0,55. O posicionamento da amostra no plano horizontal e da lente de escrita na posição vertical são asseguradas por plataformas de translação da Aerotech, permitindo uma resolução no posicionamento de 3 nm e velocidades típicas de deslocamento da amostra de 300  $\mu$ m/s.

A sílica é dos materiais mais estudados em escrita directa com laser de femtosegundos, mas outros materiais importantes tais como os vidros borossilicato, vidros dopados com terras raras (para a produção de dispositivos com ganho óptico e para a fabricação de lasers integrados), diversos cristais, como o niobato de lítio (devido ao seu elevado efeito electro-óptico), etc, têm sido explorados para a produção de dispositivos funcionais.

Em quase todas as aplicações, é necessária a integração destes dispositivos com outros sistemas já existentes, como seja o acoplamento a fibras ópticas. Para conseguir um valor mínimo de perdas é necessário que as características dos guias fabricados sejam compatíveis com as fibras. Para conseguir este objectivo, é necessário determinar os parâmetros de fabricação que resultam num bom ajuste entre o perfil modal dos guias e das fibras ópticas de acoplamento. Na Figura 4 compara-se o perfil modal de um guia de onda com o perfil modal da fibra mais comum para aplicações em telecomunicações (SMF-28). Existe uma boa correlação entre ambos os perfis modais, o que resulta em perdas de acoplamento da ordem de 0,2 dB e perdas de propagação nos guias na ordem de 0,5 dB/cm ( $\lambda=1550$  nm).

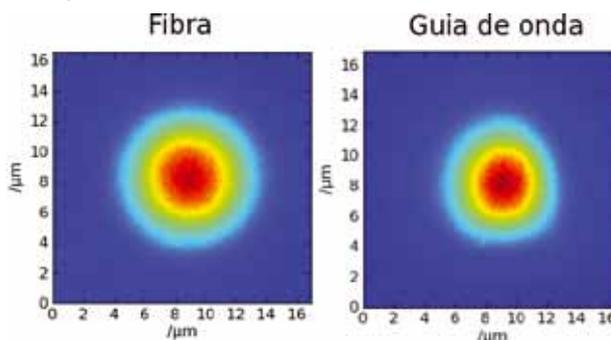


Fig. 4 - Perfis modais a 1550 nm de uma fibra SMF-28 (esquerda) e de um guia de onda em substrato de sílica pura (direita) com diâmetros modais de 10,4  $\mu$ m e 8,7  $\mu$ m, respectivamente.

A fabricação de guias de onda com lasers de femtosegundo resulta num volume modificado com uma secção bastante assimétrica, o que provoca que na maioria dos casos os guias fabricados sejam birrefringentes ( $B \sim 10^{-4}$ , definida como a diferença de índice de refração efectivo entre as componentes paralela e perpendicular de um modo guiado).

### Escrita directa de redes de Bragg

As redes de Bragg são componentes importantes em óptica guiada, na medida em que permitem obter elevada selectividade espectral através duma modulação periódica do índice de refração no volume de interacção da radiação que se propaga (tipicamente com períodos sub-micrométricos ao longo da direcção de propagação para funcionamento a comprimentos de onda abaixo dos 1,6  $\mu$ m). A rede de Bragg funciona como um espelho bastante selectivo em termos espectrais (Figura 5), e em que o comprimento de onda central da radiação reflectida depende do período da modulação do índice de refração e do índice de refração efectivo do modo que se propaga.

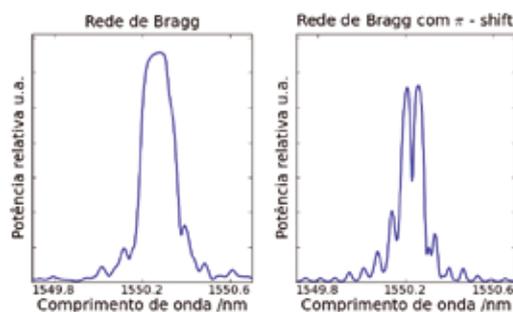


Fig. 5 - Espectro de uma rede de Bragg normal e de uma rede de Bragg com um salto de fase de  $\pi$ .

A fabricação de redes de Bragg integradas com laser femtosegundo é feita num único passo ao contrário do que acontece na escrita de redes Bragg em fibra óptica, onde o núcleo desta é alterado posteriormente ao processo de fabrico da fibra para produzir a rede. Com o uso de tecnologia de laser ultra-rápido, e devido à grande resolução espacial do processo, o núcleo do guia é produzido e ao mesmo tempo modulado para obter a rede de Bragg [9]. Este processo de escrita ponto-a-ponto é feito através do controlo da potência do feixe de escrita ao longo do tempo (e do espaço), utilizando um modulador acusto-óptico no caminho de propagação do feixe de escrita; deste modo podem ser implementadas funções de modulação arbitrárias, das quais se destacam as redes com *chirp* (variação do período ao longo do comprimento) [10], redes com saltos de fase (Figura 5, direita) e apodizadas (variação da amplitude de modulação do índice de refração ao longo do comprimento) [11]. Estas redes podem encontrar aplicação em cavidades ressonantes para lasers integrados, em sensores e produção de filtros espectrais para manipulação temporal e/ou espectral de impulsos de luz.

### Acopladores direccionais

Outro dispositivo importante em óptica integrada é o acoplador direccional, que consiste tipicamente em dois guias de ondas próximos, de tal modo que existe interacção entre eles. Estas estruturas podem ser utilizadas como divisores de potência, ou como multiplexadores de comprimento de onda (devido ao facto de que a constante de acoplamento entre guias adjacentes é função do comprimento de onda)

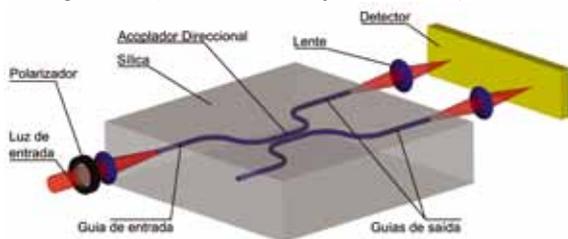


Fig. 6 - Representação esquemática de um acoplador direccional integrado. A polarização da luz à entrada é definida como Vertical e Horizontal relativamente ao plano do substrato.

Tirando partido da dependência da função de transferência destes dispositivos no comprimento de onda, no índice de refração e na birrefringência, foram desenhados acopladores direccionais para funcionar como separadores de polarização [12]. Como mostra a Figura 7, com um comprimento de interacção de cerca de 20 mm, foi possível obter separação completa da polarização para um determinado comprimento de onda.

Outros dispositivos que estão actualmente a ser desenvolvidos e que tiram partido da birrefringência dos guias de onda fabricados por este processo são os retardadores. Através do controlo dos parâmetros de fabricação dos guias é possível obter retardadores  $\lambda/2$  e  $\lambda/4$  para determinados comprimentos de onda. De futuro, o objectivo é usar estes componentes em conjunto para obter circuitos com aplicações em computação quântica.

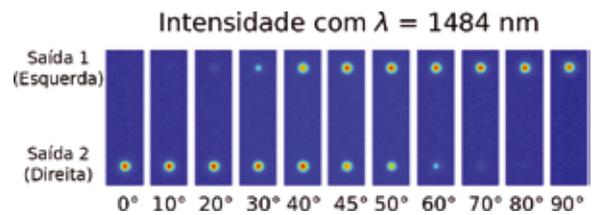


Fig. 7 - Imagens obtidas das saídas do separador de polarização baseado num acoplador direccional quando a orientação do polarizador de entrada varia entre 0°, Polarização Vertical, e 90°, Polarização Horizontal.

Em computação quântica são usados fótons, ou pares de fótons, entrelaçados para obter medidas de interferência quântica. A maioria destas experiências são realizadas em espaço livre e com componentes discretos, daí que o alinhamento destes componentes se torne crítico à medida que os sistemas se tornam mais complexos. A vantagem do uso de componentes integrados é que o alinhamento está intrinsecamente garantido. Por isso, para escalas de complexidade maiores, a fabricação dos componentes integrados é a única forma de obter dispositivos fiáveis, para além da vantagem óbvia de que o tamanho dos dispositivos é também bastante menor devido ao elevado grau de integração.

### Óptica integrada com microfluídica

Como já foi referido, a solubilidade da sílica ao ácido fluorídrico aumenta consideravelmente nas regiões expostas ao laser de femtosegundos, permitindo a definição de canais microfluídicos no interior do substrato. Esta tecnologia possibilita uma integração bastante eficiente de canais microfluídicos com dispositivos ópticos integrados, como exemplificado na Figura 8, com todas as vantagens já referidas de estabilidade e fabricação tridimensional.

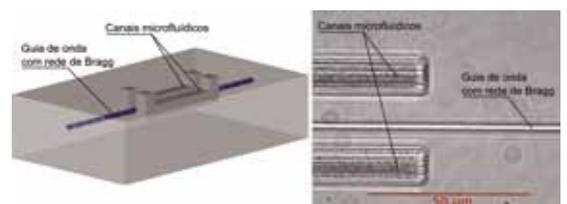


Fig. 8 - Guia de onda com rede de Bragg no meio de dois canais microfluídicos. Esquema (esquerda), imagem de microscópio (direita).

Sensores ópticos de índice de refração baseados em redes de Bragg e em campo evanescente [13], sistemas integrados complexos com canais microfluídicos para electroforese e detecção óptica de elementos químicos e biológicos através de cristais fotónicos [14], foram demonstrados utilizando escrita directa com laser de femtosegundos.

### Escrita directa em fibras ópticas

Embora os substratos de eleição para o desenvolvimento de dispositivos em óptica integrada sejam planares, guias de onda podem também ser fabrica-

dos na bainha de fibras ópticas convencionais, interagindo com a radiação guiada no núcleo da própria fibra. Pela sua flexibilidade e fácil manuseamento, as fibras ópticas são ideais para aplicação de sensores em locais de difícil acesso ou onde o uso de sistemas electrónicos não é possível. No caso da escrita em fibras ópticas, um dos principais desafios está no alinhamento do sistema devido à geometria das fibras e à necessidade de alinhar com precisão micrométrica alguns centímetros da mesma. Dispositivos *Lab-on-a-fiber* têm o potencial de ser usados para medição *in vivo* de factores biológicos com possíveis aplicações em biotecnologia.

## Conclusões

A escrita directa a laser para o processamento de materiais tem sido bastante explorada, e em especial a escrita directa com lasers pulsados femtosegundo tem assumido o carácter mais inovador ao

longo da última década.

Este artigo revê alguns dos aspectos fundamentais que permitem a fabricação de dispositivos ópticos integrados em sílica.

As perspectivas de desenvolvimento e o potencial desta tecnologia são enormes, pelo que certamente iremos assistir a um conjunto de demonstrações significativas e de aplicação nos mais diversos domínios do conhecimento.



**Luís A. Fernandes** terminou a licenciatura em Física Aplicada pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto em 2006. Desde 2007 é investigador do INESC Porto e iniciou o doutoramento em Física no mesmo instituto, em colaboração com o grupo de fotónica da Universidade de Toronto, para desenvolver escrita directa de circuitos ópticos

integrados com laser de femtosegundos. Em 2010 recebeu uma bolsa da SPIE for Optical Science and Engineering e dois prémios na conferência SPIE Photonics West. É membro da Sociedade Portuguesa de Física, da Optical Society of America, da SPIE e da IEEE Photonics Society; é membro da direcção da SPIE Toronto Student Chapter.



**Jason R. Grenier** concluiu o bacharelato em 2003 e o mestrado em 2006, ambos em engenharia electrotécnica na Universidade de Waterloo, Canadá. Actualmente é aluno de doutoramento no departamento de engenharia electrotécnica e do grupo de fotónica da Universidade de Toronto, dedicando-se à investigação em tecnologia de lasers de femtosegundos

e às suas aplicações em nanofabricação e em *lab-on-a-fibre*. É detentor de uma bolsa NSERC e de uma bolsa SPIE for Optical Science and Engineering. É membro da SPIE, da Optical Society of America e da IEEE Photonics Society, e presidente do SPIE Toronto Student Chapter.



**Paulo V. S. Marques** doutorou-se em Física pela Universidade do Porto em 2000. É Professor Auxiliar no Departamento de Física e Astronomia da FCUP e Investigador da Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do INESC-PORTO, unidade que actualmente coordena. Os seus trabalhos de investigação centram-se no domínio da óptica integrada e microfabricação, sensores integrados e escrita directa a laser. Tem publicados mais de 100 artigos em revistas e conferências internacionais e 4 patentes mundiais.



**Peter R. Herman** é professor no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Toronto. Lidera um vasto grupo de investigação em aplicações de tecnologias laser para nanofabricação 3D e sistemas ópticos integrados passivos e activos, cristais fotónicos, *lab-on-a-chip* biofotónica e sensores. Tem publicados mais de 200 artigos em revistas e conferências nesta área. É Fellow da Optical Society of America, membro da SPIE e co-chair da conferência SPIE Photonics West 'LASE'.



**J. Stewart Aitchison** é detentor de uma Nortel chair in Emerging Technology no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Universidade de Toronto. O seus interesses científicos passam por processamento de sinal e comutação óptica, integração optoelectrónica e biosensores ópticos. De 2004 a 2007 foi director do Emerging Communications Technology Institute da Universidade de Toronto, onde trabalhou para a construção de espaço de micro e nano-fabricação de acesso livre. Desde 2007 é vice-director para a investigação da Faculdade de Ciências Aplicadas e Engenharias da Universidade de Toronto. É Fellow da Optical Society of America, Fellow do Institute of Physics, Londres e, desde 2010, Fellow da AAAS.

- 1 H. Misawa e S. Juodkazis, "3D Laser Microfabrication: Principles and Applications", Wiley (2006).
- 2 M. Madou, "Fundamentals of Microfabrication", CRC Press (1998).
- 3 R. R. Gattass e E. Mazur, Nature Photonics 2, 219 (2008).
- 4 S. Kawata, H. Sun, T. Tanaka, e K. Takada, Nature 412, 697 (2001).
- 5 M. H. Hong et al., Applied Physics A: Materials Science & Processing 79, 791 (2004).
- 6 N. Tétreault et al., Advanced Materials 18 (4), 457 (2006).
- 7 C. Hnatovsky et al., Optics Letters 30 (14), 1867 (2005).
- 8 L. Shah, A. Arai, S. Eaton, e P. Herman, Optics Express 13, 1999 (2005).
- 9 H. Zhang, S. M. Eaton, e P. R. Herman, Optics Letters 32, 2559 (2007).
- 10 H. Zhang e P. R. Herman, Photonics Technology Letters 21 (5), 277 (2009).
- 11 L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman, J. S. Aitchison, e P. V. Marques, "Femtosecond Laser Writing of Phase-Shifted Bragg Grating Waveguides in Fused Silica", Femtosecond Laser Microfabrication (LM) Conference, San Jose, California, Oct. 11, (2009).
- 12 L. A. Fernandes, J. R. Grenier, P. R. Herman, J. S. Aitchison e P. V. S. Marques, "Femtosecond laser fabrication of birefringent directional couplers in fused silica", apresentado na conferência SPIE Photonics West, 2010.
- 13 V. Maselli, J. Grenier, S. Ho, e P. Herman, Opt. Express 17, 11719 (2009).
- 14 M. Haque et al., "Photonic Crystal Optofluidics for Electrochromatography on a Chip", apresentado na conferência SPIE Photonics West, (2010)

# Lasers de Fibra Óptica de Alta Potência: conceito, limitações e aplicações

M. Melo, J. M. Sousa, M. O. Berendt, S. T. Hendow, J. R. Salcedo

Multiwave Photonics, S.A., Rua Eng. Frederico Ulrich, 2650, 4470-605 Maia

mmelo@multiwavephotonics.com

## Resumo

Neste artigo pretende-se demonstrar as vantagens das propriedades da tecnologia de fibra óptica no desenvolvimento de lasers e amplificadores. É apresentado o estado actual da tecnologia, bem como os factores com maior impacto na limitação actual do desempenho dos lasers de fibra óptica, e as soluções desenvolvidas ou em estudo para os ultrapassar. São também apresentados alguns exemplos de aplicação destes lasers, particularmente em termos de processamento de materiais.

## Introdução

Desde que foram pela primeira vez demonstrados no início dos anos sessenta, quando ainda permitiam a emissão de apenas alguns miliwatts num comprimento de onda de  $1\ \mu\text{m}$  [1], os lasers e amplificadores de fibra óptica têm sido tema de grande actividade científica. Só a partir dos anos setenta, com a significativa redução das perdas de propagação de sinal em fibra óptica, e principalmente a partir dos anos oitenta, com o desenvolvimento dos amplificadores de fibra óptica dopada com érbio (*EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifiers*) operando na janela de telecomunicações de  $1,5\ \mu\text{m}$  [2], é que esta tecnologia recebeu um forte impulso. Desde muito cedo que os lasers e amplificadores de fibra óptica têm sido estudados para aplicações que podem ir desde as telecomunicações ao mapeamento e posicionamento laser, passando pelo processamento de materiais, imagiologia e medicina, usando para tal combinações de diferentes meios de ganho, esquemas de bombagem e desenhos de cavidades [3]. A elevada eficiência, a excelente qualidade modal, a fiabilidade, o confinamento da radiação, a ausência de manutenção e o facto de serem extremamente compactos, são algumas das principais vantagens dos lasers de fibra óptica quando comparados com tecnologias convencionais de estado sólido ou gás. É nestas propriedades únicas, combinadas com o enorme potencial em termos de escalonamento de potência, que o desenvolvimento actual desta tecnologia é suportado [4]. De facto, com o surgimento de

fibras ópticas de elevada área modal (*LMA - Large Mode Area*) com dupla bainha foi possível obter um significativo avanço em termos de escalonamento de potência [5], tornando possível atingir actualmente potências médias da ordem dos quilowatt mantendo operação no modo espacial transversal monomodo. O gráfico da Figura 1 ilustra a evolução recente dos lasers de fibra óptica CW<sup>1</sup> com operação no modo espacial transversal monomodo em termos de potência de saída. É importante referir que no ano de 2010 um novo máximo de 10 kW foi atingido [6].

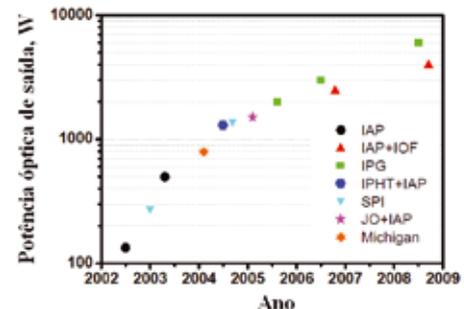


Fig. 1 - Evolução da potência de lasers CW de fibra óptica de dupla bainha com operação monomodo [7].

Apesar da constante evolução científica verificada, apenas nos últimos anos os lasers de fibra óptica ganharam um importante posicionamento industrial. Os lasers baseados em tecnologia de fibra óptica competem, hoje em dia e para muitas aplicações, directamente com os lasers de estado sólido convencionais e de gás, sendo em muitos casos, já considerados como candidatos ideais à sua substituição. Na realidade, apesar dos avanços obtidos, ainda existe uma enorme margem de progressão desta tecnologia sendo que o maior desafio é melhorar o seu desempenho, ultrapassando alguns factores limitadores [8]. Alguns desses factores são:

o aparecimento precoce de efeitos não-lineares, a degradação da qualidade modal do feixe de saída e o *photodarkening*<sup>2</sup>. Neste artigo, são inicialmente apresentados os conceitos e as propriedades gerais dos lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência. Alguns dos factores limitativos para o escalonamento de potência são depois descritos, nomeadamente os efeitos não-lineares de espalhamento estimulado de Raman (*SRS – stimulated Raman scattering*) e de Brillouin (*SBS – stimulated Brillouin scattering*). Também o desempenho, com especial atenção para a preservação da qualidade modal do feixe e o *photodarkening*, são objecto de referência neste trabalho. Por último, são apresentados alguns exemplos de aplicação destes lasers, particularmente em termos de processamento de materiais.

## Conceito e propriedades dos lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência

O esquema simplificado de um laser de fibra óptica é apresentado na Figura 2.



Fig. 2 - Laser de fibra óptica.

O conceito deste tipo de lasers é relativamente simples, baseando-se num meio de ganho constituído por um segmento de fibra óptica cujo núcleo é dopado com iões de terras raras, e numa cavidade formada por espelhos dicroicos acoplados ao topo da fibra ou por espelhos integrados em fibra, como por exemplo redes de Bragg em fibra óptica ou espelhos em anel. A radiação de bombagem pode também ser injectada por intermédio de componentes totalmente em fibra recorrendo a acopladores multiplexadores de comprimento de onda (*WDM – Wavelength Division Multiplexers*). Esta integração totalmente em fibra torna estes lasers extremamente compactos e proporciona uma excelente estabilidade ao longo do tempo, uma vez que não são necessários componentes nem alinhamentos adicionais. Inicialmente, perante a existência de fibras constituídas pelo núcleo e apenas uma bainha, a radiação de bombagem era acoplada directamente no núcleo requerendo fontes de bombagem espacialmente coerentes, como é o caso dos lasers semicondutores monomodo, que ainda hoje se encontram limitados a algumas centenas de miliwatts de potência de emissão. Com o aparecimento de fibras ópticas de elevada área modal (*LMA - Large Mode Area*) com

dupla bainha, surgiu um novo conceito que permitiu aumentar em muito a potência de bombagem injectada na fibra. Neste caso, o núcleo dopado é rodeado por um segundo guia de onda altamente multimodo. Neste segundo guia, normalmente designado por bainha interna, lasers semicondutores de bombagem com baixa coerência e potências muito elevadas podem ser utilizados para acoplamento de radiação numa área maior quando comparada com a do núcleo. Esta radiação de bombagem é gradualmente absorvida ao longo do comprimento da fibra e convertida em radiação laser de sinal de elevada coerência e alta potência. O conceito simplificado deste tipo de fibra encontra-se ilustrado na Figura 3.

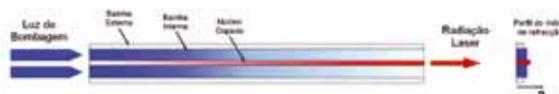


Fig. 3 - Fibra óptica de dupla bainha.

Por forma a eliminar os raios helicoidais, que têm uma baixa sobreposição com o núcleo, são utilizadas geometrias do núcleo e/ou da bainha interna de forma a quebrar a simetria do guia de onda cilíndrico. De entre as várias configurações possíveis, destacam-se a forma em D, as formas octogonal, hexagonal e rectangular, e a do núcleo descentrado. A Figura 4 ilustra as diferentes geometrias e demonstra que uma geometria não circular permite uma maior absorção da radiação de bombagem ao longo do comprimento da fibra. As formas em D, octogonal e hexagonal são as que melhor combinam um bom acoplamento modal com uma assemblagem de baixas perdas dada a maior compatibilidade com fibras padrão de geometria circular.

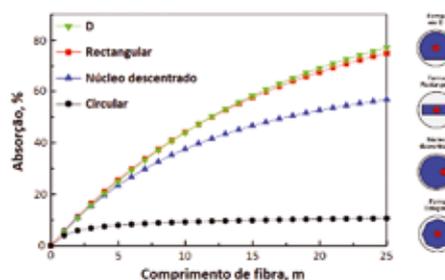


Fig. 4 - Absorção de bombagem para as diferentes geometrias utilizadas em fibras ópticas de dupla bainha. (© A. Tünnermann)

As fibras de dupla bainha podem também ser fabricadas como fibras microestruturadas [9], conforme representado na Figura 5.



Fig. 5 - Fibra microestruturada com uma bainha de ar.

As fibras microestruturadas oferecem diversas vantagens em relação às fibras convencionais, e é por isso que as

<sup>1</sup> Abreviatura de *Continuous Wave*, expressão que designa um laser contínuo.

<sup>2</sup> Processo quando qualquer objecto se torna escuro (não-transparente) devido à sua iluminação.

fibras de cristais fotônicos (PCF - *Photonic Crystal Fibers*) têm sido alvo de intensa actividade científica nos últimos anos. Estas fibras apresentam características inovadoras bastante interessantes, incluindo a capacidade de serem intrinsecamente monomodo para uma larga gama de comprimentos de onda da radiação [10].

Como se pode ver na Figura 5, estas fibras consistem num núcleo de sílica pura rodeado por uma matriz regular de orifícios de ar que actua como a bainha interna, pela qual a radiação de bombagem não consegue escapar. A bainha interna é depois rodeada por uma rede de pontes de sílica que são substancialmente mais estreitas que o comprimento de onda da radiação guiada. Esta estrutura resulta numa abertura numérica elevada (até 0,8, para a radiação de bombagem), o que reduz ainda mais o requisito de serem usadas fontes de bombagem com elevada coerência. A espessura dos orifícios de ar pode ser escolhida para que se obtenha simultaneamente boa estabilidade mecânica, boa condutividade térmica e perdas mínimas de bombagem. Tal como nas fibras de dupla bainha convencionais, o meio de ganho de um laser ou amplificador usando estas fibras pode ser fabricado introduzindo dopagens com iões de terras raras no núcleo [11].

Tal como descrito, as fibras de dupla bainha de elevada área modal (LMA) e as de cristais fotônicos (PCF) formam neste momento as duas grandes classes de desenhos de fibras ópticas usadas em lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência [12]. No entanto, é importante notar que quase todos os laser e amplificadores de fibra óptica disponíveis comercialmente hoje em dia usam a tecnologia LMA, uma vez que as PCF ainda levantam alguns problemas de integração com outros componentes do sistema, como por exemplo acopladores de bombagem e fibras de saída. A escolha do dopante do núcleo é determinada pelo comprimento de emissão desejado. A Fig. 6 mostra as bandas de emissão para os diferentes iões terras raras.

