

# 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.

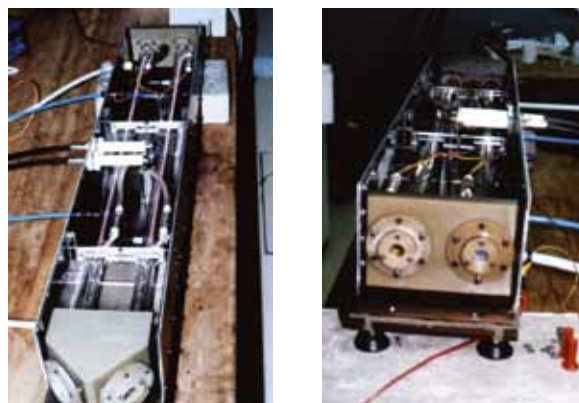


Fig. 1 - (a) Protótipo de um laser de CO<sub>2</sub> com cavidade de ressonância de dois tubos de descarga cor de rosa, acoplados por dois espelhos de cobre revestidos a ouro, montados no bloco metálico, a 90°. (parte inferior da fotografia). (b) Outra vista do protótipo, onde se vêem, no primeiro plano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

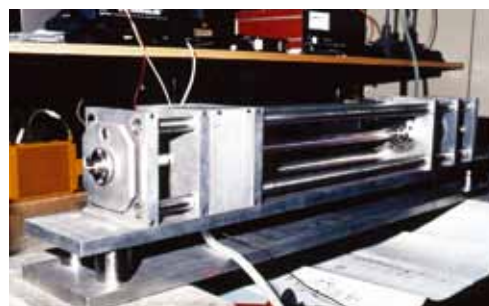


Fig. 2 - Protótipo de um laser de CO<sub>2</sub> com cavidade de ressonância simples. Os seus espelhos, totalmente reflector e acoplador de saída com o seu sistema de alinhamento micrométrico, estão montados respectivamente, no primeiro bloco metálico do lado esquerdo e no primeiro bloco metálico do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