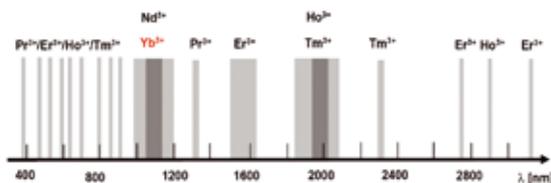


Fig. 6 - Bandas de emissão dos diferentes iões terras raras.

Da Fig. 6 destacam-se três janelas de emissão mais frequentemente usadas em lasers e amplificadores de fibra óptica de alta potência: 1  $\mu\text{m}$ , 1,55  $\mu\text{m}$  e 2  $\mu\text{m}$ . Neste contexto, o itérbio (Yb<sup>3+</sup>), o érbio (Er<sup>3+</sup>) e o túlio (Tm<sup>3+</sup>) são os elementos mais utilizados como dopantes, devido aos elevados níveis de eficiência obtidos.

### Principais limitações de escalonamento de potência e de desempenho

A atenção despertada pela tecnologia de lasers e amplificadores de fibra óptica exige um constante e forte desenvolvimento. Dispositivos com maior potência de saída, boa qualidade do feixe, garantida pela propagação apenas do

modo espacial transversal fundamental, e fiabilidade sem degradação dos parâmetros iniciais são factores cada vez mais solicitados pela indústria. Neste contexto, os temas abordados nesta secção, e que mais impacto têm nestes factores, são os efeitos não-lineares, a qualidade modal e o *photodarkening*.

### Efeitos não-lineares

O forte confinamento da radiação laser no núcleo da fibra óptica dopada, juntamente com o longo comprimento de interacção (que pode ir de alguns metros a algumas dezenas de metros), reforçam o aparecimento de efeitos não-lineares, constituindo o factor mais limitativo em termos de escalonamento de potência neste tipo de arquitectura laser [13, 14]. A mais importante classe de efeitos não-lineares resulta de processos de espalhamento estimulado inelástico, segundo o qual, acima de um determinado limiar, a radiação transfere parte da sua energia para o hospedeiro usado no vidro sob a forma de modos vibracionais excitados. Na região de comprimento de onda de 1  $\mu\text{m}$ , um grande desvio de frequência (~13 THz) é observado devido à excitação de fonões ópticos, processo designado como espalhamento estimulado de Raman (SRS), enquanto que a excitação de fonões acústicos origina um desvio de frequência bem menor (~17 GHz), designado por espalhamento estimulado de Brillouin (SBS). Os coeficientes de ganho para SRS e SBS são de, pelo menos, duas ordens de grandeza mais baixos que em qualquer outro meio não-linear comum. Contudo, devido ao elevado produto entre a intensidade da radiação e o comprimento de interacção no núcleo da fibra, estas não-linearidades podem ser observadas até mesmo para baixos valores de potência, o que limita a potência extraída no sinal, muito antes das limitações devido a problemas termo-ópticos.

As fórmulas que derivam o aparecimento destes efeitos não-lineares [15] demonstram uma proporcionalidade directa com o comprimento da fibra e com a intensidade do sinal no núcleo, e uma proporcionalidade inversa com a área modal da radiação guiada na fibra. Portanto, um alargamento do diâmetro do campo modal (*MFD - Mode field diameter*), conseguido normalmente pelo aumento do diâmetro do núcleo e/ou pela diminuição da abertura numérica (*NA - numerical aperture*), e uma redução do comprimento da fibra ajudam a evitar que estes efeitos surjam precocemente. Outras formas de reduzir ou eliminar estes efeitos incluem o uso de bombagem contra-propagante [16], a utilização de fibras com determinados perfis de índice de refração [17], a criação de gradientes de temperatura ao longo da fibra [18] e a injeção simultânea de radiação noutros comprimentos de onda [19].

### Qualidade do feixe

Uma elevada qualidade do feixe é crucial quando se pretende focar o feixe laser num ponto de redu-

zidas dimensões. O processamento de materiais (por exemplo, para impressão, marcação, corte e perfuração) é um exemplo de uma aplicação que tem esse requisito, necessitando assim de lasers com boa qualidade modal. A qualidade do feixe de um laser é essencialmente uma medida de quão fortemente o feixe consegue ser focado dentro de certas circunstâncias (isto é, com uma divergência limitada). As formas mais usadas para quantificar a qualidade do feixe são através do *Beam Parameter Product* (BPP) e do  $M^2$  ("M quadrado"). O BPP é dado pelo produto do raio do feixe,  $w_0$ , na cintura do feixe, com o ângulo de divergência do feixe no campo longínquo,  $\theta$  (metade do ângulo):

$$BPP = w_0 \times \theta \quad (\text{mm} \times \text{mrad}) \quad (1)$$

O factor  $M^2$ , de acordo com a norma ISO 11146 [20], é definido como o quociente entre o BPP e produto correspondente a um feixe gaussiano de difracção limitada,  $BPP_0 = \lambda/\pi$ , com o mesmo comprimento de onda,  $\lambda$ , como:

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_0} = \frac{\pi \times w_0}{\lambda} \times \theta \quad (2)$$

O factor  $M^2$ , também designado como factor de qualidade do feixe ou factor de propagação do feixe, é actualmente a medida mais comum da qualidade do feixe de um laser. Um feixe diz-se como tendo difracção limitada quando corresponde a um  $M^2=1$ , e é um feixe gaussiano. Este valor pode ser atingido por lasers de estado sólido convencionais a operar a baixa potência e num único modo espacial transversal, por lasers de fibra baseado em fibras monomodo, e por alguns díodos laser de baixa potência. Por outro lado, alguns lasers de alta potência podem ter valores muito elevados de  $M^2$ , muitas vezes acima de 100 e em alguns casos muito perto de 1000. Em lasers de estado sólido convencionais, este elevado valor é frequentemente resultado de distorções da frente de onda induzidas termicamente no meio de ganho. No caso dos lasers semicondutores de alta potência, a baixa qualidade do feixe resulta da operação com um guia de onda altamente multimodo. Em ambos os casos, a baixa qualidade do feixe está associada à excitação de modos de ordem superior. A Figura 7 apresenta os valores de BPP em função da potência para diferentes tipos de tecnologia laser. Como se pode verificar, os lasers de fibra são os que apresentam melhor qualidade do feixe, mesmo quando escalados a altas potência.

Tal como descrito na sub-secção anterior, o limiar de acção para efeitos não-lineares em fibras é inversamente proporcional à densidade de potência e portanto ao *Mode Field Diameter* (MFD) da fibra. De forma a diminuir a densidade de potência, o di-

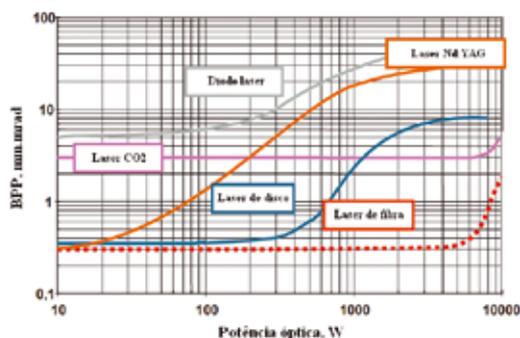


Fig. 7 - Qualidade do feixe em função da potência, para diferentes tipos de tecnologias laser [7].

âmetro do núcleo da fibra deve ser aumentado e/ou a NA reduzido. No entanto, um valor baixo de NA torna a fibra bastante sensível a curvaturas, diminuindo a guiagem e causando perdas, e um diâmetro do núcleo maior pode resultar na propagação de modos de ordem superior, e consequentemente na degradação da qualidade do feixe. Por forma a melhorar a qualidade do feixe, torna-se, portanto, necessário recorrer a técnicas de filtragem para supressão de modos de ordem superior, permitindo assim operação monomodo em fibras LMA ligeiramente multimodo. A técnica mais utilizada é a aplicação de perdas por curvatura, que são significativamente maiores para modos de ordem superior quando comparadas com as induzidas no modo fundamental  $LP_{01}$ . Portanto, um adequado enrolamento da fibra pode proporcionar operação monomodo nestas fibras [21]. Outras técnicas que permitem filtrar modos de ordem superior incluem a excitação apenas do modo fundamental [22,23], a manipulação do perfil de dopagem criando um ganho preferencial para o modo fundamental [24-26] e a adaptação do campo modal [27].

### Photodarkening

O *photodarkening* (também designado por absorção foto-induzida) é um fenómeno pelo qual as perdas de potência óptica num meio podem aumentar quando esse meio é irradiado. Vários meios, à partida opticamente transparentes tal como fibras ópticas, cristais laser e cristais não-lineares podem exibir *photodarkening* quando irradiados a determinados comprimentos de onda. Com isto, as perdas de transmissão resultantes de absorção ou espalhamento crescem com o tempo. Os mecanismos envolvidos e os parâmetros característicos, como a perda, a forma espectral, a dependência na intensidade da radiação, e a sua duração podem variar bastante, dependendo do material. Normalmente, o efeito de *photodarkening* envolve transformações estruturais microscópicas no meio, como a formação de centros de cor [28]. O mecanismo para a formação destes centros de cor ainda levanta bastante discussão na comunidade científica, sendo objecto de diferentes teorias [29,30].

Como já foi descrito, a redução do comprimento da fibra num laser ou amplificador de alta potência é de extrema importância dado que previne o aparecimento precoce de efeitos não-lineares. Se a concentração de dopantes for aumentada, resultando numa maior absorção de bombagem, o comprimento da fibra dopada pode ser bastante reduzido. Por outro lado, concentrações mais elevadas podem ser prejudiciais para outros efeitos, como é o caso do *photodarkening*, limitando assim a eficiência e o tempo de vida dos dispositivos de fibra de alta potência. De facto, o *photo-*

*darkening* em fibras dopadas com íons terras raras tem sido observado para diferentes dopantes, como por exemplo para o  $Tm^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ ,  $Eu^{3+}$ , sendo que mais tempo tem sido dedicado à caracterização deste fenómeno para fibras LMA dopadas com  $Yb^{3+}$  [31] devido ao elevado interesse para lasers e amplificadores nesta banda de espectral emissão. Algumas técnicas já bem conhecidas para atenuar ou mesmo eliminar este efeito baseiam-se na co-dopagem com outros materiais. Assim, o *photodarkening* pode ser de certa forma atenuado usando co-dopagem com alumínio e fortemente reduzido, até níveis negligenciáveis, através de co-dopagem com fósforo [32]. Na realidade, as fibras comercialmente disponíveis actualmente fazem uso destas técnicas de co-dopagem, tendo permitido enormes avanços nos lasers e amplificadores de fibra de alta potência no que a este efeito diz respeito.

## Aplicações

O campo de aplicações dos lasers de fibra óptica é vasto, mas onde de facto podem ter grande vantagem é onde as suas propriedades fazem a diferença em relação a outros tipos de lasers. Um exemplo claro disso é o processamento de materiais, onde a excelente qualidade do feixe e a flexibilidade de operação podem ser requisitos essenciais. Nesta secção são apresentados alguns exemplos de impressão, marcação e perfuração em vários tipos de materiais usando um laser comercial pulsado da empresa Multiwave Photonics especialmente desenvolvido para este tipo de aplicações. Uma fotografia do laser é apresentada na Figura 8, bem como o perfil do feixe e os impulsos de saída.

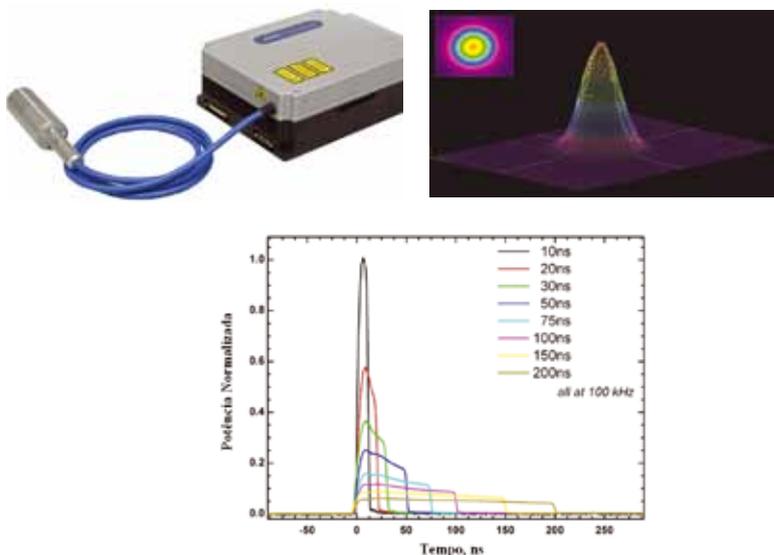


Fig. 8 - Laser de fibra óptica da série MOPA-M da empresa Multiwave Photonics com uma potência óptica média de saída de 20 W e comprimento de onda de emissão a 1064 nm. (a) Fotografia do laser com a respectiva saída em fibra e colimador, (b) perfil do feixe de saída ( $M^2=1,2$ ), e (c) perfis temporais das diferentes possibilidades de impulsos de saída, mantendo energia constante (100  $\mu$ J).

O laser representado na Figura 8 permite controlar e configurar independentemente as larguras de impulso, a frequência e a potência de saída. Esta flexibilidade possibilita uma optimização de todos os parâmetros afim de se obterem os melhores resultados para cada aplicação. A distribuição de energia do feixe é gaussiana e a qualidade do feixe ( $M^2$ ) é de

1,2, em todas as condições de operação. O laser permite a geração de impulsos ópticos com uma taxa de repetição desde um único impulso até 500 kHz, e durações de impulso pré-seleccionadas que podem variar entre 10 e 250 ns. A potência óptica média de emissão do laser é de 20 W a um comprimento de onda de 1064 nm. A saída colimada do laser apresentado na Figura 8 é depois integrada num sistema com um scanner uma lente de focagem que permite efectuar o trabalho desejado em diferentes materiais.

Para investigar os efeitos de largura de impulso e potência de pico na marcação de aço inoxidável, pequenas áreas são preenchidas usando os impulsos entre 10 e 200 ns apresentados na Figura 8-c), com uma energia constante de 100  $\mu$ J. O material utilizado é uma folha de aço inoxidável (#304) com 0,5 mm de espessura. O diâmetro do feixe focado na superfície do material é 56  $\mu$ m. Os resultados são apresentados na Figura 9, usando também diferentes velocidades de varrimento.

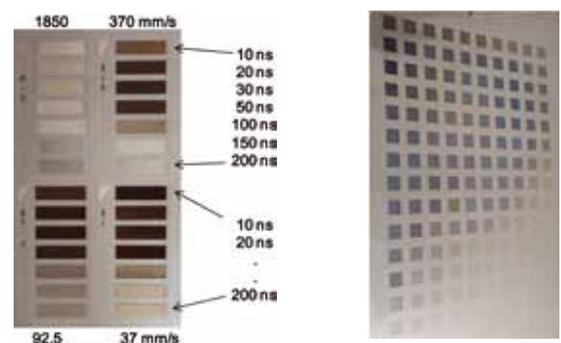


Fig. 9 - Marcação de cor em aço inoxidável #304 com espessura de 0,5 mm, (a) usando sete larguras de impulso, como representado na Figura 8-c), e quatro velocidades de varrimento do scanner: 1850, 370, 92,5 e 37 mm/s; e (b) usando uma largura de impulso fixa de 200 ns mas variando a potência média de emissão do laser entre 6 e 10 W.

Existe um efeito óbvio da potência de pico e da largura de impulso na intensidade da região marcada em aço inoxidável. Como se pode verificar na Figura 9, a combinação de diferentes larguras de impulso com diferentes potências de pico e as diferentes velocidades de varrimento, bem como a variação da potência média óptica, permitem a obtenção de marcação de um padrão bastante diferenciado de cores em aço inoxidável. Este é apenas um exemplo em como a possibilidade de manipulação dos diferentes parâmetros de um laser de fibra óptica permite a obtenção de uma gama alargada de resultados. Assim, da mesma forma que no exemplo da Figura 9-b), a Figura 10 apresenta resultados de marcação de cor em titânio, usando uma duração de impulso de 200 ns e diferentes potências médias (6-10 W). São também usadas diferentes velocidades de varrimento do scanner e em alguns casos múltiplas passagens de forma a obter uma gama mais alargada de cores.



Fig. 10 - Marcação de cor em folha de titânio com 0,5 mm de espessura usando uma largura de impulso fixa de 200 ns mas variando a potência média de emissão do laser entre 6 e 10 W.

Como se pode verificar o material permite a obtenção de cores mais vividas e brilhantes, sendo que a flexibilidade no controlo dos parâmetros do laser mais uma vez permite a definição da tonalidade a marcar.

A Figura 11 apresenta marcação de várias linhas num filme fino de alumínio, 0,6  $\mu\text{m}$ , depositado num substrato de silício mono-cristalino. A energia do impulso é mantida constante nos 50  $\mu\text{J}$  e o feixe é focado na superfície do material com um diâmetro de 20  $\mu\text{m}$ .



Fig. 11 - Efeitos de ablação num filme fino de alumínio de 0,6  $\mu\text{m}$  depositado num substrato de silício usando diferentes larguras de impulso.

A inscrição destas linhas também foi efectuada directamente em silício mono-cristalino obtendo-se profundidades da ordem dos 15  $\mu\text{m}$  numa passagem do feixe a uma velocidade de 1 m/s. Os resultados são apresentados na Figura 12. Neste caso a energia dos impulsos é de 100  $\mu\text{J}$  e a potência média de 10 W. Mais uma vez, os impulsos mais curtos, que têm uma potência de pico superior, provocam maiores danos, originando mais detritos.

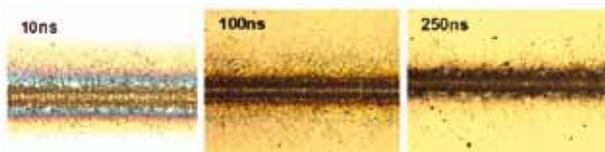


Fig. 12 - Marcação em silício mono-cristalino com diferentes larguras de impulso.

A Figura 13 apresenta resultados de marcação em silício poli-cristalino. O substrato de silício é cortado e um microscópio electrónico de varrimento é utilizado para diagnóstico do perfil e profundidade de ablação. Os impulsos aplicados em todos os casos têm uma energia de 100  $\mu\text{J}$ , a potência média é de 10 W e o feixe na superfície tem um diâmetro de 20  $\mu\text{m}$ . Como se verifica pela Figura 13, impulsos longos, apesar de com potências de pico mais baixas, apresentam maior profundidade de penetração. A

profundidade obtida neste caso, com uma única passagem a uma velocidade de 1 m/s, varia entre 11 e 45  $\mu\text{m}$  para larguras de impulso entre 10 e 150 ns, respectivamente.

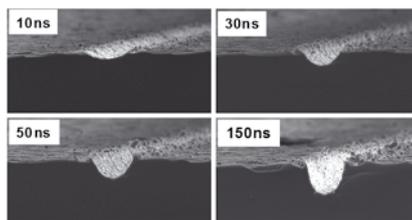


Fig. 13 - Vista do corte (secção cruzada) de uma amostra de silício poli-cristalino marcado com diferentes larguras de impulso a uma energia constante de 100  $\mu\text{J}$ , e com uma taxa de repetição de 100 kHz.

Para se conseguir perfuração em silício poli-cristalino as condições de operação do laser são alteradas para potência de pico constante, ou seja, todas as larguras de impulso têm a mesma potência de pico, sendo a taxa de repetição ajustada por forma a ter-se sempre a mesma potência média. A espessura do material é de 200  $\mu\text{m}$  e o diâmetro do feixe focado na superfície inferior (saída do feixe) do material é de 20  $\mu\text{m}$ . Impulsos de 10, 50, 100 e 250 ns são usados, mantendo a mesma potência de pico de 10 kW e a mesma potência média de 10,5 W. O tempo de emissão é o mesmo para todos os impulsos. De notar que diâmetro do furo de entrada com 10 ns é menor e com mais detritos, enquanto que com 250 ns é maior e bastante mais limpo. Os furos de saída têm diâmetros que vão desde os 18  $\mu\text{m}$  para 10 ns até aos 25  $\mu\text{m}$  para 250 ns.

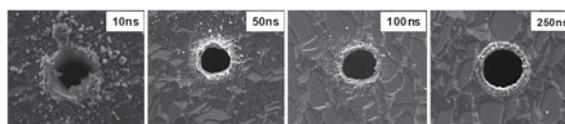


Fig. 14 - Furação num substrato de silício poli-cristalino com uma espessura de 200  $\mu\text{m}$ , com diferentes larguras de impulso a uma potência de pico constante de 10kW.

Por último, apresenta-se um exemplo de marcação em cerâmica. Os materiais cerâmicos não são fáceis de marcar devido à sua elevada temperatura de fusão, à sua composição não-uniforme e à elevada reflectividade que reduz a energia absorvida. Consequentemente, impulsos com alta potência de pico são desejados de forma a produzir uma marca consistente na superfície. A Figura 15 demonstra a escrita num material cerâmico, usando uma potência de pico de 10 kW, uma largura de impulso de 250 ns a uma taxa de repetição de 21 kHz e uma energia de 0,5 mJ.

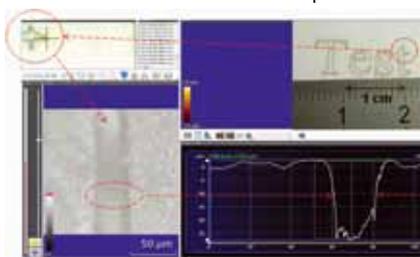


Fig. 15 - Escrita num substrato cerâmico com uma profundidade de 30  $\mu\text{m}$ , usando várias passagens com uma largura de impulso de 250 ns, uma energia de 0,5 mJ e 10 W de potência média.

Como se verifica pelos exemplos demonstrados existe um conjunto de parâmetros ideais para cada aplicação. Neste contexto, a flexibilidade em termos de operação do laser é um factor essencial para a optimização da tarefa.

## Conclusão

Neste artigo foram apresentados os conceitos, as propriedades e as principais limitações actuais dos lasers e amplificadores de fibra óptica. Foram também demonstrados alguns exemplos de aplicação destes lasers em processamento de materiais. O seu elevado desempenho associado à sua flexibilidade permite processar diversos tipos de materiais e efectuar os ajustes necessários para uma optimização do trabalho. Esta tecnologia prova ser, hoje em dia, capaz de competir directamente com os lasers de estado sólido convencionais em muitos casos com vantagens acrescidas. O advento das fibras ópticas de dupla bainha proporcionou o escalonamento de potência deste tipo de lasers, por vezes limitado pelo aparecimento precoce de efeitos não-lineares. Também a qualidade do feixe e o *photodarkening* são factores que podem afectar o comportamento destes lasers. Estes factores estão intimamente ligados entre si e devem ser vistos como um todo quando se procura um elevado desempenho em lasers ou amplificadores de fibra óptica de alta potência.

- 1 C.J. Koester, E. Snitzer, Appl. Opt. 3, 1182 (1964).
- 2 R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D. N. Payne, Electron. Lett. 23, 1026 (1987).
- 3 P. Urquhart, Optoelectronics, IEE Proceedings J 135(6), 385 (1988).
- 4 A. Tünnermann et al. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, S681 (2005).
- 5 L. Zenteno, IEEE J. Lightwave Technol. 11, 1435 (1993).
- 6 V. Fomin, et al., 5th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and their Applications, St. Petersburg, Russia, paper TuSy1.3 (2010).
- 7 A. Tünnermann, 5th International Workshop on Fiber Lasers, Dresden, Germany (2009).
- 8 J.D. Dawson et al. Opt. Express 16, 13240 (2008).
- 9 W. Wadsworth, R. Percival, G. Bouwmans, J. Knight, P. Russell, Opt. Express 11, 48 (2003).
- 10 J. Knight, T. Birks, J. Russell, D. Atkin, Opt. Lett. 21, 1547 (1996).
- 11 W. Wadsworth, J. Knight, W. Reeves, P. Russell, Electron. Lett. 36, 1452 (2000).
- 12 J. C. Baggett, T. M. Monro, K. Furusawa, D. J. Richardson, Opt. Lett. 26, 1045 (2001).
- 13 Y. Jaouën, G. Canat, S. Grot, S. Bordaïs, C. R. Physique 7, 163 (2006).
- 14 M. R. Melo, J. R. Salcedo, M. O. Berendt, J. M. Sousa, Fiber Laser Applications (FILAS) Topical Meeting, paper FThE8, Feb 13-16, Istanbul, Turkey (2011).
- 15 J.D. Dawson et al., Opt. Express 16, 13240 (2008).
- 16 Y. Wang, IEEE J. Quantum Electron. 41, 779 (2005).
- 17 J. Kim, P. Dupriez, C. Codemard, J. Nilsson, J. K. Sahu, Opt. Express 14, 5103 (2006).
- 18 V.I. Kovalev, R.G. Harrison, Opt. Lett. 31, 161 (2006).
- 19 M. Melo, J.M. Sousa, M.O. Berendt, Proceedings of SPIE Vol. 7914, 79142N, Photonics West 2011-LASE, San Francisco, CA (2011).
- 20 ISO Standard 11146, "Lasers and laser-related equipment - Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios" (2005).
- 21 P. Koplow, L. Goldberg, R. P. Moeller, D. A. V. Kliner, Opt. Lett. 25, 442 (2000).
- 22 M.E. Fermann, Opt. Lett. 23, 52 (1998).
- 23 O.G. Okhotnikov, J.M. Sousa, Electron. Lett. 35, 1011 (1999).
- 24 M. Gong, Y. Yuan, C. Li, P. Yan, H. Zhang, S. Liao, Opt. Express 15, 3236 (2007).
- 25 O.G. Okhotnikov, J.M. Sousa, Electron. Lett. 33, 1727 (1997).
- 26 J.M. Sousa, O.G. Okhotnikov, Appl. Phys. Lett. 74, 1528 (1999).
- 27 M. Faucher, Y. K. Lize, Conf. on Lasers and Electro-Optics CFI7 (2007).
- 28 L. Dong et al., Applied Optics 34, 3436 (1995).
- 29 L. B. Glebov, Glass Sci. Technol. 75, C2 (2002).
- 30 M. Engholm, L. Norin, D. Åberg, Opt. Lett. 32, 3352 (2007).
- 31 J. Koponen et al., Applied Optics 47, 1247 (2008).
- 32 S. Jetschke, S. Unger, A. Schwuchow, M. Leich, J. Kirchhof, Opt. Express 16, 15540 (2008).



**Miguel Melo** Licenciado em Optoelectrónica e Lasers e mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela Universidade Porto é actualmente Engenheiro de Desenvolvimento na empresa Multiwave Photonics SA. Anteriormente participou como investigador em projectos nacionais e europeus no INESC Porto e integrou a divisão de lasers de fibra óptica da empresa Multiwave Networks Portugal. Possui aproximadamente 10 anos de experiência na investigação e desenvolvimento de dispositivos, amplificadores e lasers de fibra óptica. Tem mais de 10 artigos publicados em revistas e conferências internacionais.



**João M. Sousa** Doutorado em Física pela Universidade do Porto é co-fundador e actualmente Director de I&D da Multiwave Photonics SA. Anteriormente foi também co-fundador e Director de Engenharia da Multiwave Networks Portugal Lda. Foi Professor Auxiliar na Universidade de Aveiro e na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Tem aproximadamente 20 anos de experiência em Investigação e Desenvolvimento de Lasers e Amplificadores de Alta Potência em Fibra Óptica, publicou mais de 30 artigos em jornais e conferências internacionais e é autor de 5 patentes. Na Multiwave tem liderado o desenvolvimento da tecnologia base da empresa tendo resultado já no lançamento de mais de 15 novos produtos ao longo dos últimos anos.



**Martin O. Berendt** Doutorado pela Universidade Técnica da Dinamarca é actualmente Cientista Sénior na empresa Multiwave Photonics SA. Anteriormente foi Engenheiro de Sistemas de Comunicações Ópticas na Siemens SA, responsável pela divisão de lasers de fibra óptica na empresa Multiwave Networks Portugal e cientista sénior na Corning Incorporated. Teve ainda a oportunidade de desenvolver trabalho no âmbito de doutoramento e de pós-doutoramento no NKT Research Center, e na Specialty Fibers Lucent Danmark, na Dinamarca, no Optoelectronic Research Centre University of Southampton, no Reino Unido e no Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade de Campinas (UNICAMP), no Brasil. Tem vários artigos publicados e várias patentes concedidas na área dos lasers e da tecnologia óptica.



**Sami T. Hendow** Doutorado em Optical Sciences pela Universidade de Arizona é actualmente Director Sénior na empresa Multiwave Photonics SA. Anteriormente foi responsável de engenharia na Spectra-Physics, cientista sénior na Northrop Grumman, e director de engenharia na Southampton Photonics e na Ditech Communications. Tem vários artigos publicados e várias patentes concedidas na área dos lasers e da tecnologia óptica.



**José R. Salcedo** Doutorado pela Universidade de Stanford é actualmente CEO da empresa Multiwave Photonics SA. Fundador da Multiwave após 15 anos de actividade de I&D em optoelectrónica, lasers e fibras ópticas na Universidade do Porto (onde foi Professor Catedrático na FEUP e Professor Associado na FCUP) e no INESC Porto (tendo sido co-fundador em 1984 e onde também co-fundou a Unidade de Optoelectrónica em 1990). Anteriormente desenvolveu uma larga actividade profissional nos EUA durante cerca de 10 anos Tem vários artigos publicados e várias patentes concedidas principalmente na área dos lasers.

# Novos avanços utilizando random lasers em fibra óptica

Orlando Frazão<sup>1</sup>, Manuel B. Marques<sup>1,2</sup>

1. INESC Porto, Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto  
2. Dep. Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto

ofraza@inescporto.pt; mbmarque@fc.up.pt

## Resumo

Vários tipos de lasers em fibra, com realimentação distribuída aleatória, têm sido demonstrados na última década. Nestes lasers o espelho tradicional é substituído por um espelho distribuído gerado aleatoriamente pelo espalhamento de Rayleigh, amplificado pelo efeito de Raman. Estes espelhos apresentam uma solução alternativa aos espelhos convencionais abrindo novas oportunidades na concepção de sistemas laser e aplicações, por exemplo no contexto da sensorização óptica remota. De referir também que a utilização deste efeito para lasers de multi-comprimento de onda é de elevada atractividade na área das comunicações ópticas.

## Introdução

Um esquema convencional de um laser requer dois elementos chave: um material de ganho que promove amplificação e uma cavidade óptica para obter realimentação. A acção laser ocorre quando o ganho total na cavidade supera as perdas totais da cavidade. As características operacionais dos lasers convencionais são determinadas pelo ganho do meio e pelo esquema da cavidade, que define a estrutura dos modos. No entanto, nos lasers de emissão aleatória sem cavidade convencional ou com cavidade aberta, o múltiplo espalhamento dos fótons no meio desordenado, sem estrangimentos de comprimento de onda, resulta numa acção laser desordenada, isto é, num feixe com variação aleatória dos modos espaciais.

As primeiras observações deste efeito foram obtidas usando lasers de bombagem nas fibras ópticas baseadas em terras raras [1] ou em outro em tipos de fibras [2-5]. Estes tipos de lasers apresentam algumas vantagens, incluindo uma tecnologia simples (não é necessário fabricar micro-cavidades de elevado custo baseadas em filmes finos ou de escrita directa) e baixo custo. No entanto, em diversas aplicações o seu desempenho pode ser alterado

facilmente, de modo a serem capazes de desafiar tecnologicamente os lasers convencionais.

Foram realizados vários estudos usando este efeito em combinação com outros efeitos não lineares ou redes de Bragg [6-10]. Recentemente, foi demonstrada a sua aplicação em lasers de cavidades ultra-longas [11] com 200 km de comprimento, assim como a geração multi-comprimento de onda com 798 canais usando o efeito de Brillouin [12]. Foi também estudada a sua aplicação em sensores para a medição simultânea da deformação e da temperatura usando sensores de Bragg em fibra óptica [13].

Neste artigo apresentamos algum do trabalho desenvolvido no INESC Porto sobre este tipo de lasers. Foi desenvolvido um sistema laser simples e versátil, usando dispositivos ópticos de fácil acesso, que pode ser utilizado quer na medição remota de sensores, quer em aplicações em comunicações, tais como lasers de multi-comprimento de onda, ou na conversão de comprimento de onda baseada na mistura de quatro ondas.

**Espalhamento de Rayleigh** – Na interacção da luz com os átomos, uma pequena fracção desta é espalhada em todas as direcções, mantendo a frequência original. A potência espalhada depende do comprimento de onda  $\lambda$ , sendo proporcional a  $1/\lambda^4$  – de facto, é o espalhamento de Rayleigh da luz do Sol na atmosfera que dá a cor azul ao céu! Se houver alguma regularidade na disposição dos átomos o efeito é reduzido, desaparecendo totalmente num cristal perfeito. Nas fibras ópticas, este efeito é fundamental na determinação do nível inferior das perdas de transmissão.

**Espalhamento de Raman** – Além do espalhamento de Rayleigh, quando a luz interage com a matéria também é possível que o átomo, ou molécula, acabe num estado de energia diferente do original. Neste caso, há um desvio da frequência da luz espalhada proporcional à diferença de energia entre os dois estados. Este efeito pode ser estimulado se existir outra onda cuja frequência seja igual à da onda resultante (amplificação Raman). Numa fibra óptica,

este efeito é potenciado pelo confinamento da radiação no núcleo da fibra e pela longa distância de interacção, sendo utilizado para amplificar o sinal transmitido.

**Espalhamento de Brillouin** – Ao interagir com a matéria, um fóton pode dar origem a um fonão e a outro fóton com energia inferior ao incidente. O fenómeno inverso também existe, embora com uma probabilidade menor. Uma explicação muito simplificada do espalhamento de Brillouin pode ser dada da seguinte forma: o campo eléctrico da luz incidente, por electrostricção, cria uma pequena variação periódica da densidade do material (onda acústica) que se propaga no material; por sua vez, esta onda acústica difracta a luz incidente, que sofre um desvio de frequência devido ao efeito Doppler causado pela difracção numa rede em movimento. Sob certas condições, o espalhamento pode passar de espontâneo a estimulado, aumentando significativamente a potência espalhada. O espalhamento de Brillouin é particularmente eficiente nas fibras ópticas monomodo pelo facto de as duas ondas (electromagnética e acústica) estarem confinadas à região do núcleo. O aparecimento do espalhamento estimulado faz aumentar bruscamente as perdas de transmissão podendo, para potências elevadas, “reflectir” quase toda a potência de volta à entrada da fibra.

**Mistura de quatro ondas (FWM, four-wave mixing)** – Quando três ondas interagem num meio não-linear podem dar origem a uma quarta onda, cuja frequência é dada por  $f_4 = f_1 + f_2 - f_3$ . Para este processo ser eficiente é necessário que as quatro ondas se mantenham em fase durante a sua propagação. No caso de só existirem duas ondas incidentes ( $f_1 = f_2$ ) o efeito é designado por mistura de quatro ondas degenerada (DFWM, *degenerate four-wave mixing*). Nas fibras ópticas monomodo este efeito torna-se importante na zona de mínima dispersão. Pelo maior confinamento do modo, as fibras de dispersão deslocada (DSF, *dispersion shifted fiber*) são as que exibem este efeito em maior grau. Em comunicações ópticas, a mistura de quatro ondas é particularmente preocupante na multiplexagem em comprimento de onda densa pelo ruído de *crosstalk* criado. No entanto, para conversão em comprimento de onda este fenómeno é uma solução interessante.

## Princípios de funcionamento dos lasers

A Figura 1 apresenta três tipos diferentes de cavidades usadas para lasers. Na Figura 1.a está representada uma cavidade ressonante de um laser convencional, consistindo em dois espelhos e um meio de ganho, o qual pode usualmente ser um gás, um líquido ou um sólido [4]. Estes tipos de lasers apresentam uma elevada coerência espacial, com modos longitudinais bem definidos e determinados pelo comprimento físico da cavidade. Na Figura 1. b apresentamos outro tipo de laser denominado por *random* laser em que a realimentação ocorre através da reflexão de fótons num dispositivo com uma fase óptica codificada aleatoriamente, em vez do tradicional espelho. Os fótons são amplificados com uma dispersão aleatória do ponto de reflexão, nunca fazendo uma volta completa à cavidade com a mesma duração, o que torna impossível formar uma coerência

espacial. Estes lasers não têm uma selecção de modos ressonantes, nem coerência espacial, e não apresentam uma fase definida. Normalmente, estes lasers geram picos estreitos estocásticos sobrepostos ao espectro de emissão do laser.

Na Figura 1.c apresentamos a nova solução de cavidades de lasers em fibra sem uso de espelhos na extremidade da fibra, isto é, toda a reflexão é feita internamente usando o espalhamento de Rayleigh. O fenómeno da emissão laser aleatória deste tipo de lasers ocorre devido a uma sequência complexa de fenómenos, mas que está basicamente relacionada com a geração do espalhamento de Rayleigh da emissão estimulada do laser. Devido à intensidade do espalhamento gerado na fibra e amplificado pelo laser de Raman, o próprio espalhamento de Rayleigh consegue gerar um espalhamento duplo, que também é amplificado, originando-se assim múltiplas interferências (*MPI, multipath interference*) associadas ao batimento das várias réplicas do sinal com diferentes atrasos. Os dois espalhamentos de Rayleigh entram num processo de realimentação ao longo da fibra, formando-se assim um espelho distribuído. O espelho tem um efeito semelhante a duas reflexões discretas, com uma reflectância efectiva proporcional ao espalhamento total da potência incidente.

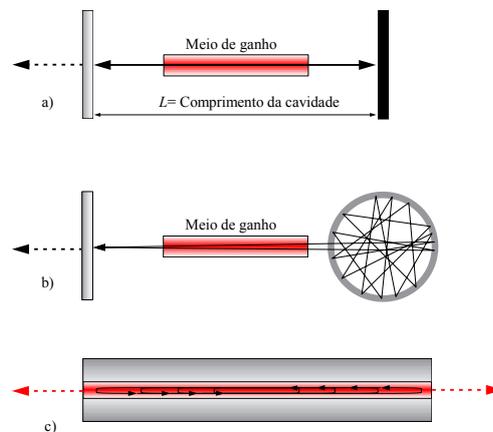


Fig. 1. Exemplos de cavidades laser: a) Laser baseado numa cavidade Fabry-Perot; b) laser com realimentação não ressonante; c) laser em fibra com realimentação distribuída aleatória.

## Aplicações

A Figura 2 apresenta a implementação de uma configuração simplificada para três aplicações. O sistema é constituído por um laser de bombagem que emite a 1450 nm com potência máxima de 5 W, dois acopladores do tipo *wavelength-division multiplexing WDM* (1450/1550 nm) e 1 km de fibra com dispersão compensada (DCF, *dispersion compensating fiber*). Um analisador de espectros óptico, (OSA, *optical spectrum analyser*) foi utilizado para detectar e observar a variação dos sinais. A ligação ao OSA é feita por um conector FC/APC (*fiber connector/angled physical contact*) para eliminar qualquer

reflexão de Fresnel. Para aplicações em sensores ópticos (Figura 2.a), foram usados sensores de Bragg em fibra óptica localizados a 10 km de distância do bloco de emissão e fotodetecção, utilizando-se para isso um rolo de fibra óptica monomodo (tipo SMF-28). Para aplicações em lasers multi-comprimento de onda foram usadas duas configurações distintas. Na Figura 2.b é utilizado um espelho em anel com uma secção de fibra de elevada birrefringência formando um interferómetro de Sagnac não balanceado [5]. Este espelho apresenta algumas vantagens, nomeadamente o facto do espaçamento em comprimento de onda do filtro ser imposto pelo comprimento da fibra de elevada birrefringência e pelo próprio valor da birefringência. Na Figura 2.c é utilizado um laser DFB (*distributed feedback laser*) para gerar o efeito Brillouin em cascata, permitindo assim obter um número elevado de riscas de emissão laser, separadas pela diferença de comprimento de onda do laser DFB e da emissão estimulada do laser de Brillouin.

O fenómeno da emissão laser aleatória (*Rayleigh lasing*) observado na Figura 3.a foi obtido numa configuração contra-propagante relativa à bombagem (*Rayleigh backscattering*), isto é, o OSA está localizado na posição dos sensores. Na Figura 3 pode-se observar que o fenómeno da emissão laser aleatória (*Rayleigh lasing*) é dominante na região do ganho de Raman (1550 a 1570 nm) gerado na fibra de dispersão compensada. A cavidade laser é então obtida pela combinação da selectividade espectral da rede de Bragg e do espelho distribuído. A Figura 3.b mostra o espectro do sinal óptico à saída do sistema. A potência de bombagem do laser de Raman foi de 1 W. Apenas as reflexões das redes de Bragg cujo comprimento de onda está localizado dentro do espectro de ganho de Raman contribuem para a acção laser. As linhas laser são obtidas devido à cavidade linear criada entre a reflexão selectiva da rede de Bragg e do correspondente espelho distribuído

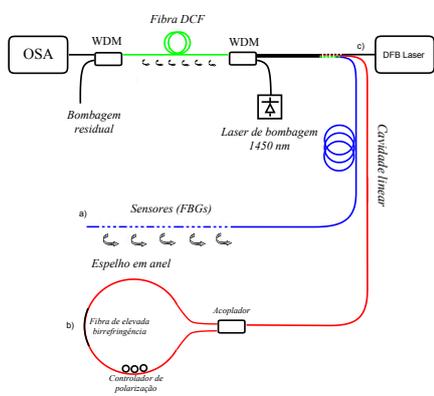


FIGURA 2

Fig. 2. Configuração simplificada baseado no efeito Raman em cooperação com o espalhamento de Rayleigh para: (a) aplicações em sensores [13]; (b) Para lasers de multi-comprimento de onda usando um espelho em anel [15]; (c) Laser de multi-comprimento de onda usando um espelho em anel [15]; (d) Laser em formato pente com 440 canais.

obtido pela cooperação do espalhamento de Rayleigh com a amplificação de Raman.

A Figura 3.c apresenta a resposta espectral da configuração apresentada na Figura 2.b. Nesta configuração temos 15 linhas de acção laser estável; no entanto a banda de amplitude não está equalizada, pois depende do comprimento de onda do laser de bombagem e da curva de ganho da fibra. Para resolver o problema, basta usar dois comprimentos de onda distintos dos lasers de bombagem do ganho Raman para uma equalização e optimização da largura de banda dos lasers de multi-comprimento de onda.

Na Figura 3.d é apresentada a saída do laser de multi-comprimento de onda em formato pente (*comb laser*) obtido pela geração de Brillouin em cascata (Figura 2.c). O espectro tem 440 canais separados por ~11 GHz. O efeito Brillouin em cascata é possível devido ao espelho distribuído amplificado pelo Raman permitindo gerar o efeito Brillouin nos dois sentidos do espelho distribuído. Estes lasers têm possíveis aplicações em *dense wavelength-division multiplexing* (DWDM) e em metrologia.

Recentemente, foi possível demonstrar outro efeito não linear denominado mistura de quatro ondas para aplicação em sensores [16]. Nesta configuração, é possível obter um sensor com a capacidade de medir uma dada deformação mecânica com insensibilidade à temperatura. Um dos sensores está isolado da deformação, funcionando como sinal de bombagem, enquanto o outro laser funciona como sensor. Quando é aplicada deformação ao sensor, o sinal convertido varia em comprimento de onda e em amplitude. A variação em amplitude é esperada devido ao sinal sair da largura de banda da eficiência da mistura de quatro ondas. Uma vez que os dois lasers são sensíveis simultaneamente à temperatura, mantendo-se assim dentro da largura de banda da eficiência da mistura de quatro ondas, o sensor é insensível à temperatura. Por último, foi ainda demonstrado um sensor de intensidade para medição de deslocamento usando uma configuração em anel [17].

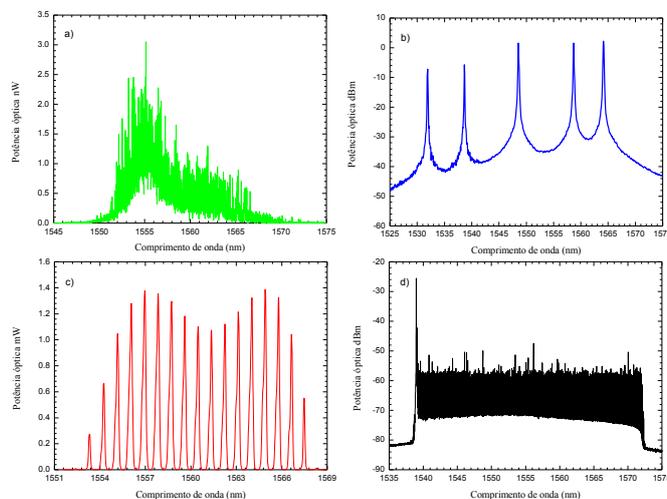


Figura 3

Fig. 3. a) Emissão laser aleatória associada à presença do espelho virtual na fibra óptica; b) Emissão laser usando sensores de Bragg em fibra óptica [13]; c) Laser de multi-comprimento de onda usando um espelho em anel [15]; d) Laser em formato pente com 440 canais.

## Considerações finais

Os *random lasers* foram considerados um dos temas principais de 2010 pela Optical Society of America (OSA). O INESC Porto e a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto têm vindo a trabalhar neste tópico, sobretudo na aplicação em sensores em fibra óptica para detecção remota. Diversos artigos têm vindo a ser publicados mostrando que estes lasers apresentam estabilidade nas linhas de acção laser, o que faz antever a sua aplicabilidade numa grande variedade de situações.

- 1 I. N. Duling, III, R. P. Moeller, William K. Burns, C. A. Villarruel, L. Goldberg, Elias Snitzer, H. Po, "Output characteristics of diode pumped fiber ASE sources", IEEE Journal of Quantum Electronics 27, 995 (1991).
- 2 C.-J. Chen, H. Lee, and Y.-J. Cheng, "Instability In Raman amplifiers caused by distributed Rayleigh reflection", in Optical Fiber Communication Conference, 86, TuC2 (2003).
- 3 J. M. Sousa, M. Melo, L. A. Ferreira, J. R. Salcedo, M. O. Berendt, "Product design issues relating to rare earth doped fiber ring lasers and superfluorescence sources", Proc. SPIE 6102, 610223 (2006).
- 4 F. Vanholsbeeck, S. Coen, P. Emplit, C. Martinelli, T. Sylvestre, "Cascaded Raman generation in optical influence of chromatic fibers: dispersion and Rayleigh backscattering", Optics Letters 29, 998 (2004).
- 5 A. Teixeira, S. Stevan Jr, T. Silveira; R. Nogueira; G. M. Tosi Beleffi, D. Forin, F. Curti "Optical gain characteristics of Rayleigh backscattered lasing in several fibre types", 10th European Conference on Networks and Optical Communications, 2005.
- 6 S. Stevan Jr, G. T. Beleffi, P. Andre, R. Nogueira, A. Teixeira, A. Pohl, "Spontaneous Rayleigh backscattering Raman lasing with fiber Bragg grating," Lasers and Electro-Optics, 2007 and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE-IQEC 2007, 1 (2007).
- 7 A. A. Fotiadi, R. V. Kiyani, "Cooperative stimulated Brillouin and Rayleigh backscattering process in optical fiber", Optics Letters 23, 1805 (1998).
- 8 M. Mehendale, A. Kobaykov, M. Vasilyev, S. Tsuda, A. F. Evans, "Effect of Raman amplifica-

tion on stimulated Brillouin scattering in dispersion compensating fibres", Electronics Letters 38, 268 (2002).

- 9 T. Okuno, M. Nishimura, "Effects of stimulated Raman amplification in optical fibre on stimulated Brillouin scattering threshold power", Electronics Letters 38, 14 (2002).
- 10 A. A. Fotiadi, G. Ravet, P. Mégret, M. Blondel, "Multi-cascaded SBS in an optical fiber supported by Rayleigh backscattering," Proc. SPIE 5480, 71 (2003).
- 11 S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper, D. V. Churkin, S. I. Kablukov, J. D. Ania-Castanon, V. Karalekas, E. V. Podivilov, "Random distributed feedback fibre laser", Nature Photonics 4, 231 (2010).
- 12 B. Min, P. Kim, N. Park, "Flat amplitude equal spacing 798-channel Rayleigh-assisted Brillouin in/Raman multiwavelength comb generation in dispersion compensating fiber", IEEE Photonics Technology Letters 13, 1352 (2001).
- 13 O. Frazão, C. Correia, J. M. Baptista, J. L. Santos, "Raman fibre Bragg grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering in strain-temperature measurement", Measurement Science and Technology 20, 45203 (2009).
- 14 Andrei A. Fotiadi, "An incoherent fibre laser", Nature Photonics 4, 204 (2010).
- 15 A. M. R. Pinto, O. Frazão, J. L. Santos, M. Lopez-Amo, "Multiwavelength fiber laser based on a photonic crystal fiber loop mirror with cooperative Rayleigh scattering", Applied Physics B: Lasers and Optics 99, 391 (2010).
- 16 H. F. Martins, M. B. Marques, O. Frazão, "Temperature-insensitive strain sensor based on four-wave mixing using Raman fiber Bragg grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering", Applied Physics B: Lasers and Optics (submetido para publicação, 2011).
- 16 J. M. Baptista, C. Correia, M. B. Marques, O. Frazão, "A Raman laser intensity sensor induced by the cooperative Rayleigh scattering in a ring configuration", Lasers Physics (aceite para publicação, 2011).



**Orlando Frazão** é licenciado em Engenharia Física pela Universidade de Aveiro e doutorado em Física pela Universidade do Porto. Actualmente é Investigador Sénior no INESC Porto. Os principais interesses de investigação são sensores e lasers em fibra óptica. Tem mais de 250 artigos publicados em revistas internacionais e conferência internacionais.



**Manuel Joaquim B. Marques** é licenciado em Física pela Universidade do Porto e doutorado em Física pela mesma universidade. Actualmente é Professor Auxiliar no Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Investigador Sénior no INESC Porto. Os principais interesses de investigação são a óptica não-linear, lasers e sensores em fibra óptica.

# Laser sintonizável de fibra óptica em anel

Paulo Antunes, Paulo André

Instituto de Telecomunicações e Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

pandre@av.it.pt

## Resumo

Neste trabalho, reporta-se a implementação de um laser de fibra óptica em anel com fibra dopada com iões de érbio ( $\text{Er}^{3+}$ ) que se caracteriza pelo uso de uma rede de Bragg no interior da cavidade óptica. A rede de Bragg permite a sintonia do comprimento de onda reflectido, possibilitando assim a selecção do comprimento de onda de emissão do laser. Obteve-se uma eficiência de bombeamento de 3,55 % e uma separação entre modos longitudinais de 3,40 MHz.

## Introdução

O primeiro laser de fibra óptica foi desenvolvido no início da década de 1960 [1,2] e, desde então, assistiu-se a um enorme esforço de investigação nesta área, devido às enormes potencialidades deste dispositivo. Foram desenvolvidas configurações específicas de vários tipos de laser até aos dias de hoje, sendo que o primeiro laser de fibra óptica em anel fechado, referenciado na literatura, foi desenvolvido por Sasamori et al. [3] em 1997 e utiliza um amplificador óptico de fibra dopada com érbio e quatro redes de Bragg de alta reflectividade em série, permitindo assim um espectro de emissão multi-comprimento de onda formado por quatro picos, relativos ao comprimento de onda de reflexão de cada rede de Bragg.

Algumas das aplicações dos lasers de fibra óptica são em comunicações ópticas, medicina, processamento de materiais, armazenamento de dados, espectroscopia, sensores ópticos e metrologia óptica [4]. O confinamento óptico providenciado pela fibra óptica torna os lasers de fibra extremamente eficientes. Estes lasers apresentam como principal desvantagem a existência de uma cavidade óptica com uma dimensão elevada, o que resulta

numa dificuldade acrescida para estabilizar a temperatura e, conseqüentemente, uma elevada instabilidade espectral da emissão. No entanto, as vantagens associadas, em particular a facilidade de implementação, tornam esta opção relevante para determinadas soluções.

Têm sido demonstrados lasers de fibra óptica com comprimentos de onda de emissão compreendidos entre 400 e 3000 nm. Entre os lasers de fibra mais utilizados e eficientes encontram-se aqueles baseados em fibras de sílica dopada com iões de terra raras tais como  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$  e  $\text{Tm}^{3+}$ . Estes sistemas têm a vantagem de possuírem bandas de absorção compatíveis com as regiões espectrais de emissão dos díodos laser semicondutores usualmente utilizados como fontes de bombeio. Estes sistemas apresentam ainda uma elevada eficiência quântica, dependendo do ião utilizado, podendo chegar a 0,95 [5].

O princípio de funcionamento de um laser implica a existência de um meio activo onde ocorre a emissão espontânea de radiação. O efeito de *lasing* requer um elevado confinamento óptico, permitindo a emissão estimulada na presença de inversão de população. A cavidade óptica é, também, responsável pela selectividade espectral do sistema. A principal ênfase no desenvolvimento de lasers tem sido dada a sistemas construídos em cavidades ressonantes de Fabry-Perot [6].

O esquema básico de um laser de fibra óptica consiste num meio activo terminado com dois reflectores, sendo que um funciona como acoplador/reflector, permitindo a saída do sinal óptico para o exterior. Usualmente, recorre-se a espelhos dieléctricos depositados directamente nas extremidades polidas da fibra óptica ou espelhos tradicionais usando óptica tradicional de espaço livre para acoplar o sinal no interior da fibra óptica. Um exemplo deste tipo de configuração é mostrado na Figura 1. É de referir que este tipo de configuração, pela sua complexidade, pode não ser a mais adequada para a sua produção e utilização larga escala.

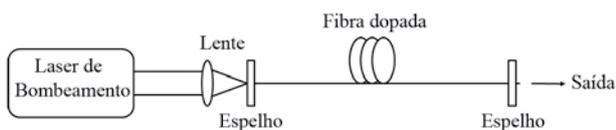


Fig. 1 - Esquema de um laser de fibra baseado numa cavidade ressonante de Fabry-Perot.

Em alternativa, pode formar-se uma cavidade de Fabry-Pérot com recurso a redes de Bragg gravadas na fibra óptica<sup>1</sup>, sendo a rede de entrada desenhada para reflectir o sinal de emissão do laser e transmitir o sinal de bombeamento. Um benefício particular desta configuração é que as FBG podem ser inscritas directamente na fibra, reduzindo as perdas de acoplamento [4]. Um esquema típico para o laser de fibra óptica que utiliza redes de Bragg é apresentado na Figura 2.

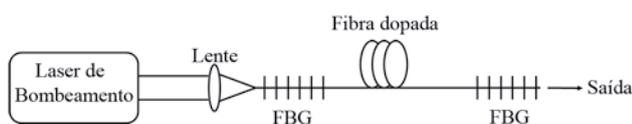


Fig. 2 - Esquema de um laser de fibra baseado em redes de Bragg.

Uma outra aproximação para a implementação da cavidade ressonante consiste em usar anéis fechados de fibra dopada, providenciando, assim, a realimentação óptica necessária [5]. Geralmente, o comprimento da fibra óptica dopada é otimizado para maximizar a absorção do sinal de bombeamento e maximizar a relação entre o ganho e absorção para o comprimento de onda da emissão.

Em comunicações ópticas o laser é fundamental, e foi precisamente nesta área que em Portugal foram utilizados os primeiros laser de fibra óptica desenvolvidos em anel, reportando-se ao ano de 2003. Terroso *et al.* [7] utiliza esta configuração de laser e o processo não linear de mistura de quatro ondas<sup>2</sup> como forma de conversão de comprimento de onda, com possível aplicação em sistemas multiplexados no comprimento de onda. Por sua vez, Melo *et al.* [8] desenvolve um laser em fibra óptica em anel fechado, a operar na banda L, utilizando fibra óptica dopada com érbio, com sintonização possível através do encurvamento controlado de uma fibra monomodo com *taper*. Este encurvamento introduz perdas na cavidade ressonante que são maiores para comprimentos de onda superiores. Deste modo, foi possível desenvolver um laser com sintonia entre 1587 e 1606 nm, com pouca variação na sua potência de saída ao longo deste intervalo. Também este laser tem aplicações possíveis em comunicações ópticas, nomeadamente em sistemas multiplexados no comprimento de onda.

Um dos tipos de lasers de fibra mais estudados é o laser de fibra óptica dopada com iões de Er<sup>3+</sup> pelo seu potencial uso como fonte emissora para sistemas de comunicações ópticas a operar na terceira janela de telecomunicações. Uma das desvantagens dos lasers baseados em anéis fechados

com fibra dopada com Er<sup>3+</sup> é o elevado número de modos longitudinais, devido ao comprimento da cavidade óptica [6]. Várias tentativas foram realizadas para suprimir os modos longitudinais [10] ou implementar lasers de fibra dopada com Er<sup>3+</sup> com um único modo longitudinal [11].

Neste trabalho, é apresentada a implementação e caracterização de um laser de fibra baseado numa fibra dopada de Er<sup>3+</sup> em anel fechado. Na implementação desta solução foi utilizado um amplificador de fibra óptica dopada com érbio<sup>3</sup>. Este tipo de amplificador é bastante comum nos sistemas de comunicações ópticas, devido à grande largura espectral de ganho (dezenas de nanómetros), o que permite a sua inclusão em sistemas multicompimento de onda - WDM<sup>4</sup> [10]. A inclusão de um elemento óptico selectivo na cavidade óptica, neste caso uma FBG, permite uma selecção adequada do comprimento de onda de emissão.

### Implementação experimental

O esquema do laser baseado numa fibra dopada com Er<sup>3+</sup> em anel fechado implementado está ilustrado na Figura 3. O anel fechado é constituído por um troço de fibra óptica dopada com Er<sup>3+</sup>, um acoplador para a injeção do sinal de bombeamento no anel, um isolador óptico e um filtro óptico, cuja função é a remoção do sinal de bombeamento e do ruído de emissão espontânea gerado<sup>5</sup>. O laser díodo de bombeamento emite num comprimento de onda de 980 nm. Todos estes elementos incorporam um amplificador de fibra óptica dopada com Er<sup>3+</sup> (Fiberamp-BT1300 da Photonetics). O anel é fechado através de uma FBG com um comprimento de 3 mm, uma largura espectral a meia altura de 0,08 nm e uma rejeição aos modos adjacentes de 25 dB. Como a FBG funciona em modo de reflexão, esta é interligada com a cavidade óptica, através de um circulador óptico. Finalmente, é ainda utilizado um acoplador óptico que permite retirar 20 % do sinal óptico e que funciona como saída do laser.

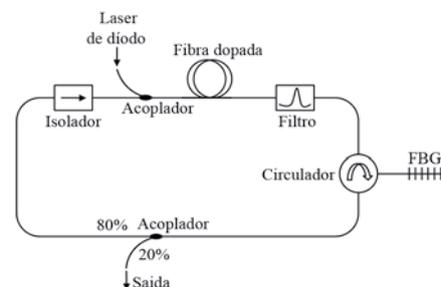


Fig. 3 - Esquema do laser de fibra óptica implementado.

### Resultados

Para caracterizar a resposta em contínuo do laser de fibra óptica implementado foi medida a potência óptica de saída em função da potência óptica do sinal de bombeamento (Figura 4). A medição

<sup>1</sup> Fibre Bragg grating, FBG

<sup>2</sup> Four wave mixing, FWM

<sup>3</sup> Erbium-doped fiber amplifier, EDFA

da potência de emissão foi realizada utilizando um analisador de espectros óptico (modelo MS9601A da Anritsu).

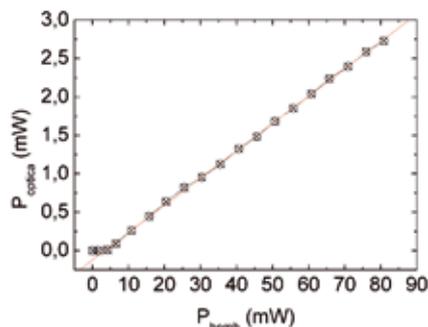


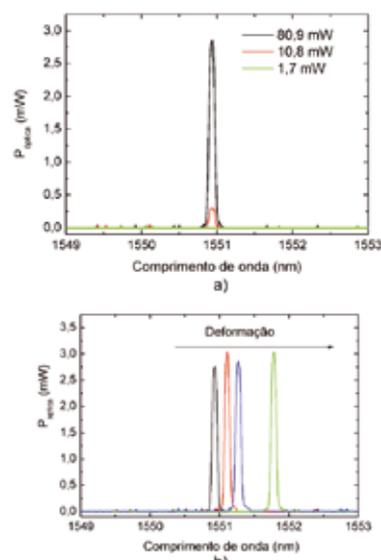
Fig. 4 - Potência óptica de saída do laser de fibra em função da potência óptica do sinal de bombeamento. Os pontos representam os dados experimentais e a linha o melhor ajuste linear ( $r > 0,99$ )."

Para um baixo valor de potência óptica de bombeamento, a emissão espontânea domina. A partir de um determinado valor da potência de bombeamento ocorre a inversão de população, começando a dominar a emissão estimulada, e observa-se o aumento linear da potência de emissão do laser de fibra. A região de variação linear da potência óptica de saída em função da potência óptica de bombeamento para valores superiores à potência de limiar, ilustrada na Figura 4, permite calcular a eficiência de bombeamento do laser, obtendo-se um valor de  $3,55 \pm 0,02\%$ . A potência de limiar do sinal de bombeamento para o início da emissão estimulada é de 14,08 mW.

Na Figura 5.a mostra-se o espectro de emissão do laser de fibra para diversos valores da potência de bombeamento. Este espectro corresponde à emissão quando a FBG não está sujeita a uma deformação mecânica. São apresentados os espectros correspondentes a três gamas da potência de bombeamento: para um valor abaixo da potência de limiar para a emissão estimulada, para um valor próximo dessa potência, e para um valor superior.

A aplicação de uma deformação mecânica na FBG irá resultar na alteração das suas características espectrais e, conseqüentemente, tal repercute-se no espectro de emissão do laser de fibra. A sintonia pode ser realizada colocando a rede de Bragg sobre um módulo piezoelétrico que induz uma deformação mecânica. Dadas as características das redes de Bragg, é ainda possível fazer a sintonia por processos térmicos, colocando-a sobre um módulo termoelétrico. No entanto, este último processo de sintonia apresenta a desvantagem de ser consideravelmente mais lento do que o processo mecânico. Na Figura 5.b ilustra-se a variação do espectro de emissão com o aumento da deformação mecânica aplicada à FBG.

Fig. 5 - Espectro de emissão do laser: (a) para diversos valores de bombeamento; (b) para com uma potência óptica de bombeamento de 80,85 mW, e para diversos valores de deformação mecânica aplicada na FBG. A largura espectral está limitada pela resolução do analisador de espectros ópticos utilizado na caracterização (0,1 nm).



Considerando que a sensibilidade da FBG com a deformação é, tipicamente, de  $1,2 \text{ pm} \cdot \mu\text{e}^{-1}$  e que a deformação limite que se pode aplicar a uma fibra é de aproximadamente 3 %, é possível sintonizar a FBG numa faixa espectral de 36 nm, o que corresponde à largura da janela espectral de emissão da fibra dopada com érbio.

Foi utilizado um fotodetector com uma largura de banda de 20 GHz (HP 11982A) interligado a um analisador de espectros eléctrico (HP 8593E) para caracterizar a frequência dos modos longitudinais do laser. Pelo facto de a cavidade deste tipo de lasers ser de elevadas dimensões, vai existir um elevado número de modos longitudinais, resultando num laser multimodal. A separação entre modos longitudinais, medida em unidades de frequência, é dada por  $\Delta f = c/nL$ , onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $n$  representa o índice de refração da fibra ( $\sim 1,45$ ) e  $L$  é o comprimento da cavidade.

Foi adquirido o espectro eléctrico do sinal de saída do laser para uma potência de bombeamento de 80,85 mW (Figura 6). Nesta caracterização, foi utilizada uma resolução de 100 kHz e um tempo de aquisição de 10 s.

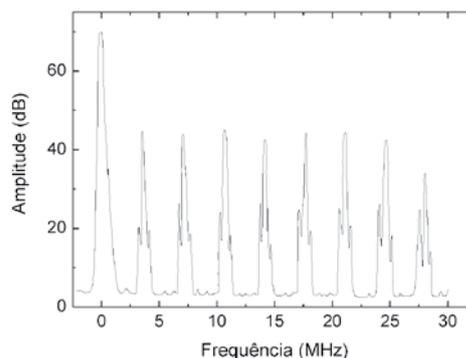


Fig. 6 - Espectro eléctrico do sinal emitido pelo laser de fibra.

A separação entre modos longitudinais é de 3,40 MHz, o que corresponde a um comprimento da cavidade óptica (dado pela equação acima) de 57,2 m. Este comprimento da cavidade corresponde ao comprimento da fibra dopada com  $\text{Er}^{+3}$  e das fibras utilizadas na interligação dos vários elementos ópticos ilustrados na Figura 3.

O facto deste tipo de laser ser usualmente multimodal implica algumas limitações em determinadas aplicações. No

<sup>4</sup> Wavelength division multiplexing, WD

<sup>5</sup> Amplified spontaneous emission, ASE

entanto, é possível impor o funcionamento monomodal em laser de fibras, tal como demonstrado anteriormente [9].

## Conclusões

Neste trabalho, apresentamos a implementação e caracterização de um laser de fibra sintonizável em anel fechado. A sintonia é implementada através de uma rede de Bragg gravada numa fibra óptica.

- 1 E. Snitzer, "Proposed fiber cavities for optical masers", *J. Appl. Phys.* 32, 36-39 (1961).
- 2 C. J. Koester e E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", *Appl. Opt.* 3, 1182-1186 (1964).
- 3 H. Sasamori, K. Ishiki, H. Watanabe, e K. Kasahara, "Multi-wavelength erbium-doped fiber ring light source with fiber grating filter", *Optical Amplifiers and Their Applications (OAA)*, Victoria, B. C., Canada, 21 de Julho (1997).
- 4 Michel J. F. Digonnet, "Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers", Second Edition, Marcel Dekker Inc, New York (2001).
- 5 F. J. Duarte, "Tunable laser applications", Second Edition, CRC Press, New York (2009).
- 6 P.S. André, R. Nogueira, A. Teixeira, M.J.N. Lima, J.F. da Rocha, e J.L. Pinto, "Multi wavelength rational harmonic mode locked source for polarization division multiplexing based on a reflective semiconductor optical amplifier and Bragg grating written in a high birefringent fiber", *Laser Physics Letters* 1, 613-616 (2004).
- 7 I. Terroso, J.P. Carvalho, O. Frazão, M.B. Marques, e H.M. Salgado, "All-fibre wavelength conversion based on four-wave mixing in a ring erbium-doped fibre laser", *Applied Physics B: Lasers and Optics* 77, 133-137 (2003).
- 8 M. Melo, O. Frazão, A.L.J. Teixeira, L.A. Gomes, J.R. Ferreira da Rocha, e H.M. Salgado, "Tunable L-band erbium-doped fibre ring laser by means of induced cavity loss using a fibre taper", *Applied Physics B: Lasers and Optics* 77, 139-142 (2003).
- 9 Junqiang Sun, Xiuhua Yuan, Xinliang Zhang, e Dexiu Huang, "Single-longitudinal-mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry-Perot filters and variable saturable absorbers", *Optics Communications* 267(1), 177-181 (2006).
- 10 M. T. M. R. Giraldi, M. J. Pontes, M. J. D. Santos, I. Abe, e H. J. Kalinowski, "Characterization of the Optical and Electrical Spectra of a Fiber Ring Laser", *International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC'99*, Rio de Janeiro, Brasil, 9-12 de Agosto (1999).
- 11 Farah Diana Binti Mahad e Abu Sahmah Bin Mohd Supa'at, "EDFA Gain Optimization for WDM System", *Elektrika* 11(1), 34-37 (2009).

A eficiência de bombeio é de 3,55 % e a separação entre modos longitudinais é de 3,40 MHz.

Apesar das desvantagens associadas a este tipo de configuração, nomeadamente, a sensibilidade à temperatura e a emissão multimodal, a facilidade de implementação torna este tipo de laser relevante para determinadas aplicações específicas, como, por exemplo, na interrogação de sensores ópticos.



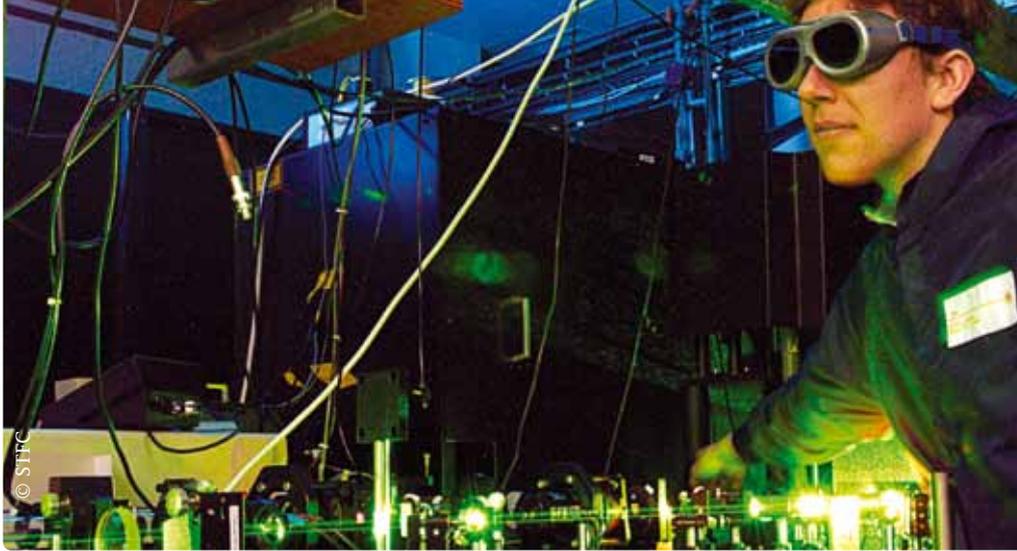
### Paulo Fernando da Costa Antunes

nasceu em Mealhada, Portugal, em Maio de 1977. Recebeu a Licenciatura em Engenharia Física e o Mestrado em Física Aplicada da Universidade de Aveiro, em 2005 e 2007, respectivamente. Actualmente trabalha para o grau de Doutoramento em Física no Departamento de Física da Universidade de Aveiro e no Instituto de Telecomunicações, Aveiro. De 2005 a 2006, foi investigador no Instituto de Telecomunicações, Aveiro, no estudo e simulação de fontes e detectores de fóton único. Os seus interesses de pesquisa incluem o estudo e simulação de redes de Bragg, sensores de fibra óptica para medições estáticas e dinâmicas e comunicações ópticas.



### Paulo Sérgio de Brito André

nasceu em Luanda, Angola, em Abril de 1971. Recebeu a Licenciatura em Engenharia Física e o Doutoramento em Física pela Universidade de Aveiro, respectivamente em 1996 e 2002. Neste ano ingressou no Instituto de Telecomunicações, Aveiro, como Investigador Auxiliar. Actualmente, é também Professor Auxiliar convidado na Universidade de Aveiro, leccionando disciplinas nas áreas de optoelectrónica, óptica quântica e tecnologias quânticas. Os seus interesses de investigação incluem o estudo e simulação de componentes optoelectrónicos, redes de Bragg em fibra óptica, óptica integrada, monitoramento de desempenho transparente, amplificação Raman, sistemas de comunicações ópticas multi-comprimento de onda e redes ópticas passivas. Paulo André é membro da Optical Society of America (OSA), da Sociedade Portuguesa de Física (SPF), Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM) e do Instituto de Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos (IEEE).



# LASERLAB Europe

## o laser sem fronteiras

Gonçalo Figueira

GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear - Laboratório Associado, Instituto Superior Técnico,  
Av. Rovisco Pais 1049-001, Lisboa  
(National Contact Point do Programa LASERLAB Europe)

goncalo.figueira@ist.utl.pt

**Cinquenta anos após a sua invenção, os lasers ganharam um papel indispensável como ferramenta de investigação, quer fundamental, quer aplicada. Na física, na química, na biologia, na medicina, nos materiais, e em muitas outras áreas, são cada vez mais as aplicações para as quais os lasers são utilizados.**

Esta evolução, conjugada com a grande variedade de tipos de lasers, e a sua vasta disponibilidade comercial, fazem com que cada vez mais grupos de investigação disponham de equipamentos próprios para levar a cabo os seus programas científicos.

No entanto, é natural que nem *todos* os laboratórios possam ter todos os tipos de laser que seriam úteis para desenvolver ainda mais as suas actividades. Em particular, quando se trata de lasers avançados, disponibilizando parâmetros de estado-da-arte – energia, potência, duração, gama de comprimentos de onda, etc – apenas um número muito restrito de laboratórios especializados tem capacidade para desenvolver sistemas verdadeiramente únicos, dado que estes implicam infra-estruturas complexas e dispendiosas. Na Europa, que lidera a investigação nesta área, existe um conjunto de laboratórios equipados com lasers de características ímpares a nível

mundial, graças aos quais tem sido possível atingir resultados científicos de grande impacto.

Não seria interessante poder ir passar um par de semanas a um destes sítios e realizar uma experiência? Se acha que é uma ideia completamente fora do seu alcance, continue a ler.

### LASERLAB-Europe – a rede europeia de laboratórios laser

O programa LASERLAB-Europe (LLE) [1] é um consórcio europeu que reúne as principais instituições de investigação em lasers da Europa. O programa, originalmente lançado em 2003, está agora na sua segunda edição, desde Março de 2009, e tem uma duração de três anos, sendo financiado pelo 7º Programa Quadro.

As actividades a desenvolver no âmbito deste programa têm três aspectos principais (ver caixa): o acesso transnacional, as actividades de investigação em conjunto, e a criação de redes de investigação. Um dos princípios que presidiu à fundação do programa LLE foi o de permitir à vasta comunidade de cientistas europeus a trabalhar com lasers o acesso às principais instituições de investigação europeias, e coordenar as actividades de investigação avançada associadas.

Portugal é um dos participantes no LLE, sendo representado pelo Instituto Superior Técnico (IST), de Lisboa. A unidade responsável pelas actividades é o Instituto de Plasmas e

Fusão Nuclear (IPFN), Laboratório Associado especializado nas áreas de fusão nuclear, plasmas e lasers intensos. As actividades dos cientistas do IPFN passarão pela participação em programas conjuntos de investigação aplicada, e na criação e fortalecimento de comunidades nacionais de investigadores. Parte do trabalho a desenvolver terá lugar no Laboratório de Lasers Intensos, infra-estrutura operada pelo IPFN que possui o laser mais potente do país, dedicado ao estudo da interacção entre impulsos laser e plasmas.

## LASERLAB-Europe em dados

**Datas:** a actual edição do programa LLE decorre de Março de 2009 a Março de 2012, no âmbito do 7º Programa Quadro da União Europeia. Está em preparação a próxima edição, que será a terceira, a partir dessa data.

**Participantes:** o consórcio envolve um total de 26 unidades de investigação dos seguintes membros: Alemanha, Eslováquia, Espanha, França, Grécia, Holanda, Itália, Hungria, Letónia, Lituânia, Polónia, Portugal, Reino Unido, Rep. Checa, Roménia e Suécia.

**Objectivos:** no âmbito do programa LLE desenvolvem-se as seguintes actividades:

- Acesso transnacional – permite que investigadores e equipas de investigação oriundas de países membros do consórcio acedam a laboratórios de outros países membros, sem custos. Qualquer investigador de um país participante pode concorrer.

- Actividades conjuntas de investigação (Joint Research Activities, JRA) – projectos específicos envolvendo membros do programa LLE, que visam a colaboração científica e troca de conhecimentos em temas de vanguarda. Existem cinco JRA's nesta edição: fontes laser de attosegundo, lasers de alta potência e alta taxa de repetição, aceleração a plasma, lasers para aplicações biomédicas, e fontes de raios-x a laser.

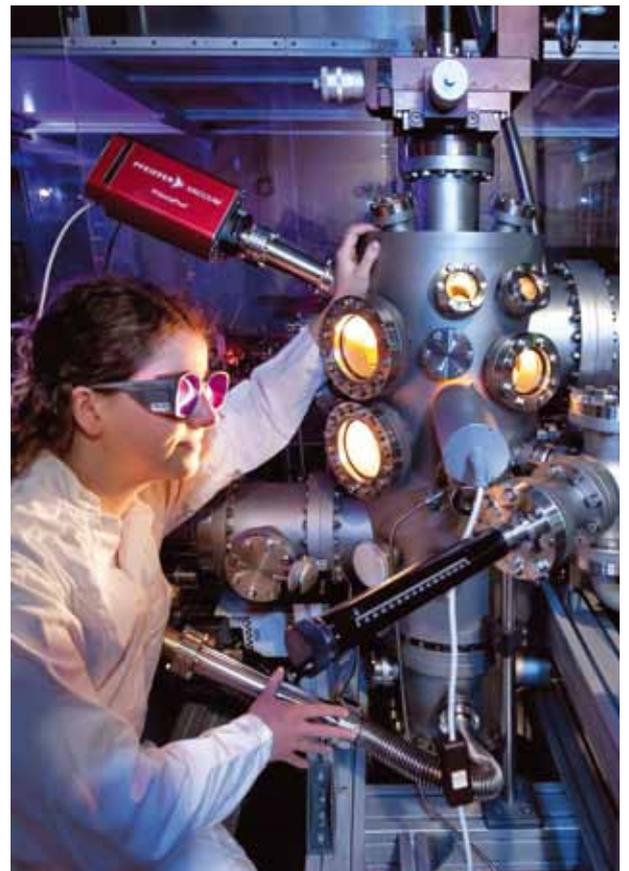
- Criação de redes de investigação (*Networking*): envolve um grande número de actividades colaborativas com vista à criação de uma rede de cooperação efectiva entre instituições, à formação de investigadores, e à consolidação da liderança europeia em investigação nesta área.

## O que é o programa de acesso?

Um dos objectivos primordiais do LLE é providenciar acesso, a qualquer cientista europeu, às infra-estruturas laser das unidades participantes que têm a categoria de “fornecedor de acesso”. O principal critério para estar nesta categoria é, precisamente, possuir sistemas laser únicos, e ter capacidade para receber cientistas de fora, garantindo a realização de experiências com sucesso.

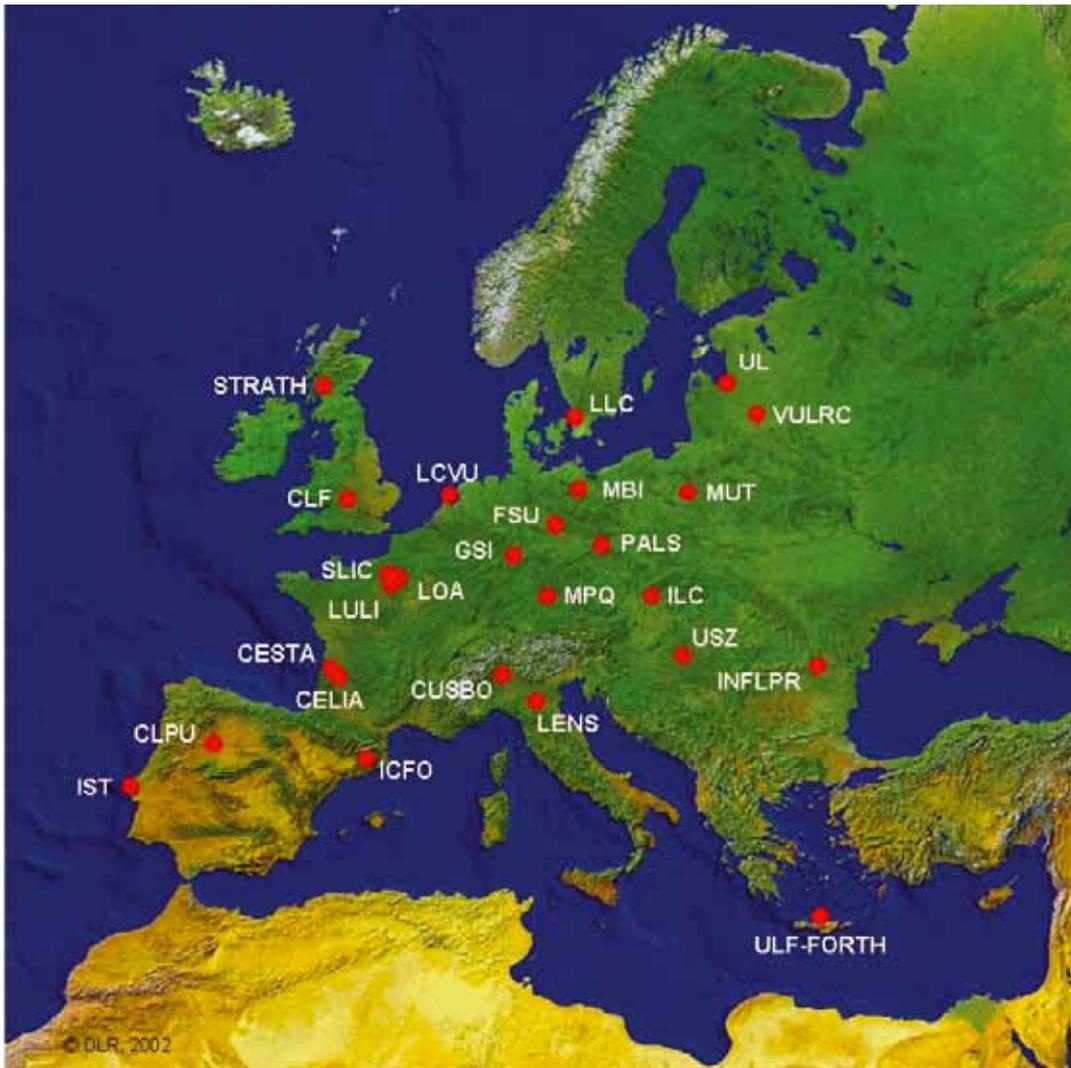
Um total de 20 laboratórios de 11 países europeus é for-

necedor de acesso, disponibilizando lasers com as mais variadas características, que permitem a realização de experiências num grande número de tópicos: física atómica e molecular, biofotónica e física médica, lasers ultra-intensos, fusão inercial, micro e nano-processamento de materiais, geração de harmónicas, espectroscopia, fontes e lasers de raios-x, dinâmica ultra-rápida de átomos e moléculas, entre outros. Entre os laboratórios incluem-se alguns equipamentos com parâmetros excepcionais, como o lasers de petawatt Vulcan e Astra-Gemini, ambos na Central Laser Facility do laboratório Rutherford Appleton (Reino Unido), ou os lasers para espectroscopia e metrologia de attosegundo e femtosegundo do Instituto Max Planck em Garching (Alemanha). Em Portugal, o Laboratório Laser do Departamento de Química da Universidade de Coimbra (instituição associada ao programa), é também um dos fornecedores, disponibilizando a sua vasta gama de lasers para aplicações em química. No total, o conjunto de laboratórios de acesso abrange uma vasta gama de capacidades complementares e específicas, disponibilizando 1100 dias por ano para investigadores externos.



## Como participar?

O acesso é oferecido gratuitamente aos investigadores que submetam propostas para experiências que sejam avaliadas positivamente, sendo os custos suportados pela instituição que os recebe, através do programa LLE. O processo de avaliação e se-



Instituições participantes no programa LASERLAB-Europe

lecção de propostas é totalmente conduzido por via electrónica, e decorre da seguinte forma [2]:

- A equipa de investigação candidata a acesso prepara uma proposta e submete através do website do LASERLAB. Algumas *calls* estão abertas em permanência, enquanto que para alguns laboratórios existem *calls* específicas, durante as quais a propostas devem ser submetidas para um determinado período.

- O laboratório escolhido efectua uma análise preliminar de viabilidade técnica da proposta, e de que a constituição da equipa se enquadra nas regras europeias de acesso transnacional. Após esta análise, a proposta é submetida ao Painel de Selecção de Utilizadores (*Users Selection Panel*, USP) do LLE.

- O USP envia a proposta para apreciação por uma comissão externa e independente de avaliadores (*referees*). Estes classificam o projecto de acordo com o mérito científico do mesmo e da equipa de investigação proponente, comunicando o resultado ao USP.

- Havendo necessidade, o USP fará uma decisão final, tendo em conta a relevância do projecto para a comunidade de investigação, e dando prioridade a utilizadores que não tenham utilizado anteriormente o mesmo laboratório, e que teriam maior dificuldade para o fazer por outros meios.

O programa de acesso tem dado origem a um grande número de resultados e publicações de muito alto nível (*Nature*, *Nature Physics*, *Physical Review Letters*), e é uma das iniciativas com mais sucesso no âmbito do LLE.

Ainda com dúvidas? O LLE tem um Comité de Representantes de Utilizadores (*User Representatives Committee*) [3], composto por utilizadores

experientes e que servem de mediadores entre potenciais novos utilizadores e o consórcio, aconselhando e recebendo feedback de ambas as partes. O Comité também organiza regularmente reuniões de utilizadores, abertas a toda a comunidade, e “escolas de formação” práticas (*training schools*) para fornecer experiência aos futuros utilizadores. A nível nacional, o IPFN/IST é o ponto de contacto nacional para o programa LLE, e o autor está disponível para prestar todo o apoio necessário aos interessados em associarem-se a esta comunidade.

Assim, votos de boas experiências!

### Para mais informações:

1. <http://www.laserlab-europe.eu>
2. <http://www.laserlab-europe.eu/transnational-access/how-to-apply-for-access>
3. <http://www.laserlab-europe.eu/transnational-access/user-representatives>
4. <http://ipfn.ist.utl.pt>

# Os 50 anos do laser em Portugal

M. Ribau Teixeira<sup>1</sup>, G. Figueira<sup>2</sup>, J. Mendanha Dias<sup>2</sup>, D. Liang<sup>3</sup>, A. Pereira Leite<sup>4</sup>, H. Crespo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

<sup>2</sup>Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico

<sup>3</sup>Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

<sup>4</sup>Faculdade de Ciência, Universidade do Porto

**Publicamos nesta edição da Gazeta de Física a primeira parte de um artigo, coordenado por M. Ribau Teixeira, onde se revêem os principais desenvolvimentos na história do laser em Portugal ao longo dos últimos 50 anos. A segunda parte do artigo será publicada na próxima edição.**

A comemoração dos 50 anos do laser, no ano de 2010, constitui uma oportunidade única para se poder efectuar uma retrospectiva de toda a actividade no domínio do desenvolvimento das tecnologias de Óptica e Lasers, durante este período, em Portugal. As aplicações do laser também poderiam igualmente fazer parte deste trabalho, mas isso tornar-se-ia incomportável para um artigo de revista, como é o caso da Gazeta de Física. Ao olharmos para trás, verificamos com satisfação que o caminho percorrido, embora por vezes com muitas dificuldades, valeu a pena ser trilhado, como é nosso desejo mostrar no trabalho que aqui se apresenta.

Na década de 60, a actividade dos lasers em Portugal foi praticamente inexistente, havendo notícias da aquisição, pelo Batalhão de Transmissões de Lisboa, de um laser de rubi, para utilização em comunicações ópticas, e da aquisição de um laser de He-Ne pelo Instituto Superior Técnico, para fins didácticos de demonstração em aulas de Física. Passemos então à apresentação das actividades de desenvolvimento das tecnologias de Óptica e Lasers por instituições que a elas se dedicaram, nos últimos 50 anos, em Portugal.

## **i) No Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial /Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI/LNETI)**

No início dos anos 70, no então Laboratório de Física e Engenharia Nucleares (LFEN), adquiriu-se um laser de He-Ne com a potência de 1 mW, utilizado para efectuar de-

monstrações experimentais em Cursos Técnicos de Óptica e Lasers. A partir de 1975, com o regresso a Portugal de um investigador doutorado, iniciou-se a actividade nas áreas da Óptica Aplicada e dos Lasers no LFEN. Adquiriu-se um laser de árgon com 18 W de potência, que funcionava em modo contínuo, sintonizável no verde, azul e violeta, com que se efectuaram estudos interferométricos em plasmas de arco eléctrico à pressão atmosférica. Estes foram iniciados nessa época por F. Carvalho Rodrigues que desenvolveu, no seu Grupo de Investigação, estudos de Óptica Aplicada, e realizou cursos de formação em Óptica. Em 1984, efectuou-se a redefinição dos objectivos do LFEN, passando a ser designado por Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI). No início de 1985 adquiriu-se um protótipo de um laser industrial de dióxido de carbono de fluxo axial rápido, com cerca de 400 W de potência. Com o estudo da tecnologia associada a este laser adquiriram-se os conhecimentos para se construir um novo laser de CO<sub>2</sub> com características idênticas, para se prestar assistência tecnológica a indústrias que usassem lasers com as mesmas características ou que usassem outros de tecnologias semelhantes. A aquisição destes conhecimentos tecnológicos iria permitir, no futuro, o desenvolvimento de um novo protótipo de lasers de CO<sub>2</sub> para dar resposta a necessidades já existentes e a outras que viessem a ser identificadas.

Foi construído um novo sistema de direccionamento e encaminhamento do feixe laser para o sistema adquirido e foram efectuadas algumas adaptações do mesmo sistema, para poderem ser realizados no LNETI estudos de aplicações do laser, nomeadamente no corte e gravação de materiais não metálicos. Nos primeiros dias de Dezembro de 1985, completando-se 25 anos sobre a invenção do laser, o LNETI, sob a responsabilidade de F. Carvalho Rodrigues, organizou as Jornadas LASER PORTUGAL “1960-1985, 25 anos depois”, no Centro UNESCO

do Porto. Este evento teve a participação dos Grupos de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers, de Engenharia do Departamento de Optoelectrónica e do Laboratório de Aplicações Aeroespaciais, LAER, do Instituto de Tecnologias da Informação, do LNETI. Foi preparada uma exposição com alguns lasers, incluindo um laser industrial de alta potência (400 W) [1], e outros com aplicação em diversas especialidades de Medicina. Com a colaboração de professores do Departamento de Física da Universidade do Porto, assim como de especialistas em lasers médicos, efectuaram-se também palestras sobre as actividades em curso nas instituições participantes, no domínio da Óptica, dos Lasers e aplicações, nomeadamente em holografia, na Medicina e no estudo e desenvolvimento de novos protótipos de lasers industriais. A Sociedade Portuguesa de Física, na sua revista, a Gazeta de Física, publicou, na separata do seu Vol. 9, um conjunto de 14 artigos sobre o tema "1960-1985, 25º Aniversário da Invenção do Laser" [2]. Ainda inserida nas comemorações dos 25 anos do laser, o LNETI organizou, na primeira quinzena de Dezembro de 1985, na Casa dos Bicos, em Lisboa, uma outra exposição de sistemas laser, muito visitada por profissionais e público. Nesta exposição foi apresentada uma maior variedade de lasers, alguns em funcionamento, juntamente com diversos equipamentos associados a estes lasers.

O desenvolvimento e a construção de lasers industriais, em Portugal, teve início em 1985, no LNETI, com a colaboração de J. Lemos Pinto, Professor do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. O protótipo do laser de dióxido de carbono, de baixa potência, em construção, era destinado a ser integrado num projecto de corte para a indústria têxtil. No final de 1985, a intensidade do feixe laser deste protótipo era ainda baixa, em virtude das dificuldades de alinhamento dos espelhos, que resultavam da pouca fiabilidade dos sistemas então usados para os posicionar e para lhes definir a orientação com a precisão adequada. Com melhoramentos tecnológicos introduzidos atingiu-se a potência óptica de 25 W. Este foi o primeiro protótipo de um laser de dióxido de carbono para fins industriais, desenvolvido em Portugal, pelo grupo dirigido por M. Ribau Teixeira. Após a construção deste protótipo laboratorial do laser de CO<sub>2</sub>, no LNETI, deu-se o primeiro passo para a criação de um protótipo industrial de características semelhantes, tendo em vista a criação de um produto comercializável. Foi após a aquisição desta tecnologia, durante a construção deste laser, que o LNETI iniciou um processo de transferência da mesma para a empresa portuguesa EFACEC, na qual Dietmar Appelt montou um laboratório onde se iria proceder ao desenvolvimento do protótipo industrial deste laser, com vista à sua produção e comercialização.

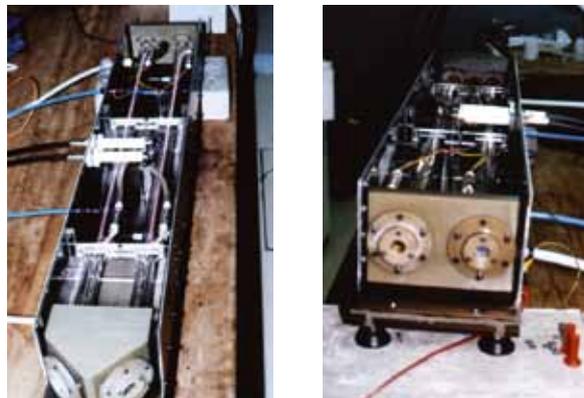


Fig. 1 - (a) Protótipo de um laser de CO<sub>2</sub> com cavidade de ressonância de dois tubos de descarga cor de rosa, acoplados por dois espelhos de cobre revestidos a ouro, montados no bloco metálico, a 90°. (parte inferior da fotografia). (b) Outra vista do protótipo, onde se vêem, no primeiro plano da fotografia, o espelho totalmente reflector, à esquerda, e o acoplador de saída, à direita.

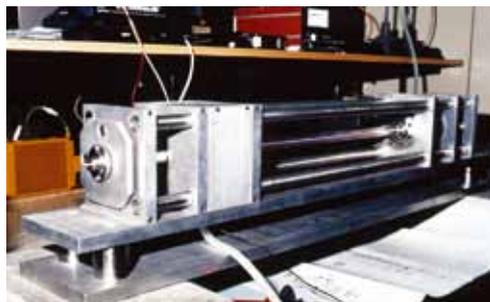


Fig. 2 - Protótipo de um laser de CO<sub>2</sub> com cavidade de ressonância simples. Os seus espelhos, totalmente reflector e acoplador de saída com o seu sistema de alinhamento micrométrico, estão montados respectivamente, no primeiro bloco metálico do lado esquerdo e no primeiro bloco metálico do lado direito da fotografia.

Outros protótipos de lasers industriais de CO<sub>2</sub> de baixa potência foram produzidos no INETI com estabilidades de feixe sucessivamente mais elevadas [3] e potências crescentes, tendo-se atingido o valor máximo de cerca de 50 W. Com base num destes protótipos laboratoriais do laser de CO<sub>2</sub> construiu-se um laser didáctico, [4] uma miniaturização de um dos modelos anteriormente referidos, que foi muito útil para os alunos da Licenciatura em Engenharia Física da Universidade Nova de Lisboa efectuarem o seu primeiro contacto com a tecnologia laser, nas aulas práticas de Optoelectrónica da responsabilidade de M. Ribau Teixeira. Também se usou este laser didáctico para as aulas práticas dos Cursos do Laser Médico, organizados pela Sociedade Portuguesa Interdisciplinar do Laser Médico (SPILM), durante os anos de 1999 a 2007.

Ainda no INETI, e relacionado com o projecto do corte de têxteis, foi projectada e construída, por Cassiano Pais, uma mesa de encaminhamento e transporte de um feixe laser para aplicações industriais que esteve exposta na Feira Internacional de Lisboa (FIL) e na EXPONOR, Matosinhos, em 1987. Foram construídos outros protótipos de lasers de CO<sub>2</sub> e de Nd:YAG, em projectos e estágios da Licenciatura em Engenharia Física da UNL, por cerca de uma dezena de alunos, orientados por M. Ribau Teixeira. Nestes projectos de construção de lasers de CO<sub>2</sub> ensaiaram-se diversos tipos de cavidades ópticas, nomeadamente a cavidade de um laser de cátodo oco, num estudo efectuado no âmbito de uma Tese de Licenciatura [5] de um aluno da Universidade Agostinho Neto, Angola. Outros tipos de cavidades ópticas foram estudados pelos alunos da UNL de modo a darem

maior estabilidade e proporcionarem um alinhamento mais fácil. Além das diferentes cavidades, também se ensaiaram novas opções tecnológicas para os sistemas de suporte e alinhamento dos espelhos da cavidade de ressonância. De entre estes vários protótipos de lasers, inseridos em Projecto e Estágio de fim de Licenciatura, citamos, a título de exemplo, o Projecto e Estágio de Licenciatura em Engenharia Física da UNL de um aluno que projectou e construiu um laser Nd:YAG [6] que se destinava a ser usado como instrumento didáctico em Cursos de Laser, a serem ministrados no ensino superior universitário, com vista a dotar os Engenheiros Físicos e Engenheiros Ópticos com os conhecimentos fundamentais sobre lasers de estado sólido, obtendo assim uma especialização nesta área tecnológica. Destinava-se também este projecto a dar formação em cursos profissionais, na área tecnológica dos lasers, com a qual se criariam competências técnicas nesta área, para se poder garantir o funcionamento eficaz de sistemas laser já existentes e também para assegurar o desempenho de funções, por técnicos competentes, em empresas produtoras de lasers e em empresas que os viessem a comercializar. Ainda como exemplo, podemos referir a construção de um protótipo de um laser de Nd:YAG de média potência.

No âmbito de uma tese de Doutoramento efectuada por M. Santos Silva, construiu-se ainda um protótipo de um sistema laser a ser utilizado na medida do paralelismo de fibras têxteis, tendo-se definido um índice que permitia avaliar a evolução do paralelismo das fibras, ao longo dos processamentos têxteis, usando a difracção de um laser colimado [7].

## ii) Instituto Superior Técnico (IST)

Na década de 70 foi adquirido um laser de hélio-neon, de poucos miliwatts, por Manuel Alves Marques, Professor do IST, utilizado em experiências de Óptica, no Laboratório de Física deste instituto.

Em 1992, foi criado o Grupo de Lasers e Plasmas (GoLP), linha de investigação do então Centro de Electrodinâmica, centro que englobou a área científica dos plasmas de baixa temperatura, criada na década de 70, e a área da óptica e dos lasers. A actividade nesta área teve início por esta altura, com trabalhos teóricos de óptica não linear, sob a orientação de J. Tito Mendonça. Com a colaboração de jovens licenciados, começou a trabalhar no sentido de, também em Portugal, se poderem desenvolver actividades experimentais na área da óptica não linear, e da física da interacção laser-plasma, tais como a aceleração de partículas a plasma e a aceleração de fotões.

Em 1994 foi desenvolvido um diagnóstico de difusão colectiva de luz laser com aplicação ao estudo de flutuações atmosféricas, por J. Mendanha Dias, usando um laser de dióxido de carbono, que deu origem a uma Tese de Mestrado [8]. Esta técnica destinava-se a ser usada como diagnóstico do plasma do tokamak do Centro de Fusão Nuclear.

Em meados dos anos 90 deu-se início a um projecto de desenvolvimento de um sistema *LIDAR (Light Detection And Ranging)* móvel, com J. António Rodrigues, efectuado sob contrato com a EDP, com o objectivo de monitorizar as plumas à saída das chaminés de uma central termo-eléctrica.

Construiu-se uma unidade de prospecção com um telescópio para fazer a projecção do feixe laser na atmosfera. Recolheram-se sinais de nuvens e, finalmente, como se tinha a ideia de montar um posto móvel, foi o equipamento instalado numa carrinha.

Desde o aparecimento do conceito de amplificação de impulsos ópticos com trinado (*chirped pulse amplification, CPA*) em 1986, e a consequente redução de escala e de custos para se poder atingir impulsos laser com potências da ordem do terawatt ( $10^{12}$  W), a possibilidade de, em Portugal, se iniciarem as actividades na área da interacção laser-plasma tornou-se mais viável. Este conceito de amplificação foi uma revolução nos lasers de alta potência, pois permitiu que deixasse de ser necessária a combinação de energias de quilojoule concentradas em impulsos de nanosegundos, para se produzirem lasers de terawatt. Assim, tanto a energia como a duração dos impulsos diminuíram três ordens de grandeza: a intensidade passou para a ordem dos joules e a duração do impulso para os picosegundos. Isto conduziu também a uma redução drástica nas dimensões destes lasers: da escala de um edifício à escala de uma sala. Foi possível, assim, construir um laser de terawatts que podia ser colocado em cima de uma mesa, chamado o T3 – *Table Top Terawatt*.

A ideia em que assenta este novo tipo de lasers, originada na Universidade de Rochester (EUA), é extremamente interessante. Um dos principais obstáculos à obtenção de impulsos laser de muito alta potência tem a ver com a capacidade desses impulsos para danificarem o próprio laser em que são criados: de facto, se a densidade de potência (ou seja, a energia por unidade de área e de tempo) no interior dos elementos ópticos que formam o laser for demasiado elevada, estes comportam-se como se fossem uma lente, focando o feixe laser. Ora isto aumenta ainda mais a densidade de potência, o que agrava o problema.

A abordagem usada até então consistia assim em aumentar o diâmetro dos feixes laser – e, portanto, de todos os espelhos, lentes, etc – resultando em sistemas ópticos com componentes de largas dezenas de centímetros de abertura. A técnica CPA passa este alargamento espacial para o domínio temporal: um impulso curto é alargado no tempo, depois amplificado e finalmente comprimido<sup>1</sup>. Um sistema laser T3 é assim composto por um oscilador que gera impulsos da ordem dos picosegundos, um expansor – dispositivo óptico que aumenta a duração dos impulsos de até três ordens de grandeza graças à introdução de dispersão linear (*chirp*) – um amplificador, e finalmente um compressor – que retira o *chirp* e, consequentemente, reduz a duração dos impulsos até ao nível inicial.

A grande vantagem deste tipo de lasers, integran-

<sup>1</sup> Ver por exemplo M. Fajardo e N. Lopes, “ELI – O deus da luz”, *Gazeta de Física* 31(4), 9 (2008).

do um sistema completo com diagnósticos e uma câmara de interacção, é que o seu custo era relativamente moderado, da ordem de poucas centenas de milhar de euros, tornando-os muito mais acessíveis a universidades de países pequenos. Era uma oportunidade para Portugal se lançar nesta área. Submeteu-se um projecto à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) em que o seu objectivo era a realização de estudos experimentais em aceleração de partículas a plasmas e aceleração de fotões, para os quais era indispensável um laser.

Dada a relativa novidade, à época, da tecnologia de *chirped pulse amplification*, não havia no país especialistas capazes de levar a cabo a construção deste tipo de sistema laser. Na Europa, esta técnica tinha sido recentemente implementada no sistema laser Vulcan no Rutherford Appleton Laboratory (RAL), em Inglaterra, pioneiro no desenvolvimento e construção de lasers de alta intensidade. A infra-estrutura de amplificação do laser Vulcan – desenhado para gerar energias de kJ em impulsos de ns – foi aproveitada para criar uma linha de terawatt, através de introdução de um oscilador de impulsos de picosegundo, sistema de expansão e compressão. Estabeleceu-se, então, um protocolo de transferência de tecnologia entre o RAL e o IST, através do qual o parceiro inglês forneceria o conhecimento e assistência técnica, e o laser seria construído nas suas instalações por um investigador português; após a sua construção, o laser viria para Portugal. Assim, o sistema laser foi construído entre 1994 e 1996, por Gonçalo Figueira, no âmbito da sua tese de doutoramento [9], tendo sido transportado para Portugal nos finais de 96.

O sistema proposto continha alguns conceitos inovadores, tais como a utilização de novos materiais, como o titânio-safira, para amplificação a 1053 nm. O sistema original era constituído por um oscilador de Nd:YLF (neodímio, fluoreto de lítio e ítrio) de 2,5 ps, um amplificador regenerativo baseado em titânio-safira – na altura um material recente e em grande disseminação em virtude da grande largura de banda de amplificação que permite – e outro de neodímio-vidro, bombeado a lâmpadas de flash. O oscilador de Nd:YLF era baseado numa técnica de bloqueamento de modos designada *additive pulse mode-locking*, que consiste numa cavidade principal acoplada através de um divisor de feixe a uma cavidade secundária, formada por uma fibra óptica. Os impulsos circulam em cada uma das cavidades e, quando se encontram no divisor, há uma interferência construtiva no meio e destrutiva nas extremidades. As cavidades têm que ter um comprimento idêntico, sendo interferometricamente ajustáveis. De modo a reduzir a duração dos impulsos abaixo do picosegundo, foi ainda instalado um sistema de alargamento espectral e compressão, usando uma fibra óptica e um par de redes de difracção. Contudo, em consequência da relativa instabilidade deste funcionamento, o oscilador veio a ser substituído em 2002

por um baseado em titânio-safira, capaz de gerar impulsos de 100 fs (Figura 3).

O amplificador regenerativo consiste num cristal de 20 mm de safira dopada com titânio, que é bombeado longitudinalmente por um laser de Nd:YAG em segunda harmónica (532 nm). Os impulsos vindos do oscilador e do expensor de redes de difracção são injectados a 10 Hz e mantidos dentro da cavidade regenerativa através de células de Pockels com tempos de reacção rápidos (~ns). Após cerca de cem passagens pela cavidade, os impulsos são ejectados com energias da ordem do milijoule.



Fig. 3 - Oscilador e amplificador regenerativo do sistema laser de terawatts do Laboratório de Lasers Intensos, IST.

O sistema actual conta com dois amplificadores de vidro (fosfato) dopado com neodímio, de origem comercial (Quantel). O primeiro amplifica os impulsos até ao nível do joule, enquanto o segundo é capaz de elevar a energia até aos 10 J. Após a compressão, com uma eficiência de 60%, a duração dos impulsos é reduzida até cerca de 300 fs, resultando numa potência de pico de 20 terawatts. Estes parâmetros fazem deste sistema o mais poderoso laser a operar em Portugal.

Este sistema permitiu a investigação e o desenvolvimento em tecnologias laser avançadas, desde o estudo de novos conceitos de amplificação paramétrica, ou a amplificação em materiais de estado sólido dopados com itérbio, até ao desenvolvimento de diagnósticos para caracterização da duração e fase de impulsos laser ultra-curtos.

Desde a sua instalação no Laboratório de Lasers Intensos do IST, este laser tem sido também intensivamente usado para investigação fundamental em diversas áreas, como a criação de canais em plasma para optimização de aceleração de partículas, e geração de harmónicos de ordem elevada. Na aceleração de partículas a plasma, os poderosos campos eléctricos criados podem acelerar os electrões de um plasma e a pressão produzida pelos impulsos desloca os electrões que se propagam, atingindo campos eléctricos de  $10^{14}$  V/cm. Com a passagem deste impulso, os electrões adquirem um movimento oscilatório, produzindo uma onda de plasma no rasto (*wake*) do campo eléctrico do impulso. Este esquema de aceleração dos electrões pelo rasto do campo eléctrico é a base do funcionamento dos aceleradores a plasma. Com estes gradientes electrostáticos tão grandes, também se podem acelerar fotões.

Para iniciar o estudo da aceleração de fótons em Portugal, foi efectuado, no Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA) em Paris, um Doutoramento por J. Mendanha Dias, onde se demonstrou experimentalmente, pela primeira vez, a possibilidade desse conceito [10], através do qual se pode mudar a frequência de um impulso laser.

Existia a ideia de implementar um acelerador a laser (*laser wake field accelerator*), fazendo um laser de alta potência atravessar um gás de argon, hélio ou hidrogénio, ou os seus plasmas. A pressão produzida pelos impulsos deste laser desloca os electrões à medida que eles se propagam. Com a passagem do impulso, os electrões são empurrados para trás, e adquirem um movimento oscilatório, produzindo uma grande onda no plasma, no rasto do impulso, podendo os campos associados a este rasto serem muito elevados. A onda de plasma acompanha, em fase, o impulso laser, tal como atrás de um barco se forma uma onda que o acompanha. Os electrões são atirados para fora e depois puxados por serem apanhados por esta onda, sendo acelerados como é um surfista numa onda do mar. Há um gradiente eléctrico a puxar os electrões e, portanto, eles podem ser continuamente acelerados.

A energia eléctrica que é transferida do impulso para as ondas do plasma pode ser absorvida por um segundo impulso colocado na fase correcta. Em vez de amplificar a energia do impulso, é a sua frequência a aumentar, isto é, a energia de cada fóton aumenta, mas não o seu número. Estabelecendo uma analogia com a aceleração de partículas, este processo é então conhecido por aceleração fotónica [10]. Para concluir, voltando atrás, no ano de 1993, no Centro de Electrodinâmica do Instituto Superior Técnico, Nuno Silvestre construiu um laser gasoso na configuração de excitação sem eléctrodos em contacto com o meio activo. Esta configuração é a mais adequada para lasers selados de  $\text{CO}_2$  de baixa potência. Como em todos os lasers de  $\text{CO}_2$ , o meio activo é uma mistura de dióxido de carbono, azoto e hélio, que foi excitada por uma descarga criada e mantida por uma onda de superfície. Os estudos experimentais efectuados no plasma criado por esta descarga utilizaram métodos de diagnóstico por espectroscopia óptica, por serem os mais limpos e não interferirem com a propagação da onda de superfície. Este trabalho deu origem a uma Tese de Mestrado [11].

### iii) Na Universidade Nova de Lisboa (UNL)

Na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), deu-se início ao ensino da Óptica no princípio dos anos 80, e a partir de 1985 começou a dar-se formação na área dos lasers, formação essa que fazia parte dos objectivos das disciplinas de Óptica Aplicada e Optoelectrónica da Licenciatura em Engenharia Física. Na Optoelectrónica (área dos lasers) aprendiam-se os conceitos básicos do funcionamento dos sistemas laser e os conhecimentos tecnológicos necessários para os pôr em funcionamento, tanto para lasers de gás como para lasers de estado sólido. A prática do funcionamento destes lasers foi transmitida através de sessões experimentais, que começavam por efectuar a montagem de um laser didáctico de  $\text{CO}_2$ , de fluxo axial lento, com os seus circuitos de alimentação de gás, de energia e de arrefecimento, e terminavam com as operações inerentes ao arranque da descarga e ao funcionamento do laser, como o alinhamento da cavidade de ressonância, e outras. Realizaram-se medições de alguns dos parâmetros característicos da descarga e da variação

da potência do feixe laser com a pressão do gás e a corrente eléctrica. Além deste, também um laser didáctico de Nd:YAG estava disponível e nele se realizavam medições dos parâmetros do feixe laser.

No ano de 1996, no Departamento de Física da Universidade Nova de Lisboa, Dawei Liang iniciou a montagem de um Laboratório de Desenvolvimento de Lasers, dedicado ao estudo e à optimização de lasers solares.

Desde o aparecimento do primeiro laser bombeado por energia solar que se desenvolveram espelhos parabólicos e heliostatos para se atingirem fluxos de energia solar no foco destes espelhos, suficientes para bombearem estes lasers de estado sólido. Com a utilização de concentradores parabólicos compostos bidimensionais (2D-CPC) e de cavidades de bombeamento secundárias 3D-CPC elevou-se o nível de potência do laser solar. A transformação directa da energia solar em luz laser, num laser de estado sólido, é mais eficiente do que em lasers de outras formas de energia, como a eléctrica, pois a conversão directa salta duas etapas, além de que o laser solar é muito mais simples e prático do que os lasers com outros sistemas de bombeamento, devido à eliminação completa de todos os equipamentos eléctricos. Sabe-se que todos os investigadores que trabalham nesta área, incluindo naturalmente os do Laboratório de Lasers Solares da Universidade Nova de Lisboa, estão muito motivados para construir um laser potente bombeado a energia solar, para a extracção do magnésio do óxido de magnésio. Grandes quantidades de calor e de hidrogénio ( $\text{H}_2$ ) são libertados da reacção do magnésio com a água, podendo o magnésio ser um combustível fóssil alternativo. Para que um ciclo magnésio-hidrogénio funcione como uma fonte de energia, livre de  $\text{CO}_2$ , os lasers necessitam de ter mais potência, não gerada pela electricidade de reactores térmicos, mas por uma fonte de energia renovável, como a potência solar.

Desde 1996, tem sido sempre um objectivo para este laboratório de investigação o desenvolvimento tanto da eficiência de conversão do laser solar como da qualidade do seu feixe. Para maximizar a potência do laser solar no modo  $\text{TEM}_{00}$  e desenvolver a qualidade do seu feixe, foi proposta em 2008 uma nova cavidade de bombeamento constituída por uma montagem elíptica de um guia de luz modificado [12]. Foi atingido um grande aumento da potência do laser solar neste modo e uma melhoria da qualidade do feixe. Este aumento de qualidade e esta melhoria do feixe são muito importantes nas comunicações espaciais.

Para desenvolver a qualidade do feixe do laser solar, outra montagem de guia de onda de sílica fundida foi proposta também em 2008. A radiação solar concentrada por um espelho parabólico primário foi acoplada, através da face quadrada da entrada da montagem de um guia de luz, à extremidade de saída rectangular do guia, localizado ao longo da primeira linha focal de uma cavidade bidimensional (2D-EL-CYL). Por comparação do desempenho



Fig. 4 - (a) Laser de 5 W com bombeamento solar através de uma lente de Fresnel de 0,5 m<sup>2</sup>; (b) Detalhe da cavidade laser (FCT/UNL).

desta cavidade com o desempenho de uma cavidade bidimensional com concentrador parabólico composto dieléctrico (2D-DCPC), verificam-se melhorias significativas na distribuição da absorção da potência no modo TEM<sub>00</sub>.

Para atingir a mais alta eficiência de conversão no laser solar com o meio activo regular de Nd:YAG, foi também proposta, em 2009, a abordagem ao bombeamento solar pelo guia de luz 2D-CPC [13]. As investigações sobre o desenvolvimento da qualidade do feixe laser, tanto dos lasers de estado sólido bombeados por lâmpada, como dos lasers de estado sólido bombeados por diodo, foram levadas a cabo pelo grupo de investigação, desde 1996. Nos lasers bombeados por lâmpadas são usados guias de luz de sílica fundida encurvadas, de secções rectangulares, para acoplar a radiação de bombeamento de uma lâmpada de arco a um cristal laser [14]. Foi construído e testado, por Pedro Bernardes, um laser de cristal de Nd:YAG numa cavidade nova de guia de onda, bombeado por lâmpada. No laser de Nd:YAG bombeado a diodo, a radiação de bombeamento de uma pilha de diodos bi-dimensional de grande área foi concentrada numa óptica intermediária cilíndrica por um primeiro andar do concentrador 2D-CPC, em 2007 [15]. No âmbito de uma Tese de Doutoramento efectuada por Rui Fiúza Martins, desenvolveu-se uma técnica formadora de feixe, em que a alta potência de saída de uma pilha de diodos é eficientemente acoplada, reconfigurada e transmitida a um laser de disco fino, por meio de um feixe de fibras ópticas. Usando esta técnica, a densidade de potência é aumentada por um factor de dois, quando comparada com o acoplamento directo com uma vara de sílica fundida, com abertura numérica constante. Foi medida a eficiência de transmissão de 80% para o formador de feixe, sem revestimento anti-reflector. A distribuição da absorção de tipo chapéu alto é calculada numericamente para o cristal do laser de disco fino [16]. A Universidade de Estugarda colaborou no desenvolvimento desta técnica formadora de feixe, em 2008. A experiência adquirida neste Laboratório de Investigação de Lasers assegura uma preparação de qualidade aos estudantes de Óptica Aplicada, Optoelectrónica, Electrónica e Instrumentação da Licenciatura em Engenharia Física da UNL. A integração rápida dos estudantes, após o término dos seus estudos de Licenciatura e Doutoramento, em empresas que utilizam as tecnologias de óptica e lasers, como são, entre outras, a ESA, Nokia e a Siemens, é o reconhecimento da alta qualidade adquirida.

- 1 M. Ribau Teixeira, Entrevista ao Jornal de Notícias (JN), Inforpor/85/23, de 7/12/1985.
- 2 M. Ribau Teixeira, F. Carvalho Rodrigues, "Princípios do Laser", Gazeta de Física, Separata do Vol.9, pp. I-VII, 1960-1985, 25º Aniversário da Invenção do Laser (Jan. 1986).
- 3 N. Pires Silvestre, J. Santos Lemos, M. Ribau Teixeira, "Development of a Stabilized CO<sub>2</sub> Laser", Laser Technologies in Industry", Proceeding SPIE 952, 565, Porto, 6-8 Junho 1988.
- 4 Laser CO<sub>2</sub>, Conjunto para Formação, Grupo de Investigação de Desenvolvimento e Aplicações Laser, DOP, LNETI, 1990.
- 5 Humberto Armindo Gonçalves, Trabalho Científico apresentado à Faculdade de Ciências Agostinho Neto, para obtenção da Licenciatura em Física, 1987-1989, LNETI, 2/90.
- 6 Miguel Quintano Serra Martins, Projecto e Estágio de Licenciatura em Engenharia Física, da UNL, realizado no INETI, 1996, tendo obtido Equivalência à Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Física da FCT/UNL, em Julho de 2008.
- 7 Manuel José dos Santos Silva, Dissertação apresentada ao Instituto Universitário da Beira Interior, para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia, IUBI - 1983.
- 8 J. M. Dias, "Diagnóstico de Difusão Colectiva de Luz Laser. Aplicação ao Estudo de Flutuações Atmosféricas". Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre, Outubro de 2001.
- 9 G. M. F. Figueira, "Development and characterisation of a Ti:sapphire-Nd:glass system based on Chirped Pulse Amplification". Dissertação para Obtenção do Grau de Doutor em Física, Março de 2001.
- 10 J. M. Dias, "Experimental Evidence for Adiabatic Photon Frequency Upshift: Photon Acceleration". Dissertação apresentada para Obtenção do Grau de Doutor em Física, pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, em Dezembro de 1995.
- 11 N. P. Silvestre, "Laser de CO<sub>2</sub> Excitado por Descarga de Onda de Superfície", Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Física e Engenharia dos Plasmas", na Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Junho de 1993.
- 12 D. Liang e R. Pereira, "Maximizing TEM<sub>00</sub> solar laser power by a light guide assembly-elliptical cylindrical cavity", Opt. Laser Tech. 41(6), 687-692 (2009).
- 13 R. Pereira e D. Liang, "High Conversion efficiency solar laser pumping by light guide /AD-CPC cavity", Opt. Commun. 282, 1385-1392 (2009).
- 14 P. H. Bernardes e D. Liang, "End-side solar laser by a fused silica light guide assembly"; Technical Digest Series of CLEO/QUE, 871-873 (2005).
- 15 D. Liang e R. Pereira, "Diode pumping of a solid-state laser rod by a two-dimensional CPC-elliptical cavity with intervening optics", Opt. Commun. 275, 104-115 (2007).
- 16 R. F.M. Pereira, "Avanços em Esquemas de Bombeamento para Lasers de Disco Fino", Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Física, Optoelectrónica, pela Universidade Nova de Lisboa, Março de 2010

Conversas gravadas com Gonçalo Figueira, J. Mendanha Dias, Hélder Crespo, e A. Pereira Leite. Comunicação privada.

# Aos ombros de gigantes

Jim Al-Khalili

**Se o leitor não se importa, desta vez não vou escrever nada relacionado com mecânica quântica, mas antes sobre como passo uma fracção significativa do meu tempo quando estou fora do Departamento de Física da minha Universidade. Sabe, é que eu também trabalho para a cadeia de televisão BBC, fazendo documentários científicos.**

O que há de melhor nisto de fazer documentários para a televisão é que se pode visitar e ter acesso a locais que jamais se seria autorizado a ver, ou que simplesmente nem se sabia que existiam. Por exemplo, já tive o privilégio de ter nas minhas mãos a primeira edição dos “Principia Mathematica” de Newton (e até verifiquei algumas das contas – estavam correctas), estive no púlpito que Galileu usou nas suas palestras, espreeitei pelo telescópio de Herschel e folheei o caderno de apontamentos de Michael Faraday.

De facto, à medida que escrevo e recorro os sete ou oito documentários que fiz nestes últimos anos, invadem-me muitas destas memórias. É claro que nem todos os cientistas se emocionam com estes importantes artefactos da história da ciência, mas para mim dão vida aos acontecimentos e enchem-me do orgulho de estar a ter o meu pequeno papel no avanço do conhecimento científico. Estes são os gigantes sobre cujos ombros me encontro.

A última vez que me senti maravilhado foi algo inesperada. Tenho andado a filmar uma série em três partes sobre a história da electricidade. Em finais de Março estava com a equipa da BBC na Cornualha, no canto sudoeste de Inglaterra, para contar a história da instalação do primeiro cabo submarino telegráfico intercontinental, em 1858. Não sabia nada sobre este assunto até há bem pouco tempo, e ele acabou por se revelar extremamente fascinante.

Contei a história dos dois navios que se fizeram ao médio-Atlântico, cada um deles transportando mil milhas de cabo de uma polegada de diâmetro e pesando mil toneladas. Seria impossível a um só navio transportar o comprimento



Cortesia de Jim Al-Khalili

total, que abarcaria os mais de três mil quilómetros da costa ocidental da Irlanda até à Terra Nova. A meio do Atlântico, as duas metades foram unidas, depositadas no oceano, e os dois navios afastaram-se um do outro em direcção às respectivas costas, largando o cabo à medida que se deslocavam. À tarde, a equipa de filmagem e eu deslocámo-nos da fria praia até ao Museu do Telégrafo, onde eu fui filmado a explicar como a primeira mensagem, enviada pela rainha Vitória para a América, demorou 16 horas – devido a um problema designado por “retardação”, o código de Morse tinha de ser enviado lentamente e repetido uma e outra vez para poder ser decifrado e compreendido no destino. Estão a ver, um fio de cobre de três mil quilómetros comporta-se como um condensador e armazena carga eléctrica; ao enviar um “ponto” de código Morse, o impulso curto que o representa é convertido numa lenta subida e lenta descida de tensão, pelo que os destinatários tinham dificuldade em distinguir “pontos” e “traços”.

O problema foi resolvido de forma incrivelmente simples: em vez de usar “pontos” e “traços”, simplesmente inverteu-se a polaridade do circuito eléctrico que produzia o impulso. Assim a corrente ia num sentido para um “ponto” e no oposto para um “traço”.

Mas foi no fim do dia que chegou o momento alto, quando tive oportunidade de explicar como é que um sinal eléctrico muito fraco era detectado pelo receptor. Uma das personagens mais importantes desta história foi também um dos mais famosos físicos do século XIX: William Thompson (mais tarde Lord Kelvin). Foi ele que inventou um aparelho chamado galvanómetro de espelho, cuja réplica pude apreciar e explicar de forma satisfatória. Mas deixo ao leitor a curiosidade de investigar de que se trata!



# A Europa da Física

Carlos Fiolhais

**Passo a passo, a Europa da Ciência tem vindo a ser construída e, dentro dela, a Europa da Física. Dois dos meios que tem ajudado a essa construção têm sido a revista *European Physical Journal* (abreviadamente *EPJ*), publicada por um consórcio germânico-franco-italiano (Springer, EDP Sciences e Sociedade Italiana de Física), e a revista *Europhysics Letters* (*EPL*), pertencente à Sociedade Europeia de Física e publicada por um consórcio franco-italiano-britânico (EDP Sciences, Sociedade Italiana de Física e Institute of Physics).**

A *EPJ* nasceu em 1998 da reunião de revistas de grande tradição como o *Zeitschrift für Physik*, o *Journal de Physique* e *Il Nuovo Cimento*, e ainda de periódicos menos conhecidos: *Acta Physica Hungarica*, *Czechoslovak Journal of Physics* e *Portugaliae Physica*. A nossa *Portugaliae Physica*, fundada em 1943 por pioneiros da Física moderna em Portugal, acabou em favor do projecto europeu. Por sua vez, a *EPL*, que agora está a celebrar 25 anos, reúne o apoio das várias sociedades de Física europeias federadas na Sociedade Europeia de Física, entre as quais a Sociedade Portuguesa de Física.

O extinto *Zeitschrift für Physik* remonta a 1920, tendo surgido, sob proposta de um comité de sábios que incluía Albert Einstein, como sequela dos *Verhandlungen* da Sociedade de Física de Berlim,

iniciados no longínquo ano de 1845. Antes da Segunda Guerra Mundial era considerada uma das melhores revistas de Física do mundo. No pós-guerra, começou, porém, a perder terreno relativamente às publicações da Sociedade Americana de Física, como a *Physical Review* (*PR*), com alguns pergaminhos pois tinha sido fundada em 1893, e a *Physical Review Letters* (*PRL*), de 1958. Estas últimas detêm hoje a primazia na cena internacional, apresentando, em geral, factores de impacto mais elevados. De um modo pragmático, os físicos, principalmente os mais jovens, preferem-nas para o envio dos seus artigos por saberem que os seus currículos ficam a brilhar mais de cada vez que vencem as barreiras dos *referees* da *PR* e da *PRL*. Contudo, os físicos do Velho Continente, incluindo os portugueses, bem poderiam privilegiar as revistas europeias, tentando mudar os factores de impacto e reforçando a coesão europeia.

Se a união dos países europeus tem sido algo atribulada na política, não o tem sido menos na Física. Em contraste com a *EPL*, que reúne físicos de um e de outro lado do canal da Mancha, a *EPJ*, que se desdobra em secções devotadas aos vários ramos da Física (a última, *EPJ – H*, é dedicada a “perspectivas históricas da física contemporânea”), enfrenta revistas concorrentes da responsabilidade do Institute of Physics. A Europa, para falar a uma só voz na área da Física, necessita de uma maior colaboração dos físicos que trabalham no continente e nas ilhas britânicas. Se continuar segmentada como está na difusão de artigos originais de Física, dificilmente conseguirá enfrentar os Estados Unidos. Este ano, que na Física é o do centenário da descoberta do núcleo atómico, teve lugar em Lisboa, sob presidência portuguesa, uma reunião do Conselho Científico da *EPJ*, que agrega representantes de numerosos países europeus. Como, à beira Tejo, já houve, a nível político, a Declaração de Lisboa e o Tratado de Lisboa, espera-se que as Tágides possam de novo inspirar uma maior união europeia, desta vez dos físicos. Poder-se-á dizer que tanto a Declaração como o Tratado se revelaram menos frutíferos do que, nos momentos da respectiva assinatura, foi desejo geral. É verdade. Mas também é verdade que, a nível das ciências físicas, deveriam ser menores os impedimentos a um acréscido federalismo científico que dê força a todos e a cada um.

# Aconteceu

## NOVA LEGISLAÇÃO SOBRE UNIDADES DO SISTEMA INTERNACIONAL

Fentossegundo ou femtosegundo? Ampère ou ampere? Se já lhe aconteceu ter dúvidas sobre o modo de escrever correctamente em português os nomes de unidades do sistema internacional ou os seus prefixos, então esta notícia é para si. Foi publicado em Dezembro passado o Decreto-Lei nº 128/2010, que vem actualizar legislação vária relativa aos nomes, símbolos e definições das unidades, os respectivos prefixos e símbolos dos múltiplos e submúltiplos, e as recomendações para a escrita e para a utilização dos símbolos, aprovados pela Conferência Geral de Pesos e Medidas. Por ser uma questão de natural interesse para os físicos, educadores, alunos e outros que lidam com unidades e escrevem em português, a Gazeta recomenda fortemente a leitura deste documento – e não só em caso de dúvidas. Já agora: a resposta certa é “femtosegundo” e “ampere”.

A versão electrónica está disponível no seguinte endereço:  
<http://dre.pt/pdf1sdip/2010/12/23400/0544405454.pdf>



## COORDENADORES DE DIVISÕES DA SPF

A nova Direcção da Sociedade Portuguesa de Física, eleita em 2010, nomeou os seguintes coordenadores das suas Divisões:

- Física Atómica e Molecular: José Paulo dos Santos
- Óptica e Lasers: Gonçalo Figueira
- Meteorologia, Geofísica e Ambiente: Jorge Miguel Miranda
- Física Médica: Maria do Carmo Lopes
- Física dos Plasmas: Luís Lemos Alves
- Física Nuclear: Constança Providência
- Educação: Carlos Portela
- Astronomia e Astrofísica: Rui Agostinho
- Física Aplicada e Eng<sup>a</sup> Física : Joaquim C. N. Pires
- Física da Matéria Condensada : José Luís Martins
- Física das Partículas Elementares: João Carvalho

Aos novos e “velhos” Coordenadores, votos de felicidades e de um bom trabalho!

# Acontece

## CONCURSO: WORKSHOP DE FUSÃO NUCLEAR PARA PROFESSORES DO ENSINO SECUNDÁRIO

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear – Laboratório Associado está a organizar um workshop sobre Fusão Nuclear, a realizar de 5 a 9 de Setembro de 2011, no Instituto Superior Técnico (Lisboa) e no JET (Joint European Torus, Culham – Reino Unido), destinado a professores do Ensino Secundário.

Este workshop visa o ensino dos fundamentos da Física de Plasmas, Energia Nuclear e Fusão Nuclear, a descrição das actividades principais de investigação científica e desenvolvimento tecnológico em Fusão Nuclear e uma visita ao tokamak JET. O JET é a maior experiência mundial de Fusão Nuclear e aquela onde se obtiveram os melhores resultados na direcção da utilização de energia de fusão na Terra. Esta ambicioso projecto é realizado no âmbito de um acordo – o European Fusion Development Agreement (EFDA) – no qual Portugal participa através do Instituto Superior Técnico.

Aos candidatos seleccionados será oferecida a viagem até ao JET e as despesas de estadia. Nesta primeira edição do workshop haverá doze vagas disponíveis, e a selecção será feita mediante análise dos currículos e de uma carta de motivação. Os interessados podem encontrar toda a informação na seguinte página: <http://ipfn.ist.utl.pt/>



A data-limite para envio de candidaturas é o dia 15 de Junho de 2011.

Esta iniciativa conta com o apoio da Sociedade Portuguesa de Física e da TAP - Transportes Aéreos de Portugal.

## O LIP FAZ 25 ANOS

### Catarina Espírito Santo



O LIP, Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, faz 25 anos.

O LIP foi criado a 9 de Maio de 1986, no

contexto da adesão de Portugal ao CERN, tendo surgido em simultâneo as suas unidades de Lisboa e Coimbra. O nascimento do LIP veio congrega e potenciar os esforços da então embrionária comunidade de físicos experimentais de partículas. Através do LIP, Portugal tem estado na primeira linha dos grandes projectos de física de partículas das últimas décadas, no CERN e mais além. Em 2001, o LIP tornou-se Laboratório Associado do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior.

Nestes 25 anos o LIP cresceu e transformou-se. Tem hoje cerca de 170 membros, 70 dos quais doutorados. Os seus domínios de investigação englobam a física experimental de altas energias e astropartículas, o desenvolvimento de detectores, a instrumentação para física de altas energias, a computação avançada e aplicações a outros domínios, em particular à Física Médica. A história do LIP é um elemento incontornável da história da investigação científica em Portugal. Em particular, o LIP surge com lugar de destaque nos capítulos dedicados à internacionalização da ciência no nosso país e ao enorme impulso que a formação avançada de pessoas conheceu nas últimas décadas.

O LIP faz 25 anos no próximo dia 9 de Maio, data em que terá lugar, na Biblioteca Joanina da Universidade de Coimbra, uma pequena sessão pública de comemoração.

## EPS YOUNG MINDS – PROCURAM-SE MENTES BRILHANTES

A Sociedade Europeia de Física (EPS) promove o

projecto EPS Young Minds, destinado a jovens investigadores, desde o nível universitário até pós-doutoramento. O objectivo é dar apoio institucional a actividades de desenvolvimento e divulgação da ciência – criação de colaborações internacionais, envolvimento dos jovens investigadores com a comunidade científica, divulgação e promoção da ciência na comunidade – para as quais é difícil arranjar tempo... ou dinheiro.

O Projecto EPS Young Minds encoraja os jovens interessados nestes temas a criarem secções locais, que colaborarão mutuamente com as suas congéneres nacionais e estrangeiras no desenvolvimento de actividades, criação de redes e divulgação científica. Bastam quatro membros e um orientador sénior para criar uma secção, que poderá então abrir-se a mais membros. A EPS e as sociedades nacionais afiliadas, como SPF, poderão conceder apoio financeiro às actividades propostas através de um processo de concurso.

É simples – basta ter ideias brilhantes, motivação, encontrar as pessoas certas e começar!



Para mais informações consultar:  
<http://epsyoungminds.org/>

## Vai acontecer

### 20 DE MAIO – DIA MUNDIAL DA METROLOGIA

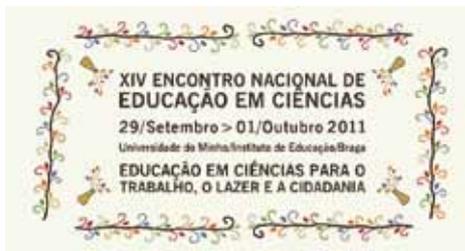
**Euarda Filipe, Olivier Pellegrino**  
**Instituto Português da Qualidade**

Em 20 de Maio de 1875, foi assinada a Convenção do Metro, tratado diplomático celebrado em Paris entre dezassete países, entre os quais Portugal. Esta Convenção consagrou o Sistema Métrico decimal, hoje designado por Sistema Internacional de unidades de medida (SI), de utilização universal e adoptado formalmente em Portugal em 1983.

A Convenção do Metro tem agora 54 países membros e 32 outros associados. Além disso, em 1999 foi celebrado um

Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA) que consagra o reconhecimento dos padrões nacionais de medida e a equivalência dos certificados de calibração emitidos pelos Laboratórios Nacionais de Metrologia (LNM) desses países, desde que participem em comparações interlaboratoriais regulares e tenham sistemas da qualidade segundo as normas internacionais aplicáveis.

Em Portugal, o Laboratório Central de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ) é o LNM responsável pelas grandezas de base comprimento, massa, tempo, corrente eléctrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa e diversas grandezas derivadas num total de 32 grandezas, e o Laboratório de Metrologia e Radiações Ionizantes do Instituto Tecnológico e Nuclear (ITN) é o laboratório designado responsável pelas grandezas derivadas do domínio das radiações ionizantes. A estes Laboratórios está confiada a missão de realizar as unidades de medida das diferentes grandezas do Sistema Internacional de grandezas (ISQ) e de as disseminar em todo o território nacional, assegurando o rigor e a rastreabilidade das medi-



ções efectuadas em todos os domínios.

A exemplo de anos anteriores, no próximo dia 20 de Maio o IPQ celebrará o Dia Mundial da Metrologia com uma visita aberta aos seus laboratórios e ao Museu de Metrologia.

Para tal, basta que os interessados se inscrevam oportunamente no sítio internet do IPQ: <http://www.ipq.pt>.

## **XIV ENCONTRO NACIONAL DE EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS: EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS PARA O TRABALHO, O LAZER E A CIDADANIA**

Universidade do Minho, Braga, Portugal - 29 de Setembro a 1 de Outubro de 2011

### **Laurinda Leite**

Vai realizar-se, de 29 de Setembro a 1 de Outubro de 2011, na Universidade do Minho, o XIV Encontro Nacional de

Educação em Ciências: Educação em Ciências para o Trabalho, o Lazer e a Cidadania.

Este encontro, de carácter bianual, é uma reunião científica que tem vindo a ser organizada rotativamente por uma Universidade e por uma Escola Superior de Educação.

A XIV edição deste encontro, organizada pela Universidade do Minho, visa a discussão e a disseminação de trabalhos de investigação na área da Educação em Ciências, dando especial atenção àqueles que se centram na Educação em Ciências para o Trabalho, o Lazer e a Cidadania.

Reunindo especialistas nacionais nesta área, o encontro constitui não só uma oportunidade para professores, educadores e estudantes tomarem conhecimento dos recentes avanços, teóricos e empíricos, na área da Educação em Ciências, mas também para os investigadores obterem feedback sobre os seus trabalhos.

Mais informações em: <http://sites.ie.uminho.pt/xivenc/>

## **CONFERÊNCIA “PLANCK 2011 - FROM THE PLANCK SCALE TO THE ELECTROWEAK SCALE”**

O Centro de Física Teórica de Partículas realiza no Instituto Superior Técnico, de 30 de Maio a 3 de Junho, a 14ª edição da Conferência de Física de Partículas “Planck 2011 - From the Planck Scale to the ElectroWeak Scale”.

A Comissão organizadora local é composta por G. C. Branco, D. Emmanuel-Costa, R. González-Felipe, F. R. Joaquim, S. Palomares-Ruiz, M. N. Rebelo, J. C. Romão, e J. I. Silva-Marcos.

Para detalhes sobre o encontro visite: <http://indico.cern.ch/internalPagepy?pageld=0&confid=112851>

# Holografia:

## um projecto para o ensino secundário

**Maria Cecília Silva**

Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNL

ceciliasilva@netcabo.pt

Fazer hologramas pode ser um processo simples. Neste artigo descrevemos um sistema para produzir diferentes tipos de hologramas utilizando o seguinte material básico: um laser hélio-néon, uma mesa de trabalho, uma lente esférica, chapas holográficas e soluções químicas para revelação. Estes materiais foram adquiridos por uma quantia inferior a 500€ e testados no ensino secundário [1].

Concluimos ser viável a realização de hologramas de feixe único com qualidade, apesar da simplicidade de meios.

### Introdução

O aparecimento no mercado de produtos como as populares “pulseiras do equilíbrio” com hologramas suscita a vontade de desmistificar as propriedades curativas que dizem irradiar. Esta actividade permitiu explorar fenómenos de reflexão, refacção, absorção, difracção e interferências, a partir da produção de hologramas de reflexão de feixe único.

A holografia compreende dois actos: o registo e a observação. Para compreender o registo de um holograma é necessário introduzir o conceito de interferência: sobrepondo dois feixes de luz coerente, estes interagem produzindo um conjunto de franjas de interferência que é registado numa emulsão holográfica. O holograma obtido é “o registo fotográfico de uma secção plana do volume de interferências” [2]. A difracção tem um papel fundamental na observação já que é o conjunto de franjas de interferência na emulsão, depois de revelada, que difractará o feixe de luz que o atravessar.

O processo mais simples de obter um holograma de reflexão é pelo método de feixe único, proposto inicialmente por Denisyuk [3]. O feixe laser é expandido, atravessando a chapa holográfica até atingir o objecto (Figura 1). Parte da luz do feixe será reflectida pelo objecto novamente para a chapa.

Seguidamente, a chapa que contém a emulsão é revelada. Os microcristais contidos na emulsão enegrecem durante a revelação e tornam-se translúcidos, por acção do branqueador. Porém, os micro-

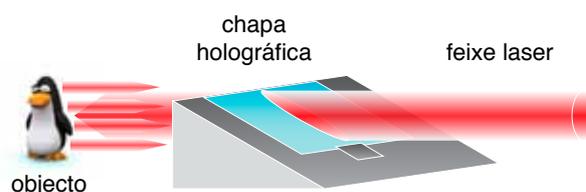


Fig. 1 - Registo de um holograma de reflexão de feixe único

cristais afectados pela luz apresentam índices de refacção diferentes. O holograma de fase obtido resulta da passagem da luz pelas diversas zonas com índices de refacção diferentes, não sendo necessário iluminá-lo com luz monocromática. O próprio holograma actua como filtro interferencial decompondo os vários comprimentos de onda da luz branca e seleccionando o comprimento de onda que obedece à condição de Bragg. Para visualizar o holograma é necessária uma fonte de luz, como por exemplo o Sol, ou outra pequena fonte de luz branca potente, situada por cima e detrás do observador, como indicado na Figura 2.

O registo de hologramas obedece a condições próprias: a mesa de trabalho deve absorver as vibrações e ser montada numa câmara escura e, quando não em uso, os componentes ópticos deverão estar protegidos de poeiras e humidade. Considerar também a importância das regras de segurança, como a obrigatoriedade do uso de luvas e a manipulação correcta da fonte laser. Como a intensidade luminosa de um laser é suficientemente elevada Fig. para causar danos à visão, montou-se a mesa de trabalho num plano inferior à altura média da cintura dos alunos (60 cm do solo) para diminuir o risco de eflexões indesejadas. As soluções químicas foram preparadas na hotte do laboratório de química e durante a revelação a ventoinha existente na câmara escura anexa ao laboratório de Física esteve sempre ligada.

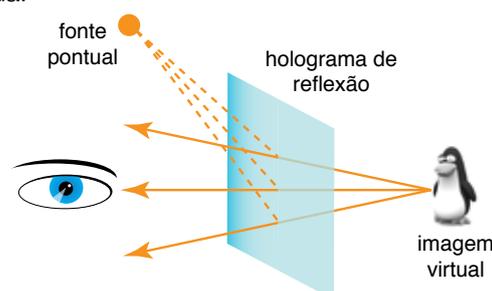


Fig. 2 - Observação de um holograma de reflexão de feixe único

## A montagem experimental

O material necessário para a realização deste trabalho incluiu:

- laser e mesa isoladora
- bloqueador de feixe
- lente esférica e respectivo suporte
- diafragma
- suporte das chapas holográficas para reflexão
- chapa holográfica de dimensões 2"×2,5" ou película
- chapa branca de PVC para alinhamento do feixe
- chapa de vidro limpa
- soluções de revelação e branqueamento
- água destilada
- três tanques e respectivo suporte de chapas/filme
- luvas
- pinças
- luz de segurança
- relógio

O equipamento encontrava-se numa câmara escura dotada de uma luz de segurança. A mesa de trabalho tinha três componentes: um pedaço de carpete, uma câmara-de-ar e uma chapa de ferro plana de dimensões 70 cm × 70 cm × 0,6 mm [4], possibilitando o registo de hologramas até 10 cm × 12,5 cm. A Figura 3 apresenta o esquema dos seis elementos utilizados para a obtenção de hologramas de reflexão de feixe único.

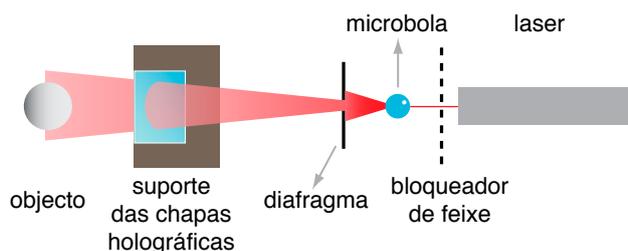


Fig. 3 - Esquema da montagem linear para o registo de hologramas de reflexão

A descrição do procedimento experimental começa pelo laser, pois a sua selecção condiciona as dimensões da mesa, bem como o tipo de hologramas. A escolha incidiu sobre um laser de gás hélio-néon, com uma potência entre 0,8 e 1 mW. Liga-se o laser cerca de 30 minutos antes de iniciar o trabalho.

O primeiro elemento após o laser é um bloqueador de feixe pintado com tinta negro-mate para evitar reflexões. Posiciona-se o bloqueador de feixe a 15 mm do laser e verifica-se se o bloqueador está bem centrado.

O elemento seguinte é a lente esférica, com o diâmetro de aproximado de 5 mm e cuja distância focal é de 2,8 mm (Coherent Optics, referência n.º 43-4761), montada num aro metálico com um diâmetro de 2 cm, suspensa por dois parafusos de PVC, para facilitar a limpeza e evitar marcas. Este aro situa-se na extremidade de uma haste metálica, sustentada por uma peça hexagonal, integrada num poste roscado a uma base magnética. O alinhamento do feixe obtém-se rodando os parafusos que se encontram na peça hexagonal. O equipamento óptico requer um cuidado extremo de limpeza porque qualquer impureza afecta a qualidade do holograma. Coloca-se a lente esférica a uma distância de 15 mm do bloqueador, alinhada com o feixe.

O diafragma situa-se a aproximadamente 30 mm da lente esférica. A presença do diafragma não é indispensável, mas melhora a apresentação final do holograma. Pode ser um diafragma velho de uma máquina fotográfica, ou, no nosso caso, uma lâmina larga de um X-ato, com um orifício de 5,3 mm de diâmetro, colada num íman com plasticina preta. Verifica-se se o feixe está limpo e alinhado, colocando uma placa branca de PVC de dimensões 2"×2,5", no suporte da chapa holográfica. Este procedimento permite visualizar se existem poeiras ou sujidades na lente esférica.

O último componente é o suporte das chapas, colocado a 180 mm de distância da lente esférica. Foi construído em PVC de tom negro despolido e com inclinação de 45°, porque quando se regista um holograma é mais cómodo ter um suporte inclinado do que levantar o laser e o suporte da lente simultaneamente segundo esse ângulo. Como o ângulo de incidência do feixe na emulsão é igual ao ângulo de incidência da luz sobre o holograma na reconstrução da imagem [5], se o feixe atingir o filme com uma incidência de 90°, a fonte de luz necessária à reconstrução teria de ficar mesmo em cima da cabeça observador, o que tornava a observação inexequivel.

Por fim, fixa-se o objecto no suporte, invertido em relação à sua posição normal e o mais perto possível da chapa, com plasticina preta. Verifica-se a uniformidade da iluminação do objecto, colocando uma chapa de vidro limpa no suporte da chapa holográfica e, com as luzes apagadas, observa-se a imagem obtida no vidro por reflexão do objecto. A escolha de objectos incidiu sobre mecanismos de relógio, moedas, brincos e conchas, brancos ou metalizados e sem grandes reentrâncias, para uma iluminação mais uniforme. As distâncias referidas entre os vários componentes no montagem originam uma zona de incidência do feixe pequena, o que permite a diminuição do tempo de exposição (Figura 4).

Uma vez alinhado o feixe com o objecto, apagam-se todas as luzes, excepto a de segurança, e bloqueia-se o feixe (desprendendo o fio do bloqueador). Efectua-se uma pausa de dois minutos até os olhos se acomodarem. Ajusta-se o temporizador do relógio, com o tempo de exposição. Coloca-se a chapa holográfica no suporte, verificando se o lado da emulsão fica voltado para o objecto.



Fig. 4 - Montagem linear para o registo de hologramas de reflexão

Através da internet podem ser adquiridas emulsões com suporte de vidro ou filme de acetato [6]. Os factores que as diferenciam são essencialmente o preço, a resolução e a preparação para a exposição. Em qualquer dos casos, é necessária a utilização de luvas na sua manipulação, de forma a evitar cortes e/ou dedadas. As chapas utilizadas neste trabalho, tanto nos hologramas de reflexão como nos de transmissão, foram as BB640, fabricadas pela HRT, e escolheu-se a película PFG-01, da Slavich. As chapas BB640 eram conhecidas pela boa qualidade dos hologramas realizados, mas o seu preço não era atractivo. Para atenuar este factor, cada chapa foi cortada pela professora em quatro partes de dimensões 5x6,25 cm.

Quando se escolhe a película é necessário colá-la num vidro e, para tal, usamos os seguintes materiais: um quadrado de vidro opticamente plano, de dimensões ligeiramente superiores às do filme, líquido de limpeza de vidros, glicerina, um conta-gotas, papel absorvente e uma bola de praia. Limpa-se bem o vidro utilizando o papel absorvente e o limpa-vidros. Coloca-se o vidro sobre o papel. Ao centro colocam-se três gotas de glicerina. Fecha-se a luz branca e trabalhando apenas com a luz de segurança deposita-se a película sobre a glicerina, segurando-a pelas extremidades, de maneira a encurvá-la ainda mais. A parte convexa fica em contacto com a glicerina, e a parte côncava (onde está depositada a emulsão) apresenta-se voltada para cima. Deposita-se por cima outro papel absorvente e com a bola de praia inicia-se uma pressão a partir do centro do conjunto. Ao exercer pressão com a bola, a glicerina espalha-se uniformemente do centro para as extremidades, diminuindo a possibilidade do aparecimento de bolhas de ar. A glicerina excedente deve ser absorvida pelo papel, para evitar reflexões indesejáveis. Esta operação (Figura 5) deve ser treinada com luz branca, antes de ser realizada com a luz de segurança. A colagem considera-se boa, quando ao olharmos para um objecto através do vidro, a sua imagem não sofrer distorções.

Os dois factores que governam a formação da imagem latente numa emulsão são a intensidade do feixe de referência e do feixe objecto. Os tempos de exposição foram determinados por tentativa e erro. Para os objectos mencionados, obtivemos valores de tempos de exposição entre os 8 e os 20 segundos para as chapas BB-640, reveladas através do processo pirocromio. No caso da película PFG-01, os valores do tempo de exposição são duas a três vezes menores como, por exemplo, para o mecanismo de relógio revelado segundo o processo associado ao Rodinal, cujo valor situou-se nos dois segundos.

Para o registo de um holograma o procedimento é o seguinte: uma vez alinhado o feixe com o objecto, apagam-se todas as luzes excepto a de segurança e bloqueia-se o feixe. Após a acomodação ocular à escuridão, ajusta-se o tempo de exposição no relógio e coloca-se a chapa no suporte com o lado da emulsão voltada para o objecto. Inicia-se então o relógio e desbloqueia-se o feixe. Duran-

te a exposição deve-se evitar ao máximo qualquer movimento ou vibração e até a respiração deve ser contida. Terminada a exposição, bloqueia-se o feixe. Segue-se então o processo de revelação.

### Revelação

A escolha de reveladores efectuou-se em função das recomendações dos fabricantes. Na revelação das chapas BB-640 utilizou-se o processo pirocromio (preparado no laboratório a partir de duas soluções [7]: uma contendo pirogalhol e outra alcalina) enquanto, no caso da película PFG-01, usaram-se dois reveladores comerciais fotográficos – o Rodinal e o Xtol.

O pirogalhol é o agente revelador recomendado pelo fabricante das chapas BB640, para hologramas de reflexão. É considerado um revelador cortante, devido à sua capacidade de endurecer a emulsão (tornando-a insolúvel e resistente a contracções) e criar simultaneamente uma camada superficial sobre a emulsão, a qual incrementa a densidade e a modelação, sem aumentar o grão [8]. Um dos reveladores sugeridos pelo fabricante da película PFG-01 é o SM-6, cuja composição, permitiu a substituição pelo Xtol [9]. Este revelador é considerado pouco tóxico e os hologramas obtidos neste processo apresentam uma cor verde devido à contracção da emulsão. Para obter hologramas de cor vermelha utilizou-se também o Rodinal, conjugado com o branqueador de rehalogenização. Antes de revelar as películas PFG-01 é necessário descolá-las do vidro e mergulhá-las num banho de água destilada, para retirar toda a glicerina que se encontra na face oposta da emulsão.

Uma revelação cuidada é o passo seguinte, e devido à toxicidade dos reveladores como o pirogalhol ou Rodinal, construíram-se três tanques de revelação com tampa em PVC e respectivo suporte acrílico para 2+2 (frente e verso do suporte) chapas ou películas (Figura 6).

A chapa ou película é colocada no suporte com a face sensível para fora e depois introduzida no tanque de revelação. O tempo de revelação recomendado varia entre dois a quatro minutos a uma temperatura de 20 °C. É aconselhável praticar uma agitação cruzada nos primeiros dez segundos, e efectuar agitações curtas de cinco em cinco segundos, em cada intervalo de trinta segundos.

Durante o processo de revelação podemos avaliar a evolução da densidade até ao grau pretendido, retirando por



Fig. 5 - Técnica de colagem com uma bola de praia



Fig. 6 - Tanques de revelação

momentos o suporte transparente com o holograma e comparando-o com um já realizado. Se a emulsão não atinge essa densidade ao fim de quatro minutos é porque houve subexposição, mas deve-se continuar o processo até ao branqueamento pois, mesmo assim, pode estar registado um holograma. Inversamente, se a emulsão ficar negra após 30 a 60 segundos de revelação, significa que houve sobreexposição e nesse caso, retira-se imediatamente do revelador. Quando atinge a densidade ideal, a revelação é interrompida, passando a chapa ou película por um banho de paragem, com água destilada, para retirar a maior parte do revelador.

Depois deste banho, coloca-se o holograma no tanque do branqueador, agitando, até branqueamento completo. Utiliza-se a mesma solução branqueadora no processo pirocromio e no Xtol [9] ou, usa-se em alternativa a R-9 [10]. No processo de branqueamento associado ao Rodinal, utilizou-se a fórmula de Blyth, que provoca um enegrecimento da emulsão ao longo do tempo. Por essa razão, é necessário um banho com uma solução designada vulgarmente por *anti-printout*, para lhe retirar quaisquer vestígios que possam existir na emulsão resultante da sensibilização, evitando o enegrecimento causado pela luz ambiente. Na última fase deste processo, retira-se a chapa ou filme do suporte, e coloca-se numa cuvette com água corrente durante cinco minutos. Adiciona-se à água algumas gotas de detergente para a louça como agente molhante, para evitar manchas na superfície após a secagem.

Após a lavagem final, procede-se à secagem através da passagem do holograma, por banhos alcoólicos. Nos hologramas de reflexão realizados com as chapas BB-640, utilizou-se etanol e água destilada. O procedimento consiste em mergulhar a chapa durante um minuto, em cada um de três banhos de etanol a 50%, 80% e 100% respectivamente. Nos hologramas registados com a película PFG-01, a película é mergulhada sucessivamente em dois banhos de propanol a 50% e 100% respectivamente, durante aproximadamente dois minutos em cada tina.

Para os hologramas de reflexão, visíveis com luz branca, existe ainda a fase de protecção da emulsão para prevenir riscos. Esta fase consiste na pintura da superfície que contém a emulsão com tinta para retoque de pintura automóvel preto-brilhante.

Esta montagem permitiu também o registo de hologramas de transmissão com configuração linear, tipo Gabor. Os componentes da montagem são os mesmos, excepto o objecto.

O objecto é um diapositivo de alto contraste, colocado na primeira ranhura do suporte das chapas, encontrando-se a chapa de vidro na ranhura posterior. Nem sempre obtemos um bom holograma (Figura 7).

Se, independentemente do ângulo de orientação, não for possível observar manchas do tipo arco-íris, entre as causas possíveis temos: mau isolamento da mesa de trabalho em



Fig. 7 - Holograma de uma pedra porosa

relação a vibrações; correntes de ar; estabilização incompleta do laser ou uma revelação incorrecta. Outra das anomalias que surgem frequentemente é a pouca nitidez na imagem do holograma. Podem ser várias as causas do sucedido, sendo as mais comuns: o objecto não foi colocado suficientemente próximo da chapa holográfica; tempos de exposição incorrectos que originam sub e sobre-exposição; entradas de luz na sala ou uma luz de segurança incorrecta, ou um objecto demasiado reflector. Por último, a imagem pode ter uma grande nitidez, mas apresentar imperfeições, tais como anéis, manchas irregulares ou bandas, que evidenciam a existência de poeiras na lente esférica.

## Conclusões

A holografia pode ser um meio para promover o ensino da óptica, e este trabalho permitiu uma exploração pedagógica centrada nas atitudes, em que os conhecimentos e as capacidades foram adquiridos ao longo da sua execução. Por outro lado, os alunos foram confrontados com a utilização de instrumentos e equipamentos que exigem cuidados especiais de manutenção e segurança, pelo que o ideal será trabalhar com pequenos grupos de três ou quatro elementos.

Em relação a uma possível avaliação quantitativa final esta foi preterida a favor da valorização do interesse pela ciência em geral, através do contributo do trabalho experimental.

A arte de produzir hologramas para registar a tridimensionalidade de um objecto é um processo que não reside apenas na qualidade/preço dos meios, mas também no empenho da vontade.

- 1 M. C. Silva, "Elaboração de um sistema simples para a obtenção de hologramas", dissertação de mestrado, FCUL, Lisboa (2002).
- 2 J. M. Rebordão, "Holografia: Física e Aplicações", Colóquio/Ciências Revista de Cultura Científica 4, 22, Fundação Calouste Gulbenkian Lisboa (1989).
- 3 J. Hansen, B. Schlesinger e F. Underseher, "Holography Handbook", Ross Books, Berkeley (1987).
- 4 J. Iovine, "Holography for Photographers", p.17, Focal Press, USA (1997).
- 5 G. Saxby, "Practical Holography", p. 168, Prentice Hall International, 2ª ed., UK (1994).
- 6 [http://www.holokits.com/hologram\\_film\\_bb-640.htm](http://www.holokits.com/hologram_film_bb-640.htm)  
[http://www.holokits.com/hologram\\_film\\_pfg-01.htm](http://www.holokits.com/hologram_film_pfg-01.htm)
- 7 S. G. Anchell, "The Darkroom Cookbook", p.73, Focal Press, Boston (1994).
- 8 S. G. Anchell e B. Troop, "The Film Developing Cook book", p. 49, Focal Press, Boston (1994).
- 9 P. Glafkides e P. Montel, "Cours de Chimie Photographique", p. 183, Pierre Zech Éditeur, 5ª ed., Paris (1992).
- 10 P. M. Pascual, "El libro de la Holografia", p. 315, Alianza

# Como funciona uma balança?

Constança Providência



Material utilizado

**Queres comparar o peso do teu estojo com o do teu colega de carteira mas não tens uma balança. O que podes fazer? Alguma vez pensaste sobre como funciona uma balança?**

Há dois tipos de balanças baseadas em princípios diferentes: um dos tipos, a balança de pratos, é como o balancé e compara as massas de dois objectos colocados em pratos diferentes; o outro tipo, como a balança de casa de banho, determina o peso do objecto. A massa e o peso de um objecto não são a mesma coisa mas estão relacionados. Há, no entanto, uma grande diferença entre estas duas quantidades: enquanto que a massa de um objecto não varia com a posição, o mesmo não acontece com o peso. O teu peso é a força com que a Terra te puxa. Ora esta força é tanto maior quanto mais próximo estás do centro da Terra e, por isso, pesas mais na praia, ao nível do mar, do que no topo dos Himalaias, a 8 km de altitude. Vamos perceber como funciona uma balança que determina o peso.

Pega num elástico de borracha e puxa-o. O que acontece? Fica mais comprido. Dizemos que se deformou. Quanto mais força exerceres nele mais comprido ele fica. Será que não poderias usar o elástico para descobrir qual dos dois estojos é mais pesado?



Fig. 1 - Balança de pratos.

## Material

elásticos e cliques  
régua  
copo de plástico e fio  
porcas do tamanho 8  
uma garrafa de água



Fig. 2 - Balança de casa de banho.

Com a ajuda de um clipe pendura o estojo no elástico, ou pendura um saco de plástico no clipe e coloca o estojo dentro do saco. Mede com uma régua o tamanho do elástico e regista este valor. Faz o mesmo para o segundo estojo. E agora já sabes qual dos dois estojos é mais pesado? É aquele que esticou mais o elástico! Acabaste de construir uma balança simples baseada nas propriedades do teu elástico: se exerceres uma força sobre o elástico ele estica e, quanto maior a força, maior será o seu comprimento. Assim, quanto maior for o peso do estojo, maior é a força com que a Terra o puxa e maior é o comprimento do elástico. Podes pesar outros objectos do mesmo modo: pendura um saco de plástico no clipe e põe



Balança-saco: balança feita com um elástico, saco de plástico e cliques.



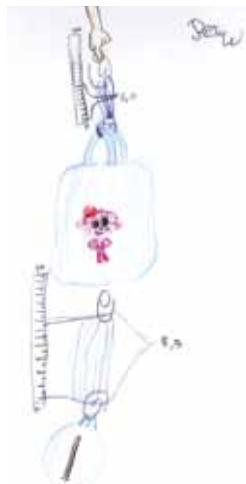
Utilizando a balança saco para pesar um estojo.

dentro do saco os objecto que quiseses pesar. Regista para cada objecto o tamanho do elástico. Qual é o objecto mais pesado?

Objecto	Comprimento do elástico (cm)	Quanto esticou? (cm)
nada	7,0	0,0
estojo	14,0	7,0
caderno	11,0	4,0
boneco	8,0	1,0
flauta	8,5	1,5
livro	16,0	9,0
camisola	10,0	3,0

Tabela 1 - Vários objectos pesados com um elástico. O elástico não deformado tem comprimento 7 cm.

Pesagem de um boneco e de uma flauta com uma balança saco.



Depois de teres pesado os objectos que escolheste volta a medir o tamanho do elástico sem nada pendurado. Tem o mesmo comprimento que tinha inicialmente? O tamanho do elástico ficou um pouco maior não foi? Se pendurares no elástico apenas objectos leves poderás verificar que ele volta ao tamanho inicial quando retiras o objecto. Experimenta pendurar o estojo vazio num elástico novo. Mede o comprimento do elástico antes e depois de teres pendurado o estojo vazio. O que concluis?

Pega num elástico novo e mede-o.

Usa o elástico para pesar uma garrafa de água cheia. Volta a medir o elástico sem nada pendurado. Regista todas as medições no teu caderno. O que concluis?

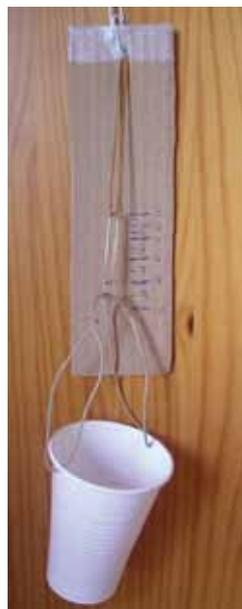
Objecto	Comprimento do elástico (cm)	Quanto esticou? (cm)
nada	9,0	0,0
garrafa cheia	48,0	39,0
nada	13,0	4,0

Tabela 2 - Deformação do elástico por ter pesado um objecto demasiado pesado

Se pendurares um objecto demasiado pesado, como um estojo cheio de lápis e canetas, ou uma garrafa cheia de água, quando voltares a medir o comprimento do elástico sem nada pendurado, obténs um comprimento maior do que o tamanho inicial. Dizemos que o elástico ficou com uma deformação permanente. Isto significa que usaste o elástico para determinar um peso demasiado grande: todas as balanças têm a indicação do peso máximo que não deverás ultrapassar.

Podes melhorar a tua balança de modo a não precisares de usar uma régua de cada vez que penduras um objecto. Para isso, fixa um elástico a uma tira de cartão de 15 cm

por 6 cm. Numa das extremidades, cola uma tira de fita-cola e faz um buraco a meio com a ajuda de um lápis afiado. A fita-cola fortalece a cartolina. Pendura no buraco um clipe com um elástico enfiado e com um pouco de fita cola por cima do clipe o fixa-o ao cartão. Enfia neste clipe um segundo clipe que servirá para tu segurares a balança. Pendura na outra ponta do elástico um terceiro clipe no qual enfiar um saco de plástico ou um copo. Se optares pelo copo faz dois buracos em pontos postos do bordo do copo, passa um fio pelos buracos e ata-o de modo a fazeres uma asa. Agora terás de calibrar a tua balança. Começa por marcar um traço grande que indique o tamanho do elástico quando o copo está vazio. Coloca, agora duas porcas no copo e volta a marcar o tamanho do elástico com um traço grande. À frente do risco escreve 2. Volta a repetir com quatro, seis, oito e dez porcas. De cada vez faz uma marca e escreve à frente o número de porcas que colocaste no copo. Entre cada dois traços faz um traço pequeno no meio e à frente indica o número correspondente (entre o traço do 2 e 4 deve ficar o 3). Tens finalmente a tua balança preparada



Balança com copo uma escala.



Pormenor da escala da balança.

para pesares o que quiseses, desde que não seja muito pesado, claro!

Se quiseses construir uma balança para medir pesos maiores o que poderás fazer? Bastará usares um elástico mais grosso ou dois ou três elásticos finos simultaneamente. Neste caso para calibrares a balança terás de usar mais porcas de cada vez. Experimenta!

### Agradecimentos

Esta actividade foi realizada na turma 3A (2010/2011) e na turma 3D (2006/2007) da EB1 da Solum em Coimbra no âmbito da disciplina Estudo do Meio. Agradecemos às duas turmas e à Professora Conceição Nave o entusiasmo com que realizaram a actividade.

# O acidente na central nuclear de Fukushima-I: o que sabemos

José Marques

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

O acidente na central nuclear de Fukushima-I teve início no dia 11 de Março de 2011, às 14:46 (hora local) com um sismo de intensidade 9 na escala de Richter, com epicentro a 373 km de Tóquio. As centrais nucleares de Onagawa, Tokai, Fukushima-I e Fukushima-II, com um total de 14 reactores, foram as mais próximas do epicentro. Todos os reactores em operação nestas centrais foram parados automaticamente com o sismo, tal como esperado, não se tendo verificado problemas de maior nas centrais de Onagawa, Tokai e Fukushima-II.

A sequência de acontecimentos que levou à situação actual na central de Fukushima-I ainda não é bem conhecida quando esta nota foi escrita, cerca de um mês depois do início do acidente. Vamo-nos restringir a um resumo dos pontos principais, com base nos relatórios da Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA).

A central de Fukushima-I tem seis reactores a água ebuliente projectados pela General Electric (EUA), ligados à rede entre 1971 e 1979. Os reactores 4, 5 e 6 desta central estavam parados para manutenção na altura do sismo, não havendo combustível no interior do vaso de pressão do reactor n.º 4.

Com a paragem automática dos reactores, a maior fonte de calor deve-se ao decaimento dos produtos de cisão contidos no interior dos elementos de combustível. Imediatamente após a paragem, o calor libertado desta forma corresponde a cerca de 6% da potência térmica à qual o reactor estava a trabalhar. Uma vez que não estão a ser produzidos novos produtos de cisão, este calor vai diminuir ao longo do tempo, embora muito lentamente. Este calor, dito “residual”, tem que ser removido e existem diversos sistemas para o fazer. Como o sismo danificou as



Corte tridimensional do edifício dos reactores 1 a 5 na central nuclear de Fukushima-I (adaptado de imagem disponibilizada pela Nuclear Regulatory Commission, EUA).

linhas de transmissão da central, privando-a de ligação eléctrica ao exterior, arrancaram os geradores de emergência, os quais permitiram accionar os sistemas de remoção do calor residual. Contudo, os geradores de emergência foram danificados quando o tsunami atingiu a central, tendo-se verificado uma perda total de corrente alterna às 15:42, cerca de uma hora depois do início do acidente. A partir desta altura apenas foi possível manter em funcionamento, durante algumas horas, sistemas secundários alimentados com baterias.

Foram levados geradores móveis para a central de Fukushima-I ainda durante o dia 11, mas durante diversas horas não houve qualquer sistema activo a arrefecer os núcleos dos reactores e a manter um nível de água apropriado dentro dos vasos de pressão. Nestas condições, é de esperar que a temperatura nos elementos de combustível aumente progressivamente até ao ponto em que ocorrem reacções exotérmicas entre o zircónio das bainhas dos elementos de combustível e o vapor de água (acima de 900 °C), o que leva à libertação de hidrogénio e contribui para aumentar ainda mais a temperatura. A partir de cerca de 1800 °C, o

material das bainhas dos elementos de combustível começa a dissolver o óxido de urânio usado como combustível, libertando maiores quantidades de produtos de cisão para a água no interior da cuba dos reactores. Esta situação ocorreu, em parte do combustível, no acidente de Three Mile Island, nos EUA, em 1979. A temperatura máxima atingida e a quantidade de combustível danificado dependem, obviamente, das condições locais de arrefecimento do combustível.

Para contrariar o aumento de pressão no interior do reactor n.º 1 foi necessário ventilá-lo para o exterior, dadas as limitações operacionais. Ao ventilar o reactor, para além do hidrogénio, são libertados igualmente gases nobres, bem como elementos de cisão voláteis, como o iodo e o cézio. A ventilação foi iniciada às 14:30 do dia 12 de Março, tendo-se registado uma explosão de hidrogénio que destruiu a parte superior do edifício às 15:36, tal como indicado na figura. Esta explosão foi, em alguns casos, erroneamente descrita como uma “explosão do reactor”, e não uma “explosão no reactor”, devida a acumulação de hidrogénio. Nem o vaso de pressão contendo o núcleo, nem o vaso que o envolve foram afectados pela explosão de hidrogénio. Entretanto, a evacuação de residentes, que estava já em curso num raio de 10 km, foi alargada para um raio de 20 km.

Para limitar os danos no núcleo do reactor n.º 1, foi iniciada a injeção de água do mar no vaso de pressão às 20:20. A injeção de água do mar está longe de ser ideal, dado que o NaCl se pode depositar na superfície dos elementos de combustível e em orifícios de escoamento de água, diminuindo a transferência de calor, mas foi dada prioridade à inversão da subida de temperatura no núcleo. Entretanto, degradaram-se igualmente as condições no reactor n.º 3. Foram realizadas operações de ventilação a 12 e 13 de Março, seguidas de injeção de água do mar. Uma nova ventilação no dia 14 resultou numa explosão às 11:01. Uma explosão semelhante ocorreu no reactor n.º 2 no dia seguinte, às 6:10. Não foram feitas novas ventilações desde que ocorreram as explosões em cada reactor.

Novas preocupações surgiram no dia 15, desta vez com as piscinas onde está armazenado o combustível irradiado. Quando o combustível é retirado nos reactores, é mantido durante alguns anos em piscinas, antes de ser reprocessado ou armazenado definitivamente. A água destas piscinas é continuamente arrefecida, para remoção do calor libertado pelo decaimento dos produtos de cisão. A água, para além de fluído de arrefecimento, funciona igualmente como escudo de radiações. Se o combustível deixar de estar completamente coberto por água, as doses de radiação na vizinhança da piscina

umentam, podendo o combustível vir a ser danificado se a sua temperatura aumentar muito. Como deixou de ser possível arrefecer a água destas piscinas, a temperatura subiu gradualmente, tendo atingido o ponto de ebulição da água em alguns casos. A evaporação anormal de água fez com que a quantidade de água continuasse a diminuir, tendo sido necessário recorrer a viaturas de bombeiros para repor, à distância, água nas piscinas dos reactores 1 a 4.

Só a 17 de Março foi possível repor em operação os geradores de emergência no reactor n.º 6. Em resultado disto, os reactores 5 e 6 foram colocados em situação estável e perfeitamente controlada no dia 20 de Março. Foi possível reactivar as salas de comando dos outros reactores a partir do dia 20, tendo começado a ser injectada água doce, em substituição da água salgada, nos reactores 1 a 3 a partir de 25 de Março. A recuperação dos reactores 1 a 3 vai ainda ser lenta. Não são conhecidas as quantidades de combustível danificado nestes reactores. Deve referir-se que, no caso do acidente de Three Mile Island, essa avaliação demorou alguns anos.

Ainda é demasiado cedo para avaliar as consequências do acidente. As autoridades japonesas procederam rapidamente à evacuação dos residentes que poderiam ser mais afectados pelo acidente. Não ocorreram mortes devidas a sobre-exposição a radiação durante o primeiro mês, sendo de esperar que as consequências para a população no Japão sejam reduzidas, graças à evacuação. Não são de esperar quaisquer consequências fora do Japão. Em contraste, o acidente no reactor n.º 4 de Chernobyl em Abril de 1986 foi inicialmente mantido secreto, não se tendo tomado medidas para proteger a população nos primeiros dias. Além disso, as emissões em Chernobyl foram fortemente influenciadas pelo incêndio da grafite, que demorou dez dias a ser controlado.

Foi a primeira vez que ocorreu um acidente nuclear em mais que um reactor ao mesmo tempo. As autoridades japonesas classificaram os acidentes nos reactores 1, 2 e 3, individualmente, como de nível 5 na escala *International Nuclear Event Scale* (INES) da AIEA, a 18 de Março. Este nível é o mesmo atribuído ao acidente de Three Mile Island.

A classificação na escala INES foi revista a 12 de Abril, considerando o conjunto dos acidentes nos três reactores como se fossem um único. Isto fez com que o nível fosse aumentado para 7, o mesmo atribuído ao acidente de Chernobyl. As autoridades japonesas anunciaram no mesmo dia que as libertações de produtos de cisão para a atmosfera foram cerca de 10% das libertações no acidente de Chernobyl. Estes dois factos não são contraditórios. Apesar da escala INES ser logarítmica, isto é, cada nível representar um agravamento por um factor de 10 relativamente ao nível imediatamente anterior, o nível 7 (máximo da escala) é aberto, devendo ser activado sempre que as libertações para a atmosfera excedam algumas dezenas de PBq (petabecquerel, 10<sup>15</sup> Bq). Se a escala INES tivesse mais níveis, por exemplo, até ao nível 10, mantendo-se o agravamento por

um factor de 10 entre cada nível, então o acidente de Fukushima seria provavelmente de nível 8 (emissões estimadas de algumas centenas de PBq), enquanto que o de Chernobyl seria de nível 9 (emissões excederam alguns milhares de PBq). Desde o início do acidente foram igualmente realizadas descargas para o mar de água contaminada, as quais deverão ter consequências reduzidas.

Para saber mais:  
Agência Internacional de Energia Atómica: <http://www.iaea.org>  
Agência de Segurança Nuclear e Industrial: <http://www.nisa.meti.go.jp/english>  
Karl Heinz Neeb, "The radiochemistry of nuclear power plants with light water reactors", Walter de Gruyter, Berlim (1997).

## Correio dos leitores

### Físicos hospitalares – uma reflexão

No último número da Gazeta de Física (Vol. 33, Núm. 3-4, págs. 47 e 48), Maria da Conceição Abreu e Luís Peralta apresentam uma reflexão sobre a formação inicial do físico hospitalar.

Segundo os autores, os cursos que melhor preparariam o acesso à carreira de físico hospitalar seriam, para além de Física, Engenharia Física e Engenharia Biomédica. No artigo mostram um gráfico com os ingressos nesses cursos em várias Universidades portuguesas no presente ano lectivo.

Apesar de, há já vários anos, a Universidade de Coimbra também formar licenciados e mestres em Engenharia Física (em 2010/2011, todas as 20 vagas foram preenchidas) e Enge-

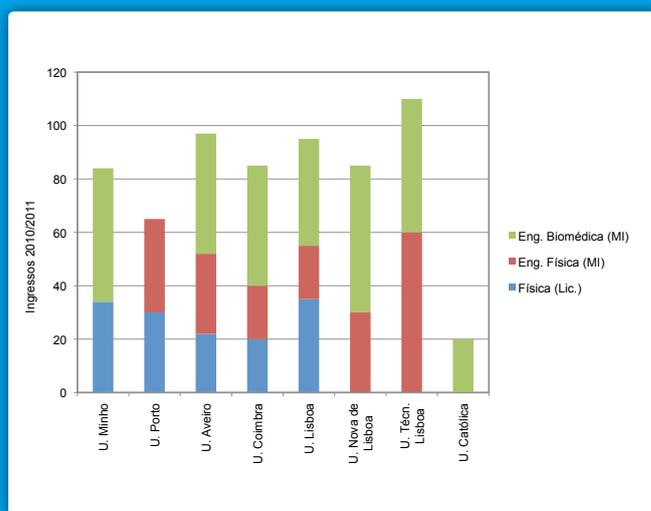
naria Biomédica (em 2010/2011, todas as 45 vagas foram preenchidas), estes cursos foram ignorados pelos autores. Também se regista a não referência ao curso de Engenharia Física da Universidade do Porto.

### Manuel Fiolhais

Director do Departamento de Física, Universidade de Coimbra

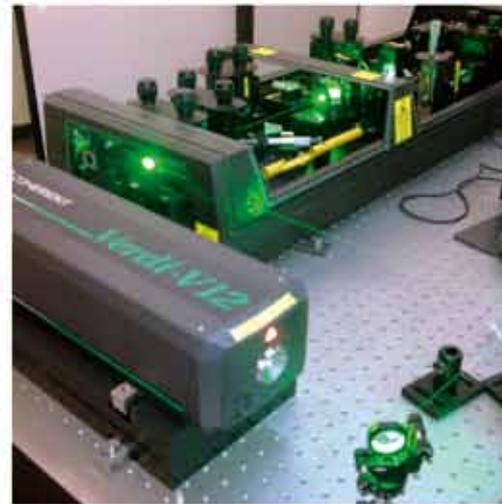
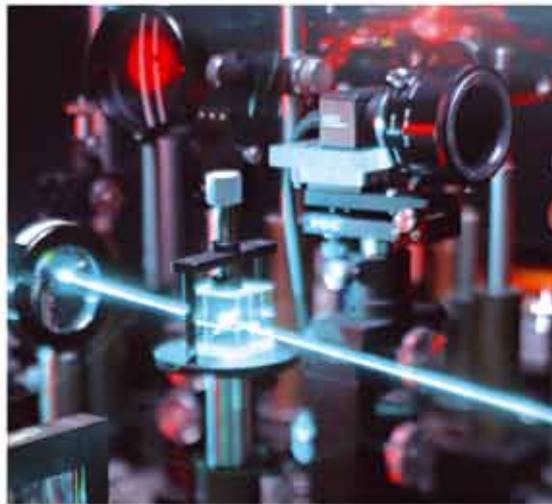
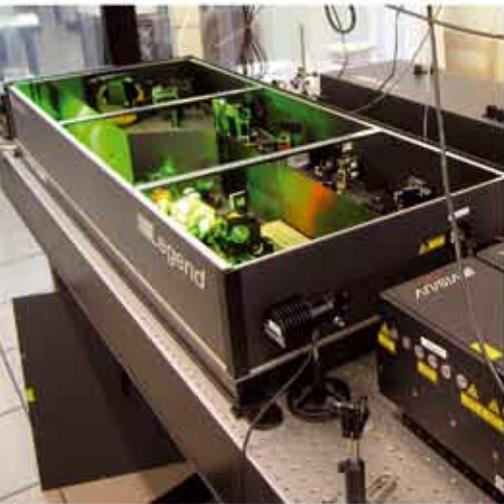
### Resposta de M. C. Abreu:

Os autores admitem que cometeram um lapso, e apresentam as desculpas pelo facto. Apresentam-se um gráfico com os valores correctos para a Universidade de Coimbra, bem como para o curso de Eng. Física da Universidade do Porto.



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

## All you need for your LASER application



## Todo lo que necesita para su aplicación LÁSER

[www.innovasci.com](http://www.innovasci.com) ☎ +34 91 710 56 50





*Tens até 25 anos? Junta-te com um amigo. fazem-se sócios da SPF até 30 de Junho de 2011 e recebem grátis o primeiro ano de quotas + uma t-shirt da SPF de presente de boas-vindas.*

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

# NEWPORT - AS MARCAS E OS PRODUTOS EM QUE CONFIAMOS



A Newport traz mais de 40 anos de experiência para a indústria de fotonica global, tanto em aplicações para investigação científica como para soluções integradas.



O portfolio da Newport a nível mundial inclui soluções líderes para controle de vibrações, controle de movimento de precisão, instrumentos de fotonica, componentes de opto-mecânica, óptica e lasers .



©2011 Newport Corporation



## SPECTRA-PHYSICS O PRIMEIRO NOME EM LASERS

Há 50 anos a Spectra-Physics® tornou-se a primeira empresa de comércio de lasers - a pioneira e catalisadora para a indústria de lasers. Ao longo desses anos, a Spectra-Physics introduziu muitos "Princípios" que ao longo do tempo se tornaram padrões comuns dentro da indústria.